

**Г.И. Николадзе  
М.А. Сомов**

## **ВОДОСНАБЖЕНИЕ**

Рекомендовано Государственным комитетом Российской Федерации по высшему образованию в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Строительство", специальности "Водоснабжение и водоотведение".

Москва  
Стройиздат 1995

ББК 38.761.1  
Н 63 УДК 628.1(075.8)

*Издание выпущено в свет при содействии Комитета РФ по печати.*

*Учебник подготовлен с использованием материалов Московского муниципального предприятия "Мосводоканал" и выпущен под его патронажем.*

*Рецензенты - Г.С. Попкович, С.В. Храменков*

**Николадзе Г.И., Сомов М.А.**

Н63 Водоснабжение: Учеб. для вузов.- М.: Строй издат, 1995.  
688 с.: ил.

ISBN 5-274-01420-8.

Приведены основные сведения о системах водоснабжения, условиях работы и конструкциях основных водопроводных сооружений, а также методы их расчета и проектирования. Рассмотрены задачи и характерные особенности систем муниципального и сельскохозяйственного водоснабжения.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Водоснабжение и водоотведение».

**ББК 38.376.1**

Николадзе Г.И., Сомов М.А., 1995

**047 (01) - 95 ISBN 5-274-01420-8**

*Учебное издание*

Николадзе Георгий Ильич, Сомов Михаил Александрович

**ВОДОСНАБЖЕНИЕ**

*Редактор С.И. Погудина*

*Технический редактор М.С. Ашиткова*

*Корректор Н.А. Шатерникова*

**ИБ № 5633**

Подписано в печать 19.05.95. Формат 60x88. Бумага офсетная. Гарнитура Бодони.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 43. Уч.-изд. л. 44,2. Тираж 1000 экз. Изд. № АІ-3731.

Заказ № 1050

Стройиздат, 101442, Москва, Долгоруковская, 23 а.

Московская типография № 4 Комитета РФ по печати.  
129041, Москва, ул. Переяславская, 46.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Предисловие.</i>	13
	<i>Введение.</i>	14
<b>Раздел 1.</b>	<b>ИСТОЧНИКИ СНАБЖЕНИЯ ВОДОЙ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ И ОБЪЕМЫ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ</b>	18
<b>Глава 1.</b>	<b>Источники водоснабжения</b>	18
1.1.	Требования, предъявляемые к источникам водоснабжения.	18
1.2.	Характеристика источников водоснабжения .	19
1.3.	Влияние деятельности человека на состояние природных источников водоснабжения.	25
1.4.	Охрана природных вод от загрязнения, засорения и истощения. Ликвидация их вредного воздействия	30
1.5.	Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и сооружений систем водоснабжения	37
1.6.	Водное законодательство	40
<b>Глава 2.</b>	<b>Водопотребление</b>	43
2.1.	Виды потребления воды	43
2.2.	Состояние и тенденции изменения водопотребления в населенных пунктах.	45
2.3.	Пути обеспечения рационального водопотребления в населенных пунктах.	49
2.4.	Определение объемов расходуемой воды.	52
2.5.	Режим потребления воды	58
<b>Раздел 2.</b>	<b>СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И РЕЖИМ ИХ РАБОТЫ</b>	
<b>Глава 3.</b>	<b>Общая схема системы водоснабжения объекта.</b>	66
<b>Глава 4.</b>	<b>Режим работы системы водоснабжения.</b>	73
4.1.	Режим работы отдельных сооружений и их функциональная взаимная связь.	73
4.2.	Работа систем водоснабжения при возникновении пожара.	79
4.3.	Основные расчетные режимы работы системы подачи и распределения воды. Определение регулирующих, противопожарных и аварийных объемов емкостей .	81
<b>Раздел 3.</b>	<b>СИСТЕМЫ ПОДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ.</b>	86
<b>Глава 5.</b>	<b>Общие вопросы проектирования водоводов и водопроводных сетей.</b>	86
5.1.	Типы водоводов и водопроводных сетей.	86
5.2.	Модель отбора воды из водопроводной сети .	89
5.3.	Принципы определения диаметров труб водопроводных линий.	93
5.4.	Формулы для гидравлического расчета водопроводных труб.	99
<b>Глава 6.</b>	<b>Теоретические основы и методы гидравлического расчета водопроводных сетей</b>	103
6.1.	Задачи гидравлического расчета водопроводных сетей .	103
6.2.	Первоначальное потокораспределение воды в кольцевых сетях.	105
6.3.	Теоретические основы и практические методы внутренней увязки водопроводных сетей	107
6.4.	Примеры гидравлической увязки сети методами В.Г. Лобачева и М. М. Андрияшева.	113
6.5.	Совместная работа элементов системы подачи и распределения воды (СПРВ).	121
<b>Глава 7.</b>	<b>Теоретические основы технико-экономического расчета систем подачи и распределения воды</b>	124

7.1.	Общая постановка задачи технико-экономического расчета водопроводных сетей	124
7.2.	Методы технико-экономического расчета водопроводных сетей.	125
<b>Глава 8.</b>	<b>Использование ЭВМ в практике расчетов систем подачи и распределения воды (СПРВ)</b>	129
8.1.	Типы решаемых задач	129
8.2.	Использование ЭВМ при расчетах СПРВ .	130
8.3.	Подходы к решению задач по выбору вариантов и очередность их рассмотрения при расчете СПРВ	132
<b>Глава 9.</b>	<b>Особенности проектирования и расчета зонных систем водоснабжения</b>	135
9.1.	Область применения	135
9.2.	Основные типы зонных систем водоснабжения.	137
9.3.	Технико-экономическое обоснование зонирования.	139
9.4.	Выбор системы зонирования	143
<b>Раздел 4.</b>	<b>КОНСТРУИРОВАНИЕ СИСТЕМ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ВОДЫ</b>	149
<b>Глава 10.</b>	<b>Общие требования к материалу труб. Типы труб и их выбор</b>	149
<b>Глава 11.</b>	<b>Трубопроводная арматура систем водоснабжения.</b>	162
<b>Глава 12.</b>	<b>Сооружения на водопроводной сети и водоводах .</b>	178
<b>Глава 13.</b>	<b>Емкости систем водоснабжения.</b>	182
<b>Глава 14.</b>	<b>Переходные процессы в напорных системах водоснабжения</b>	192
<b>Раздел 5.</b>	<b>ВОДОЗАБОРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ.</b>	203
<b>Глава 15.</b>	<b>Водозаборы подземных вод</b>	203
15.1.	Условия залегания подземных вод. Их использование.	203
15.2.	Типы водозаборов подземных вод. Условия их применения .	205
15.3.	Забор подземных вод с помощью буровых скважин.	206
15.4.	Расчет водозаборных скважин	217
15.5.	Комплексные расчеты водозаборов подземных вод.	222
15.6.	Шахтные колодцы	239
15.7.	Горизонтальные водозаборы	241
15.8.	Лучевые водозаборы	246
15.9.	Искусственное восполнение подземных вод (ИВПВ) .	251
15.10.	Каптаж подземных вод	253
15.11.	Восстановление дебитов подземных водозаборов .	256
<b>Глава 16.</b>	<b>Водозаборные сооружения из поверхностных источников.</b>	258
16.1.	Основные определения и классификация сооружений.	258
16.2.	Требования, предъявляемые к водозаборам систем водоснабжения.	260
16.3.	Природные условия забора воды	261
16.4.	Выбор места расположения и технологической схемы водозабора	266
16.5.	Технологическое оборудование водозаборных сооружений.	276
16.6.	Водоприемники	290
16.7.	Самотечные, всасывающие и сифонные водоводы.	300
16.8.	Береговые сеточные колодцы	303
16.9.	Водозаборные сооружения совмещенного типа.	306
16.10.	Гидравлический расчет водозаборных сооружений .	312
16.11.	Водозаборные сооружения с водоприемными ковшами.	322
16.12.	Водохранилищные водозаборные сооружения.	325
<b>Глава 17.</b>	<b>Особенности забора воды в специфических условиях.</b>	333
17.1.	Водозаборные сооружения на каналах.	333
17.2.	Забор воды из горных и высокогорных рек.	335

17.3.	Забор воды в районах распространения вечномёрзлых грунтов.	338
<b>Раздел 6.</b>	<b>НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ.</b>	344
<b>Глава 18.</b>	<b>Общие положения теории надежности систем водоснабжения.</b>	344
<b>Раздел 7.</b>	<b>УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ.</b>	356
<b>Глава 19.</b>	<b>Состав природных вод. Основные методы и технологические схемы их кондиционирования</b>	356
19.1.	Характеристики качества воды природных источников и требования, предъявляемые к ним различными водопотребителями.	356
19.2.	Методы и технологические процессы водоподготовки.	373
19.3.	Основные технологические схемы улучшения качества воды.	375
<b>Глава 20.</b>	<b>Коагулирование примесей воды .</b>	384
20.1.	Коагулирование примесей в объеме.	384
20.2.	Контактная коагуляция	389
20.3.	Реагенты, используемые при водоподготовке .	392
20.4.	Организация реагентного хозяйства.	398
20.5.	Дозирование реагентов	405
<b>Глава 21.</b>	<b>Смешение реагентов с водой.</b>	408
21.1.	Общие сведения	408
21.2.	Смесители гидравлического типа.	411
21.3.	Смесители механического типа	414
<b>Глава 22.</b>	<b>Камеры хлопьеобразования.</b>	415
22.1.	Общие сведения	415
22.2.	Камеры хлопьеобразования гидравлического типа	417
22.3.	Флокуляторы и аэрофлокуляторы.	422
<b>Глава 23.</b>	<b>Предварительная обработка воды.</b>	426
23.1.	Обработка воды фильтрованием через сетки, ткани и пористые перегородки	426
23.1.1.	Теоретические основы процесса. Макрофильтрование.	427
23.1.2.	Микрофильтрование	431
23.2.	Осветление воды в поле центробежных сил. Аппаратное оформление процесса	434
23.3.	Извлечение примесей воды осаждением	439
23.3.1.	Теоретические основы осаждения взвеси .	440
23.3.2.	Типы отстойников и область их применения.	446
23.3.3.	Горизонтальные отстойники	449
23.3.4.	Вертикальные отстойники	454
23.3.5.	Радиальные отстойники	455
23.3.6.	Отстойники с малой глубиной осаждения.	456
23.4.	Обработка воды в слое взвешенного осадка. 458	
23.4.1.	Теоретические основы работы взвешенного слоя	462
23.4.2.	Конструкции осветлителей	469
23.4.3.	Расчет и проектирование осветлителей.	473
23.5.	Обработка воды флотацией	475
23.5.1.	Теоретические основы и методы флотации	475
23.5.2.	Конструкции флотаторов и их расчет .	480
<b>Глава 24.</b>	<b>Обработка воды фильтрованием .</b>	481
24.1.	Сущность процесса. Классификация фильтров.	481
24.2.	Теоретические основы очистки воды фильтрованием через зернистые материалы	486
24.3.	Скорые фильтры	490
24.4.	Фильтры повышенной грязеемкости.	497

24.5.	Расчет и проектирование скорых фильтров.	503
24.6.	Контактные осветлители	506
24.7.	Медленные фильтры	510
24.8.	Намывные фильтры	512
<b>Глава 25.</b>	<b>Обеззараживание воды</b>	517
25.1.	Методы обеззараживания воды	517
25.2.	Обеззараживание воды сильными окислителями .	517
25.2.1.	Хлорирование воды	517
25.2.2.	Обеззараживание воды гипохлоритом натрия.	523
25.2.3.	Озонирование воды	526
25.3.	Обеззараживание воды ультрафиолетовыми лучами.	529
<b>Глава 26.</b>	<b>Дезодорация и дегазация воды .</b>	534
26.1.	Возникновение привкусов и запахов воды.	534
26.2.	Дезодорация и дегазация воды аэрацией .	536
26.3.	Использование окислителей для дезодорации воды .	538
26.4.	Дезодорация воды сорбцией	541
26.5.	Окислительно-сорбционный метод дезодорации воды.	544
<b>Глава 27.</b>	<b>Фторирование и обесфторивание воды .</b>	547
27.1.	Технология фторирования воды	547
27.2.	Технология обесфторивания воды	554
<b>Глава 28.</b>	<b>Обезжелезивание воды</b>	562
28.1.	Характеристика железосодержащих вод.	562
28.2.	Обезжелезивание природных вод	565
28.3.	Обезжелезивание конденсата ТЭС и ТЭЦ.	576
28.4.	Обезжелезивание оборотных вод	581
28.4.1.	Сталеплавильное производство .	582
28.4.2.	Гальванические цехи	585
28.5.	Обезжелезивание шахтных вод	588
<b>Глава 29.</b>	<b>Деманганация воды</b>	591
<b>Глава 30.</b>	<b>Умягчение воды</b>	598
30.1.	Классификация методов. Теоретические основы умягчения воды.	598
30.2.	Термический метод умягчения воды .	600
30.3.	Реагентное умягчение воды	602
30.3.1.	Устранение карбонатной жесткости воды известкованием (декарбонизация воды)	603
30.3.2.	Умягчение воды известью и содой .	604
30.3.3.	Содово-едконатриевый и содово-регенеративный методы умягчения воды	606
30.3.4.	Бариевый метод умягчения воды .	607
30.3.5.	Аппаратное оформление реагентного умягчения воды .	608
30.4.	Термохимический метод умягчения воды	611
30.5.	Умягчение воды катионитами	613
30.5.1.	Свойства катионитов	616
30.5.2.	Умягчение воды натрий-катионированием .	618
30.5.3.	Водород-натрий-катионитовое умягчение воды	625
30.5.4.	Оборудование катионитовых установок	631
30.6.	Умягчение воды диализом	637
<b>Глава 31.</b>	<b>Магнитная обработка воды.</b>	639
<b>Глава 32.</b>	<b>Проектирование водоочистных комплексов.</b>	641
32.1.	Выбор технологической схемы, отдельных сооружений и реагентов .	641
32.2.	Высотная схема и планировка водоочистных сооружений .	643

32.3.	Повторное использование промывной воды и обработка осадка.	652
<b>Раздел 8.</b>	<b>ВОДОСНАБЖЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПЛОЩАДОК .</b>	655
8.1.	Использование воды в строительстве. Нормы и режим водопотребления	655
8.2.	Схемы временного водоснабжения строительных площадок.	658
8.3.	Сети временных водопроводов	661
8.4.	Малые установки для кондиционирования воды в системах временного водоснабжения	663
<b>Раздел 9.</b>	<b>СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ</b>	668
9.1.	Использование воды в сельском хозяйстве. Нормы и режимы водопотребления	668
9.2.	Определение расчетных расходов воды.	672
9.3.	Системы сельскохозяйственного водоснабжения.	675
9.4.	Водоснабжение сельских населенных пунктов .	680
9.5.	Водоснабжение АПК и ферм	682
9.6.	Полевое водоснабжение	683
9.7.	Пастбищное водоснабжение	685
	<i>Список литературы</i>	688

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Система водоснабжения представляет собой комплекс сооружений, обеспечивающих добывание, очистку и подачу воды потребителям в необходимых количествах и требуемого качества с соблюдением требований надежности. Огромное многообразие вопросов при высоком уровне развития современной техники водоснабжения не позволяет изложить учебник с желаемой степенью детализации. Поэтому в учебнике с приемлемой полнотой рассмотрены основные принципиальные вопросы водоснабжения и приведены сведения, отвечающие по содержанию и объему программе курса. Из-за ограниченного объема теоретические материалы, приводимые в книге, сопровождаются лишь иллюстративными примерами гидравлических и других расчетов, а также краткими справочными данными. Однако этот недостаток компенсируется имеющимися учебными пособиями и необходимой справочной литературой.

Следует отметить, что данной книге предшествовали учебники «Водоснабжение», написанные в 1926-1982 гг. профессорами А.А. Суриным, Н.Н. Гениевым, Н.А. Кашкаровым, Н.Н. Абрамовым. Н.Н. Абрамов был автором последних трех изданий данного учебника.

В настоящем издании предпринята попытка обобщить методологический опыт представления материала с учетом сложившихся приоритетов в практике проектирования, строительства и эксплуатации систем водоснабжения. В настоящей книге изложены современные методы добывания, кондиционирования и транспортирования воды, предназначенной для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения. Значительное внимание уделено экологическим проблемам систем водоснабжения, рациональному использованию питьевой воды, мероприятиям по охране водных источников от истощения и загрязнения. Особенности расчета систем производственного водоснабжения и подготовки воды для их нужд в книге не рассматриваются, так как они отнесены к самостоятельному курсу.

В учебнике использованы разработки таких крупнейших производственных, проектных и научных организаций, как ММП «Мосводоканал», Союзводоканалпроект, Гипрокоммунводоканал, МосводоканалНИИпроект, НИИВОДГЕО, НИИКВОВ, а также зарубежный опыт.

Главы 1-8, 10-13, 15.1-15.4, 15.6-15.11, 17 написаны проф. М.А. Сомовым; главы 19-32 - проф. Г.И. Николадзе. Отдельные главы написаны: глава 9 - доц. О.Г. Приминим; глава 14 - проф. К.П. Вишневым; глава 15.5 - проф. Г.М. Коммунаром; глава 16 - доц. В.Н. Ересновым; глава 18 - доц. В.С. Макогоновым.

Авторы приносят искреннюю благодарность генеральному директору Московского муниципального предприятия «Мосводоканал» С.В. Храменкову и кафедре «Водоснабжение и канализация» Всесоюзного заочного инженерно-строительного института (зав. кафедрой проф. Г.С. Попкович) за ценные советы и замечания, сделанные ими при подготовке рукописи к изданию.

Авторы считают своим долгом выразить признательность ММП «Мосводоканал» за взятие на себя обязательств, связанных с материальными затратами по изданию учебника.

Авторы надеются, что настоящая книга поможет широкому кругу специалистов ориентироваться в различных вопросах, связанных с работой систем водоснабжения.

## ВВЕДЕНИЕ

Вся жизнедеятельность человека связана с использованием воды, потребность в которой все возрастает. Одной из основных задач водоснабжения является обеспечение населения водой, отвечающей определенным санитарно-гигиеническим требованиям.

Система водоснабжения - это комплекс инженерных сооружений и устройств, обеспечивающих получение воды из природных источников, ее кондиционирование до требований потребителя, транспортирование и подачу воды потребителям в необходимых количествах, под требуемым напором и при соблюдении требований надежности.

В современных условиях многочисленные потребители требуют воду различного качества. Рост водопотребления привел во всем мире к ее количественному и качественному дефициту. Поэтому к решению задач водоснабжения требуется комплексный подход, предусматривающий интересы различных групп потребителей воды, рациональное ее использование с учетом экологических аспектов и т.д.

Первые сведения об использовании воды для целей водоснабжения получены из археологических данных, обнаруженных в Месопотамии, Египте, Индии, Китае. Они указывают на то, что уже в глубокой древности человечество создавало системы водоснабжения, хотя и без достаточных на то знаний. Первые водопроводные системы были построены в Урарту (на территории современной Армении) в VIII- VII вв. до н.э. Дальнейшее развитие системы водоснабжения получили в период греко-римской цивилизации (от 100 до н.э. до конца II в. н.э.), когда были заложены принципы создания централизованных систем водоснабжения. Начало создания централизованных городских систем водоснабжения относится к XII-XIII вв. Некоторые из них сохранились на территории бывшего СССР (Средняя Азия, Крым, Новгород и т.п.). Однако надо иметь в виду, что они являлись лишь прообразом современных централизованных водопроводов.

Обычным способом водоснабжения российских городов являлось получение воды из поверхностных источников, вблизи которых строились города, или из колодцев и прудов, вырытых в местах с обильными подземными водами. При изыскании водоисточников наряду с хозяйственными целями учитывалась потребность получения воды при обороне города. Первый самотечный водопровод был построен для Московского Кремля в 1492 г. Главным сооружением его служила Арсенальная (ранее Собакина) башня, где находился родник.

Первыми централизованными водопроводами, перешедшими столетний рубеж, являются промышленные водопроводы XVIII в., где впервые стали применяться специальные водозаборные и водораспределительные сооружения. Основоположниками водопроводного дела были знаменитый русский теплотехник И.И. Ползунов и один из первых гидротехников России К.Д. Фролов. Вопросами водоснабжения горного дела занимался М. В. Ломоносов.

В конце XVIII в. началось строительство Мытищинского родникового водопровода для снабжения водой г. Москвы. В дальнейшем этот водопровод несколько раз реконструировался и окончательно был построен в 1858 г. по проекту А.И. Дельвига. Во второй половине XIX в. водопроводы были построены в Санкт-Петербурге, Казани, Новочеркасске, Ярославле и других городах. К концу прошлого столетия в России уже был накоплен большой опыт не только строительства, но и эксплуатации промышленных водопроводов.

Специфика климатических условий России диктовала необходимость поиска отечественных инженерных решений, отличных от подобных решений зарубежных стран Европы. Благодаря этому вслед за водопроводами в средней полосе России появились надежные системы водоснабжения на Крайнем Севере, в Сибири и на Дальнем Востоке.

К 1917г. в России лишь четвертая часть городов имела водопроводы. Среднее водопотребление составляло в сутки 18- 24 л/чел, и лишь в Москве и Санкт-Петербурге было значительно выше. Большинство населения пользовалось водой из уличных водоразборных колонок и фонтанов. Восстановление народного хозяйства после гражданской войны и последующая индустриализация страны вызвали быстрый рост городов и поселков, а с ними и развитие водопроводного хозяйства. Мощность централизованного водоснабжения за счет расширения и нового строительства водопроводов к 1940 г. возросла более чем в 10 раз по сравнению с 1917 г. В этот период

был разработан и принят ряд важнейших нормативных документов, направленных на улучшение санитарного состояния источников, установлены требования к зонам их санитарной охраны. После Великой Отечественной войны в 1946-1960 гг. водопроводы были восстановлены и построены в 580 городах и многих поселках.

Во многих городах России первые водопроводы были построены на базе подземных источников, что обуславливалось стремлением к использованию доброкачественной воды и надежной защищенности ее от внешнего загрязнения. В ходе дальнейшего развития городов и соответствующего роста водопотребления в большинстве случаев был осуществлен переход к поверхностным источникам, чему способствовали также внедрение более совершенных технологий очистки воды.

На рубеже 60-70 гг. вновь появилась тенденция к широкому использованию подземных источников для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Это было вызвано как ухудшением качества воды в поверхностных источниках, так и расширением гидрогеологических исследований запасов подземных вод. Новым качественным результатом следует считать создание водопроводов с разнотипными источниками, более надежных как в техническом, так и санитарно-эпидемиологическом отношении.

В связи с загрязнением и истощением многих источников водоснабжения в настоящее время увеличение мощности водопроводов за счет нового строительства требует больших капитальных затрат.

# **РАЗДЕЛ 1. ИСТОЧНИКИ СНАБЖЕНИЯ ВОДОЙ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ И ОБЪЕМЫ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ**

## **Глава 1. ИСТОЧНИКИ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

### **1.1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ИСТОЧНИКАМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Оценка и прогноз мощности и качества источников водоснабжения являются ответственной задачей. Правильное ее решение гарантирует получение необходимых количеств воды в течение рассматриваемого периода эксплуатации с учетом предполагаемого роста водопотребления при соблюдении требований технологической и санитарной надежности.

Во все времена требования, предъявляемые к питьевой воде, сводились к тому, чтобы она не вредила здоровью потребителей. Требования к качеству воды, идущей на технологические нужды, чрезвычайно разнообразны. При этом происходит постоянное изменение нормативных требований, предъявляемых как к объему потребления, так и к качеству водных ресурсов. При оценке качества воды используются государственные стандарты «Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения» (ГОСТ 2761-84), «Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль качества» (ГОСТ 2874-82) и другие нормативные документы.

От качества воды в источнике во многом зависят условия эксплуатации как очистных сооружений, так и систем подачи и транспортирования воды. Качество воды должно соответствовать требованиям потребителя или достигаться промышленными методами технологии ее подготовки.

При выборе источника необходима оценка комплексного использования водных ресурсов всех видов, имеющихся в регионе. Из нескольких альтернативных предпочтение отдается тому источнику, который обеспечивает бесперебойное снабжение водой потребителей при минимальных затратах на ее очистку и транспортировку. В связи с обострением экологической обстановки, истощением и загрязнением природных вод особое значение приобретает охрана водных ресурсов. Решение этой задачи требует значительных капитальных вложений. Поэтому при выборе источника водоснабжения вопрос целесообразности их размещения является одним из важнейших в ряде задач рационального водопользования.

Из изложенного видно, что в районе предполагаемого строительства населенных пунктов и промышленных предприятий необходимо глубокое изучение водных ресурсов. Данные во времени, полученные в результате проведения физико-химических, санитарно-биологических и технологических анализов, а также знание требований потребителей к качеству воды позволяют правильно произвести выбор источника водоснабжения.

Все используемые для целей водоснабжения источники могут быть разделены на две группы: поверхностные - реки, озера, водохранилища, моря; подземные - артезианские и грунтовые воды. Трудности в обеспечении потребителей водой во многом возникают из-за неравномерности распределения как водных ресурсов по территории страны, так и самих потребителей и пользователей воды. Кроме того, существенны колебания во времени объемов водных ресурсов, пригодных для использования.

## 1.2. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСТОЧНИКОВ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

При количественной оценке водных ресурсов используют два понятия: статические (вековые) запасы и возобновляемые водные ресурсы. При современных климатических условиях вековые запасы считаются постоянными. Возобновляемые водные ресурсы изменяются во времени. В результате круговорота воды и водообмена между океаном и сушей они ежегодно восстанавливаются. Суммарный годовой сток рек определяет величину возобновляемых водных ресурсов.

При изучении и использовании водных ресурсов современная наука исходит из представления о единстве и взаимосвязи природных вод всех видов, переходящих один в другой в процессе круговорота. Ежегодно возобновляемые водные ресурсы составляют динамическую часть статических запасов.

Потребность в воде народного хозяйства в основном удовлетворяется за счет возобновляемых ресурсов поверхностных и подземных вод.

**Реки.** В СНГ среднегодовое возобновляемое водные ресурсы составляют 4740 км<sup>3</sup> в год; из них 327 км<sup>3</sup> в год формируется на территории других стран. Они формируются из поверхностных (78 %) и подземных (22 %) источников. За пределы страны оттекает около 1 % полных ресурсов.

Речная сеть по территории страны распределена неравномерно. В северной части и в горах она гуще, к югу - реже. Поверхностный сток распределен очень неравномерно. Более половины (54 %) территории охватывается бассейнами рек, текущих в моря Северного Ледовитого океана, к ним принадлежат крупнейшие реки - Онега, Северная Двина, Мезень, Печора, Обь, Енисей, Лена, Яна, Индигирка, Колыма. Они отличаются большой водоносностью и несут в окраинные моря этого океана около 63 % суммарного стока всех рек.

К Тихоокеанскому бассейну относится около 15 % территории России. Крупнейшей рекой этого бассейна является Амур. Суммарный сток рек этого бассейна 21 %.

Незначительная часть территории бывшего СССР (около 8 %) относится к бассейну Атлантического океана. Реки этого бассейна впадают в Черное, Азовское и Балтийское моря. Главные из них: Нева, Западная Двина, Неман, Днепр, Днестр, Дунай, Кубань. Доля стока рек этого бассейна равна 7 %. Обширная территория южной части страны (23 %) принадлежит к внутреннему бессточному Арало-Каспийскому бассейну. Сюда относятся бассейны рек Волги, Урала, Куры, Амударьи, Сырдарьи и других. Суммарный сток рек этого бассейна не превышает 9 %.

Суммарный сток от года к году сравнительно постоянен, но в отдельных районах и бассейнах рек колебания стока во времени значительны. В некоторых районах в маловодные годы сток может составлять 3-4 % среднегодового, а в многоводные - 300-400 %.

Речной сток формируется под влиянием всего комплекса природных условий - климата, рельефа, почвенного и растительного покрова и др. Основным фактором, влияющим на величину стока, являются атмосферные осадки.

По преобладающему источнику питания и основной фазе водного режима реки страны делятся на три группы: с весенним половодьем, обусловленным таянием снегов на равнинах и невысоких горах; с весенне-летним половодьем, формирующимся в основном за счет таяния сезонных и весенних снегов и ледников в горах; с паводковым режимом, вызванным дождевыми осадками.

Реки характеризуются изменчивостью состава воды во времени. Он зависит от ряда факторов: изменения погодных условий, неоднородности состава солей в горных породах и почвах, слагающих русла; воздействия растительности и животных организмов, наличия растворенного кислорода и т.д. Они подразделяются на три гидрохимических класса:

гидрокарбонатные. Площадь бассейнов этих рек составляет 83 % территории страны. Минерализация их воды в большинстве случаев незначительна;  
сульфатные. Они занимают около 4 % площади речного бассейна страны. Минерализация в этих реках выше минерализации карбонатных;  
хлоридные. Их площадь составляет около 7 % площади всех речных бассейнов. Вода в реках этой группы отличается высокой минерализацией.

По минерализации реки классифицируют следующим образом: малой (до 200 мг/л); средней (200-500 мг/л); повышенной - (500-1000 мг/л) и высокой - (свыше 1000 мг/л) минерализации.

Водная эрозия в речных бассейнах проявляется с различной интенсивностью. Во влажной и избыточно влажной зонах она выражена относительно слабо. К югу - в перемененно влажной (лесостепной) и особенно полусухой (полупустынной) и сухой (пустынной) зонах - процессы эрозии усиливаются. Одним из показателей интенсивности водной эрозии является среднегодовая мутность речных вод, которая изменяется от 10-25 мг/м<sup>3</sup> на севере, до 5-10 тыс. г/см<sup>3</sup> в южных районах.

В северной части реки покрыты льдом 7-8 мес., в средней полосе - 4-5 мес. Толщина льда 50-100 см и более. На северо-западе европейской части и юге Приморья ледостав продолжается 1-2 мес. В Закавказье, Крыму, в горных районах Средней Азии ледостава, как правило, не бывает.

**Озера.** По числу и разнообразию озер СНГ занимает первое место в мире. Их число превышает 2,8 млн. Озера по характеру взаимодействия с реками делятся на проточные и бессточные. Первые расположены преимущественно в гумидной и субгумидной зонах, вторые - в Ариадной, где испарение с водной поверхности превышает количество выпадающих атмосферных осадков.

Воды озер относятся к статическим запасам вследствие замедленного водообмена. Ежегодное возобновление воды в озерах весьма незначительно - 0,3 - 1,5 %. Поэтому даже незначительное понижение уровня воды и них в связи с водоотбором может приводить к необратимым экологическим изменениям. Отбор воды из них возможен при возвращении отбираемой воды в озеро в многоводные годы.

Статические запасы воды в 18 наиболее крупных озерах страны составляют 24479 км в том числе в Байкале 23000 км. Ориентировочный запас этой воды в остальных озерах не превышает 3000 км. Таким образом, суммарный статический запас пресной воды в озерах составляет 27,5 т. км<sup>3</sup>. Большинство озер (около 98 %) имеют небольшую площадь поверхности (менее 1 км<sup>2</sup>) и являются мелководными (глубина 1-1,5 м).

На гидрохимический состав озер значительное влияние оказывают их размеры, глубина, конфигурация и замедленный водообмен. Они влияют на температурную стратификацию, неоднородность химического состава по глубине, интенсивность биологических процессов, газовый состав воды, концентрацию биогенных веществ, перемешивание. Химический состав воды в озерах зависит от состава воды рек и подземных источников, их питающих. По минерализации озера принято относить к одной из следующих трех групп: пресные (не более 1 г/кг); солоноватые (1-35 г/кг); соленые (более 35 г/кг). В засушливых районах, где наблюдается повышенное испарение, озера, имеют более высокую минерализацию, чем озера, расположенные в зоне избыточного увлажнения.

**Водохранилища** аккумулируют сток половодий и паводков. Они позволяют использовать его в межень. При их помощи речной сток становится более равномерным как в течение года, так и от года к году. Водохранилища существенно увеличивают объем водных ресурсов, доступных для использования, повышают долю стока для обеспечения потребностей в воде народного хозяйства, в том числе и водоснабжения. Полезный объем водохранилищ в СНГ составляет 550 км<sup>3</sup>, что позволяет регулировать около 12 % речного стока.

Благодаря использованию водохранилищ имеется возможность решения ряда народнохозяйственных задач: повышение надежности водоснабжения, снижение концентрации загрязняющих веществ в реках в результате разбавления стока, создание условий для гидроэнергетического строительства, борьба с паводками, улучшение условий судоходства, рыбозаведения, рекреации и др.

Водоохранилища, создаваемые в бассейне рек, увеличивают объем статических запасов вод в руслах, но уменьшают интенсивность водообмена в речных системах. Это отрицательно сказывается на состоянии качества воды. Их создание связано со значительными потерями земельных ресурсов из-за затопления земель. Они могут оказывать негативное влияние на гидрологический режим в верхнем и нижнем бьефах гидроузла, на водные и наземные экосистемы, хозяйственные объекты, а также социальные условия жизни людей.

Гидрохимический режим водохранилищ устанавливается через некоторое время после их заполнения, когда произойдет разложение растительности, загрязнений и т.п., оставленных на месте их устройства. Вода в них обогащена минеральными и органическими веществами, ухудшающими ее физические свойства, а также их санитарное состояние и кислородный режим. В водохранилищах развиваются планктон и высшая водная растительность, повышается температура воды на поверхности, увеличивается испарение влаги с поверхности, возникает температурная стратификация, уменьшается количество взвешенных веществ в воде. Изменение химического состава в них происходит в более узких пределах, чем в реках.

**Моря** при отсутствии пресных вод могут служить источником водоснабжения для целей питьевого и промышленного водоснабжения. На водный, термический, ледовый и гидрохимический режимы на материковой отмели морей воздействует сток крупных рек северной части европейской территории и особенно рек Сибири.

К особенностям морской воды следует отнести: значительную минерализацию, однородность и постоянство химического состава. Минерализация морской воды в среднем составляет 32-35 г/кг. Роль **подземных вод** в общем балансе водопотребления как в нашей стране, так и за рубежом постоянно возрастает. Возможность рационального отбора подземных вод зависит не только от количества воды, находящейся в водоносных горизонтах, но и от фильтрующих свойств водовмещающих пород. Количественные категории подземных вод определяются рядом показателей, среди которых наиболее значимыми являются:

естественные запасы (статические и вековые запасы) - объем гравитационной, воды, заключенной в порах и трещинах водовмещающих пород;

естественные ресурсы (динамические запасы) - величина питания водоносного горизонта в гидрогеологических условиях, не нарушенных эксплуатацией подземных вод;

эксплуатационные запасы или эксплуатационные ресурсы - количество подземных вод, которое может быть получено рациональными в технико-экономическом отношении способами без ухудшения качества воды в течение всего расчетного срока водопотребления.

Региональная оценка потенциальных эксплуатационных ресурсов подземных пресных и слабосоленоватых (с минерализацией 1-3 г/л в районах с дефицитом пресных ресурсов) вод проведена только для хорошо изученной части страны, составляющей около 54 % общей ее площади. Их величина составляет примерно 330 км<sup>3</sup>/год, распределены они неравномерно.

Общий отбор подземных вод равен 45-48 км<sup>3</sup>/год, из которых около 30 км<sup>3</sup>/год идет на цели водоснабжения. На подземных водах основано хозяйственно-питьевое водоснабжение большинства городов в центральных районах европейской части России, на Украине, в Беларуси, республиках Прибалтики, Армении, Грузии, Таджикистане, Узбекистане и южном Казахстане.

Химический состав подземных вод отличается разнообразием. Он определяется в основном условиями их формирования, которые зависят от взаимодействия с атмосферой и земной поверхностью. Слабое протекание биологических процессов, отсутствие света и свободного растворенного кислорода препятствуют развитию растительности и жизнедеятельности водных организмов в подземных водах. Но одновременно с этим создаются благоприятные условия развития анаэробных процессов. Это определяет огромное разнообразие химического состава подземных вод. При изучении гидрохимических свойств подземных вод принята следующая классификация их по глубине залегания:

воды зоны активного водообмена (верхней зоны). Эти воды подвержены воздействию фильтрующихся поверхностных вод и кислорода;

воды зоны затрудненного водообмена (средней зоны). Эти воды имеют слабое взаимодействие с поверхностью;

воды зоны относительно застойного водообмена (нижней зоны). Эти воды полностью изолированы от поверхностного влияния.

Для целей водоснабжения используются воды верхней и средней зон. Химический состав вод верхней зоны зависит от климатических условий, атмосферной среды, фильтрации атмосферных и речных вод, наличия водоупорной кровли, характера грунтов. Минерализация этих вод определяется количеством выпадающих осадков и температурой воздуха.

К подземным водам средней зоны относятся артезианские и межпластовые воды. Они защищены от бактериального загрязнения и наиболее широко используются для целей водоснабжения. Степень минерализации этих вод и особенность их химического состава в основном зависят от количества и качества состава солей, находящихся в водоносных породах. Все воды этой зоны содержат весьма малые концентрации органических веществ.

Воды нижней зоны, как правило, имеют высокую минерализацию сложного химического состава. Они для целей водоснабжения не используются.

### **1.3. ВЛИЯНИЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА НА СОСТОЯНИЕ ПРИРОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Рост численности населения в городах, повышение комфортности жилищ, урбанизация жизни людей приводят к увеличению потребления воды из источников водоснабжения. Одновременно это приводит к росту сбрасываемых в водоемы отработавших загрязненных вод. До тех пор, пока эти загрязнения не превышают возможность источников к самоочищению, нарушения экологического равновесия не происходит. По мере их роста нарушение экологического равновесия возрастает и достигает пределов, когда очищение воды в естественных природных условиях становится невозможным, при этом вода становится непригодной для целей водоснабжения.

Загрязнение водоемов происходит и через атмосферу. Газообразные выбросы производства, содержащие азот, окись углерода, двуокись серы, пыль, золу и др., переносятся по воздуху и, растворяясь в атмосферной влаге, выпадают на поверхности земли и водоемов в виде “кислотных дождей”. От них страдают очень многие страны мира, в которых отравлены многие поверхностные источники.

Пагубное влияние на источники водоснабжения оказывают сбросы промышленных производств. Поэтому проблемы охраны природных вод наиболее остро стоят в промышленно развитых странах. Среди отраслей промышленности, дающих наибольшие загрязнения водоемов, следует назвать нефтеперерабатывающую, химическую, целлюлозно-бумажную, текстильную, металлургическую.

Сточные воды, содержащие нефтепродукты, в большинстве случаев отрицательно влияют на качество воды. Содержание нефти с концентрацией всего 0,2-0,4 мг/л придает воде запах, не исчезающий после хлорирования. Содержание фенолов в стоках химических производств нарушает биологические процессы в воде. Синтетические поверхностно-активные вещества (ПАВ) вызывают ухудшение биохимической очистительной способности водоемов. Они приводят к прекращению роста водной растительности, к усилению привкуса, запаха и т.п. Выпускается огромное число химических соединений, многие из которых накапливаются в воде и преобразуются в еще более токсичные продукты. Сточные воды электрохимических производств, рудообогатительных фабрик, а также шахтные и рудничные воды содержат значительное количество цинка и меди.

Помимо “традиционных” загрязнителей водоемов в последние десятилетия появились новые. Развитие сельского хозяйства и промышленности, а также задачи здравоохранения потребовали разработки и производства специальных препаратов - пестицидов для защиты растений, животных, человека и промышленных сооружений от организмов вредителей. Пестициды широко используются в сельском и лесном хозяйстве для регулирования роста растений и защиты их от различных вредителей и болезней, удаления сорной растительности, сохранения запаса зерна, защиты животных, уничтожения переносчиков инфекционных заболеваний человека и животных, а также в ряде отраслей промышленности для борьбы с вредными организмами, нарушающими течение технологических процессов. Ассортимент их достаточно велик - хлорорганические, фосфорорганические и другие соединения. Наиболее распространенными группами пестицидов являются гербициды, инсектициды и фунгициды. В мировом земледелии наблюдается непрерывный рост использования пестицидов. В результате циркуляции в окружающей среде они присутствуют в атмосфере, почве, растениях и воде.

Загрязнение поверхностных водоемов пестицидами происходит несколькими путями. Они могут попадать в воду при смыве с почвенного покрова и растений, при сносе волны препарата в процессе аэрообработки, при неправильной технологии опрыскивания и опыления, за счет поступления загрязненных ими грунтовых вод в районах орошаемого земледелия, при попадании воды, фильтрующейся из оросительной системы и, наконец, в результате вымывания пестицидов из почвы.

Пестициды могут попадать в воду целенаправленно - для уничтожения сорной растительности и насекомых, а также со сточными водами производящих или использующих их предприятий (тепличные хозяйства). Относительно небольшие по объему сточные воды, содержащие пестициды разных классов, образуются на складах и базах.

Отмечено загрязнение пестицидами морей, а также рек и водоемов во многих странах: США, Великобритании, ФРГ, Польше и др. Обследование нескольких десятков рек СНГ показало присутствие их в воде. Они наблюдаются в водах рек Сахалина и Камчатки, где практически не используются, что подтверждает глобальный характер их распространения.

Большая часть используемых в практике пестицидов оказывает отрицательное влияние на водоем, органолептические качества воды и живые организмы. Пестициды могут сообщать воде запах земли, плесени, хлора, лука, гнилой капусты и т.п. Они ухудшают цвет воды и придают ей неприятный вкус.

Систематическое поступление в организм человека пестицидов может привести к развитию хронической интоксикации, способствовать возникновению и протеканию патологических состояний. Источником поступления пестицидов в организм человека может оказаться не только вода, но и потребляемые им продукты питания, загрязненные мигрирующими по трофическим цепям пестицидами.

Сельское хозяйство является также основным источником загрязнения водных ресурсов биогенными веществами. Они способствуют быстрому развитию фитопланктона (“цветение” вод), вызывают прогрессирующую эвтрофикацию (содержание в воде питательных веществ) водных объектов, приводят к нарушению процессов самоочищения.

Поступающий в почву с удобрениями азот превращается в легкорастворимые нитратные формы, обладающие большой подвижностью. Это способствует загрязнению грунтовых подземных вод и делает их непригодными для целей водоснабжения. Орошаемое земледелие при существующей технологии дает большие возвратные стоки, которые загрязнены удобрениями и пестицидами, а также сильно минерализованы.

Существенным источником загрязнений водоемов стали многочисленные крупные животноводческие фермы. Отходы животноводческих хозяйств содержат яйца гельминтов и патогенные микроорганизмы, являющиеся источником заболеваний. Особо опасны свиноводческие комплексы. Ферма на 100 тыс. голов по результатам загрязнений равносильна городу с населением около 250 тыс. человек.

Другим опасным источником загрязнения окружающей среды является радиоактивное заражение. Данные, полученные при изучении биологического действия радиоактивных веществ, подтверждают их высокую канцерогенность. Их воздействие приводит к возникновению лейкозов, рака легких, трахеи, молочных желез, желудка и др. Радиоактивные отходы образуются не только в результате эксплуатации

АЭС или другой деятельности, связанной с топливным ядерным циклом, но и при использовании радионуклидов (в науке, промышленности, медицине, сельском хозяйстве). Отходы от этих производств по физическому состоянию делятся на горючие и негорючие в жидком и твердом состоянии.

В первые годы применения ядерной технологии обращение с радиоактивными отходами рассматривались как проблема второстепенной важности, а проблема охраны окружающей среды от вредного их влияния не находила должного решения. Некоторые страны сбрасывали отходы в море. Усиливающееся внимание к радиологическим аспектам использования ядерной энергии потребовало решения практических аспектов обезвреживания этих отходов.

Основными путями поступления радионуклидов в экосистему являются водный транспорт и осаждение аэрозолей. Открытые водоемы принимают на свою поверхность не только радиоактивные выпадения непосредственно из атмосферы, но и попавшие на поверхность почвы в бассейне питания радионуклиды, поступающие с ливневыми и тальными водами, а также загрязненные подземные воды из района питания водоемов. Концентрация радиоактивных веществ в месте забора воды не должна превышать допустимой концентрации для питьевой воды. Причинами заражения в большинстве случаев являются аварии. Последние возникают вследствие нарушения технологического режима работы установок, использующих ядерное горючее, технологии режима по переработке отходов, герметичности трубопроводов, арматуры, агрегатов, установок с радиоактивными веществами, нарушений вентиляции и т.п. Степень опасности при радиационных авариях зависит от вида радиоактивных отходов; вида и энергии излучения радионуклидов, активности и объема радиоактивного вещества на месте аварии; радионуклидного состава выбросов; площади очага радиоактивного загрязнения; числа людей в зоне очага.

Широко распространено загрязнение поверхностных источников (водохранилищ) продуктами распада сине-зеленых водорослей. Особенно большой ущерб эти загрязнения приносят системам коммунального и производственного водоснабжения, а также рыбного хозяйства. Он связан с увеличением расходования коагулянта, расширением площадей отстойников, затратами электроэнергии на микрофилтры и т.д. На тепловых электростанциях эти загрязнения снижают эффект охлаждения, приводят к перерасходу

топлива и т.п. Кроме этого, ухудшаются условия использования водных ресурсов для рекреации, лечения, спорта и туризма.

С развитием теплоэнергетики появилось “тепловое” загрязнение водоемов, которое вызвано сбросом отработавших подогретых вод. В результате повышения температуры воды усиливается ее испарение и повышается минерализация. Подогрев воды приводит к быстрому развитию водной растительности, и, следовательно, к накоплению органических веществ. При их разложении уменьшается содержание растворенного кислорода, что отрицательно сказывается на жизнедеятельности водоема.

Немалый вред источникам водоснабжения наносит молевой сплав леса. Затонувшая древесина, выделяющиеся из нее смола, дубильные вещества, вредные фенолы и другие вещества, отравляют воды.

Развитие водного транспорта привело к дополнительному загрязнению рек, озер и морей вследствие сброса в них недостаточно очищенных отходов. Особенно большое количество загрязнений поступает от нефтеналивных судов в результате аварий. При разливе 1 т нефти образуется пленка площадью 10-12 км<sup>2</sup>, затрудняющая поступление в воду кислорода.

Самым древним видом загрязнений водоемов являются бытовые сточные воды. Загрязнение подземных вод в значительной степени обусловлено загрязнением окружающей среды в целом. Накопление загрязняющих веществ в слое земли делает его вторичным источником загрязнения. Загрязняющие воздействия атмосферы на подземные воды связано с инфильтрацией загрязненных дождевых осадков и тающего снега. Загрязнение подземных вод может быть следствием загрязнения поверхностных вод. Особенно это характерно для речных долин при эксплуатации водоносных горизонтов аллювиальных отложений. Загрязненные речные воды протекают в водоносный горизонт вследствие боковой фильтрации со стороны берега и вертикальной фильтрации с поверхности земли при затоплении поймы и низких террас в паводковый период. Источником загрязнения могут быть вторгающиеся в водоносные горизонты воды морей и соленых озер, а также минерализованные воды гидравлически связанных горизонтов.

Помимо загрязнителей на состояние источников водоснабжения влияет деятельность человека, связанная с отбором воды. Интенсивная эксплуатация подземных вод приводит к изменению гидрогеологических условий: формированию депрессионных воронок в эксплуатируемых и смежных водоносных горизонтах, изменению направления движения потоков подземных вод, превращению области разгрузки в область питания. Отбор подземных вод вызывает также изменение и в других элементах природной среды: изменение поверхностного стока, осушение болот и озер, исчезновение родников, оседание земной поверхности, гибель растительности. Эти факторы нужно учитывать при планировании рационального использования подземных вод. Показателем истощения является непрерывное снижение уровня подземных вод, что приводит к уменьшению естественных запасов.

Основными факторами хозяйственной деятельности, оказывающими наибольшее влияние на количественные показатели речного стока, являются коммунальное и промышленное водоснабжение, орошение и обводнение, сезонное и многолетнее регулирование. На условия формирования стока влияют агротехнические мероприятия, мелиорация земель, вырубка леса, урбанизация и др.

Изменения климатических условий в глобальном и региональном масштабе в результате загрязнения атмосферы и изменения влагооборота вследствие дополнительного испарения, обусловленного проведением крупномасштабных водохозяйственных мероприятий, могут также повлиять на состояние речного стока.

Основными источниками загрязнения Мирового океана являются: морские перевозки, вынос примесей с речным стоком, поступление примесей с атмосферными осадками.

#### **1.4. ОХРАНА ПРИРОДНЫХ ВОД ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ, ЗАСОРЕНИЯ И ИСТОЩЕНИЯ. ЛИКВИДАЦИЯ ИХ ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Охрана водных объектов представляет собой комплекс мероприятий по сохранению количества, качества и режима вод в установленных пределах. Они обеспечиваются законодательными, технологическими, санитарными, экономическими и другими мерами. Указанные меры предусматривают мероприятия по предотвращению или снижению попадания загрязняющих веществ в водные объекты, а также рациональное использование их ассимилирующей способности (регулирования качества воды в источнике). Водоохранные мероприятия будут тем надежнее и эффективнее, чем на более ранней стадии водохозяйственной деятельности они будут осуществлены. Ассимилирующая способность (имеющая размерность массового расхода) зависит от разбавляющей и самоочищающей способности водоема. Она непрерывно изменяется в пространстве и времени, как и сброс в источник нормированных веществ.

Для соблюдения действующих норм качества воды в местах водопользования необходимо синхронизировать сброс отработавших вод в источник с его ассимилирующей способностью. Эта задача решается на нескольких временных уровнях. Верхний уровень - долгосрочный водоохранный прогноз на 10; 15 лет и более; средний - перспективное планирование на 5 лет; нижний - годовое планирование водоохраных мероприятий. В разрезе годового планирования могут быть поставлены задачи управления качеством воды в реальном времени с разбивкой на такие интервалы, как сезон, месяц, недели, сутки.

Мероприятиям профилактического характера принадлежит ведущая роль в охране вод. Своевременно предупредив образование веществ, способных вызывать загрязнение воды, или предотвратив неблагоприятные условия в водоеме, которые могут возникнуть в результате гидротехнического строительства, в ряде случаев можно достичь большего эффекта, чем последующей очисткой сточных вод или борьбой с "цветением" воды синезелеными водорослями.

Для предотвращения попадания в воду загрязняющих веществ сверх допустимого уровня предусматривается комплекс мер. Промышленные предприятия должны размещаться с учетом лучшего использования ассимилирующей способности источника; производства с большим количеством загрязняющих отходов заменяют на производства с более низким содержанием примесей в отработавших водах. Выбирают сырье, снижающее содержание примесей в сточных водах, совершенствуют технологические процессы, приводящие к прекращению образования или уменьшению вредных примесей в стоках. Создают "чистые" конечные продукты, составляющие распада которых при попадании в водоем безопасны для обитателей и человека. Одной из эффективных мер является снижение потребления свежей воды, т.е. рациональное ее использование. С этой целью прямоточные системы водоснабжения заменяют оборотными, создают замкнутые системы водного хозяйства, переходят на безводные и маловодные технологические процессы, применяют воздушное охлаждение и др.

Контроль за промышленными выбросами производится с помощью различных показателей, в том числе ПДК, ВДК, ПДС и др. Предельно допустимая концентрация (ПДК) - это концентрация химического вещества в воде водоема, которая не должна оказывать прямого или косвенного влияния на организм человека в течение всей его жизни и на здоровье последующих поколений, а также ухудшать гигиенические условия водопользования.

Временная допустимая концентрация (ВДК) определяет ориентировочный безопасный уровень воздействия химических веществ в воде, устанавливаемый расчетным путем.

Обеспечение регламентируемых значений ПДК и ВДК может быть достигнуто двумя путями - механическим рассеиванием химических веществ в водной среде или строгим контролем за их поступлением во внешнюю среду. Рассеивание химических

веществ достигается разбавлением стоков в поверхностных водах. Во многом этот способ является следствием несовершенства технологий и способов очистки сбрасываемых вод и должен быть заменен ограничением и полным прекращением сбросов загрязненных вод в водоемы.

Строгое соблюдение предельно допустимого выброса, устанавливаемого для каждого предприятия, обеспечивает выполнение санитарных нормативов и на сегодняшний день является одним из действенных средств охраны воды, воздуха и почв. Однако соблюдение нормативных предельно допустимых выбросов не всегда можно считать оптимумом. ПДК для многих соединений неоднократно пересматривались в сторону их уменьшения. Известно также, что многие живые организмы и растения чувствительнее людей к загрязнениям. Регламентирование химических веществ в окружающей среде (и в воде в частности) должно производиться не только с санитарно-гигиенических, но и с экологических позиций, что приведет к дальнейшему ужесточению нормируемых величин.

Все нормируемые значения допустимых концентраций веществ рассматриваются и утверждаются Минздравом России.

В целях максимальной защиты населения от облучения и охраны водных ресурсов от радиоактивного загрязнения для действующих и проектируемых предприятий рассчитывают предельно допустимые сбросы (ПДС). ПДС радионуклидов рассчитывают на основании требований не превышения предела дозы внутреннего и внешнего облучения, установленного нормами радиационной безопасности и основными санитарными правилами. Контроль за соблюдением установленных нормативов предельно допустимого сброса радиоактивных веществ входит в единую систему радиационного контроля, базирующегося на мониторинге окружающей среды, т.е. системе слежения и контроля за ее состоянием. Единая система радиационного контроля за состоянием водоемов заключается в получении регулярной информации, которая позволяет систематически сопоставлять фактическое наличие радионуклидов с установленными нормативами. Этот контроль должен предусматривать определение объема сточных вод, поступающих от предприятий, их объемную активность.

В системах водного хозяйства промышленных предприятий, имеющих специальные стоки, существуют три независимые программы контроля: оперативный контроль суммарной активности стока перед сбросом; контроль содержания отдельных радионуклидов для определения радиоактивных веществ, поступающих в водоем за определенный период; контроль за водоемами, принимающими очищенные воды, для определения суммарного накопления в объектах окружающей среды. Очищенные воды после контроля содержания в них радионуклидов используют в оборотном водоснабжении или сбрасывают.

Основными направлениями в охране окружающей среды от действия радиоактивных веществ, используемых промышленностью, являются переработка и захоронение отходов. При этом стремятся к максимальному уменьшению отходов с целью облегчения последующего с ними обращения и уменьшения пространства, необходимого для их окончательного захоронения. Для этих целей при очистке радиоактивных стоков используют методы упаривания, ионного обмена, химического осаждения, а также электродиализ с применением ионообменных мембран. Для обработки твердых отходов применяют прессование и сжигание.

Наиболее важным и наименее освоенным в настоящее время этапом обращения с отходами является их окончательное захоронение. Отсутствуют общепризнанные рекомендации по их захоронению, а также единство взглядов в оценке безопасности биосферы. В настоящее время большинство государств захоранивают радиоактивные отходы в хранилищах, расположенных на поверхности земли или в приповерхностных геологических образованиях и оборудованных соответствующими инженерными барьерами. При этом большинство отходов переводят в твердую фазу.

Общей мерой по предотвращению попадания удобрений и пестицидов в открытые водоемы является создание прибрежных водоохраных зон. Они предусматривают проведение лесной и гидротехнической мелиорации, а также агротехнических мероприятий. Лесная мелиорация заключается в создании защитных полос, уменьшающих поверхностный сток и ослабляющих процессы водной эрозии. Агротехнические мероприятия предполагают правильное ведение сельскохозяйственных работ (вспашка полей, изъятие из севооборота склонов и т.д.).

Для возможности использования вод, содержащих пестициды, для целей водоснабжения требуется применение специальных методов очистки. Эксплуатирующиеся в данное время системы подготовки воды для хозяйственно-питьевых целей, по существу, лишены методов, препятствующих проникновению пестицидов в очищенную воду. Оптимальным решением технологии обезвреживания пестицидов в природных и сточных водах является создание гибкой схемы, учитывающей их химическую природу<sup>7</sup>. В качестве основы создания универсальной технологии обезвреживания пестицидов могут служить методы гидролиза, сорбции и окисления.

Гидротехническая мелиорация заключается в поддержании благоприятного водно-воздушного режима почвенных грунтов, препятствующего вымыванию питательных веществ, в применении научнообоснованных норм и технологий орошения и т.д.

В процессе забора больших количеств воды и нарушения экологического равновесия наблюдается истощение водных ресурсов. Вырубка лесов, осушение болот, спрямление русел, распашка прибрежных склонов, водная и ветровая эрозия почв и т.п. приводят к истощению водоисточников.

Одним из важных мероприятий в борьбе с истощением является лесомелиорация. Она находит все более широкое применение. Основная роль лесных насаждений заключается в переводе поверхностного стока в подземный, в результате чего повышается уровень грунтовых вод и обеспечивается стабильное питание водных источников. Помимо этого лесопосадки уменьшают эрозию берегов и смыв его в водоемы. Леса по берегам водохранилищ и озер ослабляют скорость ветра и тем самым снижают высоту и ударную силу воли. Они уменьшают до 20-30 % испарение в зоне посадки.

С целью поддержания нормального водного режима необходима охрана верховых болот, являющихся источником питания многих рек и регулятором весеннего стока. Немаловажную роль играют гидротехнические мероприятия, направленные на удержание поверхностного стока и перевод его в подземный.

Разработан ряд постановлений об усилении охраны рек от загрязнения, засорения и истощения. При этом устанавливаются водоохраные зоны лесов, а также согласовываются вопросы размещения и строительства предприятий, сооружений и других объектов, влияющих на состояние вод, со схемами комплексного использования и охраны вод.

Для крупных ТЭС и АЭС возникает проблема рационального использования теплоты. В качестве мер в этом направлении заслуживает внимания отопительное орошение сельскохозяйственных культур в открытом грунте, использование таких вод в теплицах, для отопления в городах, разведения рыб в водохранилищах-охладителях и др.

В результате профилактических мер, предупреждающих образование веществ, способных загрязнять воду, и очистки сточных вод предотвращается вынос в источники водоснабжения основной массы примесей. Однако остающиеся в сбрасываемых водах вещества представляют собой по поддающиеся очистке или трудноокисляемые соединения, которые могут приводить к загрязнению природных вод. Кроме того, вода в источниках может загрязняться в результате аварии на очистных сооружениях промышленных предприятий городов, вследствие утечек вредных веществ и других причин. Методы и технические средства, восстанавливающие и поддерживающие на заданном уровне качество воды, направлены на повышение ассимилирующей способности природных вод, на снижение пиковых концентраций примесей и на

извлечение из воды загрязняющих веществ. Искусственная аэрация водотоков и водоемов повышает их ассимилирующую способность. Использование санитарных попусков для улучшения качества воды приобретает все большее значение как водоохранное мероприятие. Засорение и загрязнение водных объектов плавающими примесями ликвидируют соответствующими мусоросборщиками. Для удаления накопившихся донных отложений на зарегулированных реках периодически организуют гидравлическую промывку русел попусками, а на незарегулированных - искусственное взмучивание донных отложений в период паводков и половодий.

Мероприятия по охране подземных вод от загрязнения по своему назначению могут быть профилактическими и специальными (локализационного и реставрационного характера). Профилактические мероприятия представляют в основном тот же комплекс мер, что и для поверхностных вод. В промышленных районах для предотвращения инфильтрации сточных вод в водоносные горизонты необходимо предусматривать надежную гидроизоляцию, дренажи, противофильтрационную защиту в местах прокладки промышленной канализации, установки резервуаров со сточными водами. Для предотвращения вторжения морских вод в подземные можно использовать метод создания гидравлических завес путем закачки через скважины в эксплуатируемый водоносный горизонт пресных поверхностных вод.

Специальные мероприятия локализационного характера предусматривают в районах действующих источников загрязнения или ликвидированных, но при оставшемся очаге загрязнения, который может явиться вторичным источником загрязнения. Цель мероприятий - прекращение поступления загрязняющих примесей к защищаемому объекту (водозабору или водотоку). Для этой цели применяют различного рода вертикальные и горизонтальные дренажи, а также противофильтрационные завесы. При устройстве перехватывающих дренажей должен быть решен вопрос использования или безопасного сброса откачиваемых загрязненных вод. Завесы устраивают либо нагнетанием через скважины растворов, придающих породе водонепроницаемость, либо устройством в водоносном горизонте на всю его мощность узкой траншеи и заполнения ее водонепроницаемым материалом ("стена в грунте\*):

Специальные мероприятия реставрационного характера направлены на восстановление качества подземных вод и проводятся как в условиях действующего, так и ликвидированного источника загрязнения. В первом случае прежде всего решают задачу изоляции источника загрязнения устройством по его периметру противофильтрационной завесы либо перехватывающего дренажа. Восстановление качества воды в пределах очага загрязнения осуществляется действием водозаборов, а также нагнетательных скважин, подающих чистую воду в пласт для быстрого промывания пород. При ликвидированном источнике загрязнения действуют аналогичным способом, но без его изоляции.

С целью обеспечения требуемого качества воды в прибрежных зонах морей осуществляют различные организационно-технические мероприятия. К водоохраным мероприятиям, препятствующим попаданию поверхностного стока в море, относятся благоустройство пляжей и прибрежных мест отдыха, организация отвода поверхностных стоков за границы водопользования и др. Для исключения сброса сточных вод и отходов с судов должны предусматривать их сбор и транспортировку на берег для последующей утилизации и обезвреживания. Для очистки акватории моря от попавшей нефти существуют специальные механизмы, обеспечивающие их сбор и последующую утилизацию.

Очищенные сточные воды сбрасывают в море через глубоководные выпуски различных конструкций. С их помощью осуществляют смешение сточных вод с морской водой. В результате этого снижается концентрация вредных веществ и достигается их распад в результате естественных биохимических процессов самоочищения. Показатели необходимой степени очистки, обезвреживания и обеззараживания сточных вод,

сбрасываемых в море, характеристики других водоохранных мероприятий можно определять по заданному допустимому предельному сбросу (ПДС).

Вредное воздействие вод проявляется в результате наводнений, селей и дейчишей, волновых воздействий на берега морей и водохранилищ. В стране ежегодно затопливается 35-55 тыс. км<sup>2</sup>, а ущерб составляет сотни миллионов рублей. Защиту от наводнений проводят, осуществляя комплекс мероприятий, сочетающих активные (регулирование стока) и пассивные (обвалование, дноуглубление и др.) методы.

Противоселевые мероприятия можно разделить на две группы: 1) по предотвращению формирований селей; 2) по борьбе с уже сформировавшимся селевым потоком. К первой группе относятся агролесомелиоративные меры, строительство водоотводных и водосбросных каналов, устройство запруд, террасирование склонов; ко второй - противоселевые ловушки, селеудерживающие плотины, обводные лотки и каналы.

Дейчиш - вид вредного воздействия вод, связанный с катастрофическим разрушением берегов реками блуждающего типа (Амударья, например). Наиболее радикальный способ защиты берегов от дейчиша - русловыпрямительные работы.

В результате волновых действий разрушаются берега морей и водохранилищ. Борьба с этими разрушениями осуществляется путем строительства искусственных берегоукрепительных сооружений, ограничения некоторых видов работ (изъятие песка, гальки из береговой зоны и др.).

### **1.5. ЗОНЫ САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ИСТОЧНИКОВ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И СООРУЖЕНИЙ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

В целях обеспечения санитарно-эпидемиологической надежности проектируемых и реконструируемых водопроводов хозяйственно-питьевого водоснабжения в местах расположения водозаборных сооружений и окружающих их территорий устраивают зоны санитарной охраны (ЗСО). Порядок проектирования и эксплуатации зон санитарной охраны источников водоснабжения определяется постановлениями государственных органов. Постановление ЦИК и СНК "О санитарной охране водопроводов и источников водоснабжения" от 17 мая 1937 г. конкретизировано применительно к современным условиям в "Положении о порядке проектирования и эксплуатации зон санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов хозяйственно-питьевого назначения", которое утверждено Главным государственным санитарным врачом в 1982 г.

Основные требования к проектированию зон санитарной охраны определяются также СНиП 2.04.02-84. Зона санитарной охраны источника водоснабжения в месте забора воды состоит из трех поясов: первого - строгого режима, второго и третьего - режимов ограничения. Проект укаченных зон разрабатывается на основе данных санитарно-топографического обследования территорий, а также гидрогеологических, гидрологических, инженерно-геологических и топографических материалов. Им определяются границы поясов зон, перечень мероприятий по их организации и санитарный режим в них. Он согласовывается с органами и учреждениями санитарно-эпидемиологической службы, органами по регулированию использования и охраны вод, заинтересованными министерствами и местными органами власти.

Границы первого пояса зоны санитарной охраны поверхностного источника ограничивают источник в месте забора воды и площадку, занимаемую водозаборами, насосными станциями, очистными сооружениями и резервуарами чистой воды. Граница первого пояса устанавливается в целях устранения возможности случайного или умышленного загрязнения воды в нем. Он охватывает акваторию рек и подводящих каналов не менее чем на 200 м от водозабора вверх по течению и 100 м вниз по течению. По прилегающему берегу граница пояса проходит на расстоянии не менее чем 100 м от линии уреза воды при максимальном уровне. При ширине реки и канала до 100 м в

первый пояс зоны входит часть противоположного берега (по отношению к водозабору) шириной 50 м от уреза воды, при большей ширине - акватория шириной не менее 100 м.

Зона санитарной охраны первого пояса для водохранилищ и озер охватывается границей, проходящей на расстоянии 100 м от водозабора по акватории источника во всех направлениях, а по прилегающему к водозабору берегу - на расстоянии не менее 100 м от уреза воды. Если водозабор ковшового типа, то в границы входит вся площадь ковша и территория вокруг него полосой не менее 100 м.

Для подземных источников граница проходит в радиусе 30 м от водозабора, если источник надежно защищен; при отсутствии гарантии надежной защиты граница пояса проходит в радиусе 50 м. Для инфильтрационных водозаборов в эти границы включается прибрежная территория между водозабором и поверхностным источником, если расстояние между ними менее 150 м. Для подрусовых водозаборов границы первого пояса назначаются так же, как для поверхностных источников. Территория первого пояса должна быть спланирована, озеленена и огорожена, а на акватории поверхностных источников поставлены предупредительные знаки. В этих границах запрещены все виды строительства, не связанные с основным производством, проживание людей, купание, водопой и выпас скота, ловля рыбы, стирка белья, применение удобрений и ядохимикатов, рубка леса.

Второй пояс санитарной зоны охватывает территорию по обеим сторонам реки на расстоянии 500-1000 м от уреза воды. Боковые границы зависят от рельефа местности. Граница второго пояса вниз по течению реки принимается на расстоянии не менее 250 м от места водозабора. Вверх по течению реки ее назначают исходя из пробега воды от нее до водозабора в течение 3-5 сут в зависимости от климатических условий при среднемесечном расходе воды 95 %-ной обеспеченности. На судоходных реках и каналах в границы второго пояса включают акваторию, прилегающую к водозабору в пределах фарватера.

Для водоемов граница второго пояса назначается в радиусе 3 - 5 км по всей их акватории, что зависит от наличия ветров. Боковая граница назначается так же, как и на реках.

Границы второго пояса зоны санитарной охраны подземного источника устанавливаются для защиты водоносного горизонта от микробных загрязнений. Основным параметром, определяющим расстояние от водозабора до границы, является время передвижения микробного загрязнения с потоком подземных вод к водозабору. Оно должно быть достаточным для гибели микроорганизмов. Границу определяют гидродинамическими расчетами, исходя из условия, что если микробы попадают в водоносный горизонт за ее пределами, то они не достигнут водозабора. Расчетное время для обоснования границ второго пояса принимается в пределах 100-400 сут, что зависит от вида подземных вод (напорные, безнапорные), наличия гидравлических связей этих вод с открытым водоемом и климатических условий.

На территории второго пояса зоны санитарной охраны разрешается отводить земли для строительства и благоустройства населенных пунктов, промышленных и сельскохозяйственных объектов, оздоровительных учреждений. При этом они должны быть оборудованы системой водоснабжения и канализации, отвода загрязненных поверхностных вод и т.д. Одновременно с этим во втором поясе запрещается загрязнение территории, размещение складов горюче-смазочных материалов, ядохимикатов, удобрений, накопителей и других объектов, которые могут привести к химическому загрязнению водоемов. Также не допускается устройство полей фильтрации, орошение сельхозугодий и т.п., что может вызвать микробное загрязнение источников водоснабжения. На территории второго пояса подземных источников, кроме того, необходимо проводить тампонаж бездействующих, дефектных и неправильно эксплуатируемых скважин и колодцев. Запрещается закачка отработавших вод в подземные пласты, подземное складирование твердых отходов и разработка недр земли.

Границы третьего пояса зоны поверхностного источника водоснабжения должны быть вверх и вниз по течению реки или во все стороны по акватории водоема такими же, как для второго пояса, а боковые границы проходят по водоразделу, но не более 3- 5 км от водотока или водоема.

Третий пояс зоны санитарной охраны служит для защиты подземных вод от химических загрязнений. Его границы также определяются гидродинамическими расчетами, исходя из условия, что если за ее пределами в водоносный горизонт попадут химические загрязнения, то они или не достигнут водозабора, либо достигнут не ранее расчетного времени. Это время должно быть больше проектного срока эксплуатации водозабора (25-30 лет).

На территории третьего пояса зоны поверхностного источника водоснабжения предусматривают санитарные мероприятия, проводимые во втором поясе. Однако в отличие от второго на территории третьего пояса допускаются лесозаготовительные работы. На каналах и водохранилищах в границах третьего пояса должны проводиться работы по очистке дна от отложений и растительности. В этом случае при использовании химических методов борьбы допускается применение тех препаратов, которые разрешены органами санитарно-эпидемиологической службы.

Санитарные мероприятия в рассматриваемом поясе подземных источников в основном совпадают с мероприятиями для поверхностных источников.

Гидрогеологические расчеты для обоснования зон санитарной охраны подземных вод проводят по методике, соответствующей способам оценки мощности водозаборов в конкретных природных условиях. Эти расчеты должны входить в состав изыскательских материалов, обосновывающих эксплуатационные запасы подземных вод на участках водозаборов.

## **1.6. ВОДНОЕ ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВО**

В настоящее время страны, входящие в СНГ, в практической деятельности руководствуются Основами водного законодательства Союза ССР и союзных республик введенными в действие в 1971 г. В этом законе содержатся обязательные для всех министерств, ведомств, государственных органов, предприятий, учреждений, организаций и граждан наиболее общие и принципиальные положения о порядке использования и охраны рек, озер, морей, водохранилищ, других поверхностных и подземных объектов, находящихся на территории страны.

В развитие Основ в СНГ разрабатываются водные кодексы, которые подробно и всесторонне должны определить порядок пользования водами для разнообразных нужд населения и производства, охраны вод и борьбы против их вредного воздействия. В условиях перехода экономики на горизонтальные связи, укрепления межрегиональных и межреспубликанских отношений водохозяйственный комплекс нуждается в законодательном урегулировании, поскольку водное законодательство в настоящее время не отвечает в полной мере этим условиям. В то же время проблема обеспечения населения, промышленности и сельского хозяйства водой нормативного качества стала одной из главных социально-экономических проблем. Во многих регионах водный фактор является лимитирующим в развитии и размещении производственных сил.

Для успешного решения задачи обеспечения водными ресурсами потребителей необходимо создание целостного механизма управления использованием и охраной вод. Одной из основных предпосылок создания и функционирования такого механизма является юридическое обеспечение защиты общественных интересов при использовании воды в совокупности с интересами экологической защиты водоемов в условиях суверенитета и экономической самостоятельности субъектов, многообразия форм собственности и самостоятельности предприятий.

В проекте новой редакции Водного кодекса России, кроме основных вопросов управления использованием и охраной вод, а также рационального их использования, значительное внимание уделено вопросам водоохранного обустройства водосборных территорий, созданию водоохраных зон и прибрежных полос, экологическим попускам, охране подземных вод и другим экологическим требованиям к строительству и эксплуатации хозяйственно-технических объектов. В нем уделено внимание вопросам экономического обеспечения водохозяйственной и водоохранной деятельности, существом которой составляет плата за все виды водопользования. Как и в Основах водного законодательства СССР, в Водном кодексе России, государственный водный фонд образует совокупность всех водных объектов: реки, озера, водохранилища, ручьи, ледники, подземные водоносные системы, внутренние моря и др.

Организационный принцип государственного управления использованием и охраной вод предусматривает экосистемный бассейновый принцип. Исключительно важное значение для рационального комплексного использования водных ресурсов, охраны вод от загрязнения, засорения и истощения имеет государственный контроль. В целях непрерывного наблюдения и оценки состояния водного фонда на территории России организуется система мониторинга водных объектов в рамках единой государственной системы мониторинга природной среды. Водным законодательством установлены положения, предусматривающие установление государственной системы использования и охраны водных объектов.

Главными звеньями этой системы являются: государственный водный кадастр, водохозяйственные балансы и схемы комплексного использования и охраны вод.

Государственный водный кадастр является совокупностью официальных сведений о состоянии и использовании водных объектов и водопользователей. Он включает данные мониторинга вод, государственного учета использования вод и современных водохозяйственных балансов. Водохозяйственные балансы, оценивающие наличие и степень использования вод, разрабатываются в составе Государственного водного кадастра или по оперативной потребности по бассейнам рек и служат основанием для принятия оперативных решений по вопросам водопользования и охраны вод.

Схемы комплексного использования и охраны вод являются водохозяйственной основой для планирования экономического и социального развития отдельных территорий. Они определяют, исходя из общей хозяйственной обстановки в бассейне реки, основные водохозяйственные, водоохраные и другие мероприятия, осуществляемые для удовлетворения текущих и перспективных потребностей населения, промышленности и сельского хозяйства и других водопользователей в водных ресурсах на основе их комплексного использования, а также охраны вод.

Государственный водный кадастр, водохозяйственные балансы и схемы комплексного использования вод имеют между собой тесную связь, и в то же время каждое звено в отдельности представляет достаточно самостоятельный научно-технический и организационный комплекс.

Экономический механизм использования и охраны вод в Водном кодексе России предусматривает несколько видов платежей: за водопользование, возмещающие затраты, необходимые для обеспечения рационального использования, охраны и расширенного воспроизводства водных ресурсов; рентные платежи за использование относительно лучших источников по качеству, местоположению и доступности эксплуатации; штрафы за истощение и загрязнение водных объектов. Платежи за водопользование устанавливаются за забор воды из поверхностного и подземного источников; за прием сточных вод в водный объект, за водопользование без изъятия воды из водных объектов. Указанный механизм направлен на стимулирование рационального использования и охраны вод, повышение заинтересованности водопользователей в сохранении и улучшении экологического состояния водных объектов.

В проекте водного законодательства определены порядок и условия предоставления водных объектов в пользование, сроки водопользования, права и обязанности водопользователей и др. В нем закреплено положение о приоритете хозяйственно-питьевого водоснабжения перед другими видами водоснабжения.

В отношении лиц и коллективов, которые не соблюдают юридические условия и требования, заключенные в нормах водного законодательства, применяются различные меры ответственности - уголовной, административной, дисциплинарной, гражданской и водоправовой.

## **Глава 2. ВОДОПОТРЕБЛЕНИЕ**

### **2.1. ВИДЫ ПОТРЕБЛЕНИЯ ВОДЫ**

Первоочередной задачей при создании систем водоснабжения является нахождение объемов воды, подаваемых потребителям. Для нахождения суммарных расходов используемой воды требуется наиболее полный учет всех абонентов. Городская или поселковая система водоснабжения подает воду на различные нужды абонентов.

Все виды потребления воды сводятся к нескольким основным категориям. К первой категории относится хозяйственно-питьевое потребление воды. Оно связано с жизнедеятельностью людей в период их нахождения в домашних условиях, а также в общественных зданиях.

Ко второй категории относится потребление воды в коммунально-бытовом секторе. К коммунально-бытовому сектору относятся все потребители (объекты), которые не входят в жилищно-коммунальный сектор и не являются промышленными предприятиями. В настоящее время существует ряд классификаций, определяющих номенклатуру потребителей коммунально-бытового сектора, которые существенно отличаются друг от друга. Это в значительной мере усложняет учет всех типов потребителей. К ним, в первую очередь, следует отнести прачечные, химчистки, магазины, пункты общественного питания, холодильные установки, а также нежилые помещения, встроенные в жилые здания и оборудованные водопроводом. При этом многие из них не являются самостоятельными абонентами, а поэтому достоверное определение объемов, водопотребления бывает затруднено. К потребителям воды коммунально-бытового сектора следует отнести и хозяйства, использующие воду для полива территорий и зеленых насаждений.

К третьей категории относится потребление воды в технологических процессах производств.

Четвертая категория предусматривает использование воды для целей пожаротушения.

Кроме того, имеет место расходование воды на собственные нужды самой системы водоснабжения. Например, для целей промывки трубопроводов перед пуском их в эксплуатацию, промывки фильтров и т.п.

Учет всех видов потребления невозможен без учета требований к качеству используемой воды для различных нужд и степени централизации системы водоснабжения. Если для хозяйственно-питьевых нужд требуется вода, отвечающая определенным санитарно-гигиеническим свойствам, определяемым государственным стандартом на питьевую воду, то для других потребителей эти требования могут носить специфический характер. Требования к воде для хозяйственно-бытовых нужд, как правило, отвечают требованиям к качеству питьевой воды. В настоящее время для полива территорий и зеленых насаждений в большинстве городов используется вода питьевого качества. Очевидно, экономически целесообразно применять для этих целей воды другого качества, разрешенные к использованию органами Минздрава.

Многообразие условий использования воды в производстве обуславливает и многообразие требований к ее качеству. В общем случае вода, используемая в

технологических процессах, не должна: ухудшать качества выпускаемой продукции и нарушать технологический режим эксплуатации оборудования; оказывать агрессивное воздействие на трубопроводы и оборудование водоснабжения и водоотведения; способствовать развитию биологических обрастаний (бактерий, водорослей, инфузорий, червей, колеровок, грибков и т.п.); создавать опасность для здоровья человека; вызывать загрязнения воздушного бассейна.

Указанные условия заставляют задуматься о возможности и целесообразности использования воды питьевого качества для технологических нужд производства. Существуют производства, предъявляющие более высокие требования к качеству воды. Так, вода для паросиловых установок должна иметь очень низкое солесодержание; текстильные производства не допускают содержания в используемой воде железа и т.п. Для ряда производств необходима вода такого качества, которое не может обеспечить ни один природный источник водоснабжения.

В системах противопожарного водоснабжения вода используется для обеспечения пожарной безопасности людей, технологического оборудования, материальных ценностей, а также зданий и сооружений. Вода для целей пожаротушения не должна содержать механические примеси, загрязняющие элементы противопожарной системы, а также химические вещества, отрицательно влияющие на эффект использования воды. Вода питьевого качества отвечает этим требованиям. Однако это не означает, что вода иного качества не может быть использована для указанных целей. Очевидно, что для собственных нужд системы водоочистных комплексов (промывка трубопроводов и т.п.) должна использоваться вода питьевого качества.

## **2.2. СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ В НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТАХ**

Рост городов и поселков, улучшение их санитарного благосостояния, а также развитие промышленности приводят к увеличению суммарного водопотребления. В течение длительного периода удовлетворение всевозрастающих потребностей в воде осуществлялось за счет строительства новых мощностей водопроводных сооружений и привлечения дополнительных источников воды. Этот путь обеспечения водой потребителей в современных условиях, характеризующихся дефицитом свежей воды и сложной экологической ситуацией, становится все менее приемлемым.

На рис. 1.1 показан рост общей мощности водопроводов в стране начиная с 1970 г. по настоящее время и по прогнозу на период до 2010 г. Как видно, темпы роста мощности городских водопроводов должны снижаться. Ожидается, что на расчетный срок мощность увеличится на 25-30 % по сравнению с современными значениями. Это необходимо для обеспечения потребителей водой в связи с ростом водопотребления и создания резерва для большей надежности водоснабжения в условиях максимальных расходов воды.

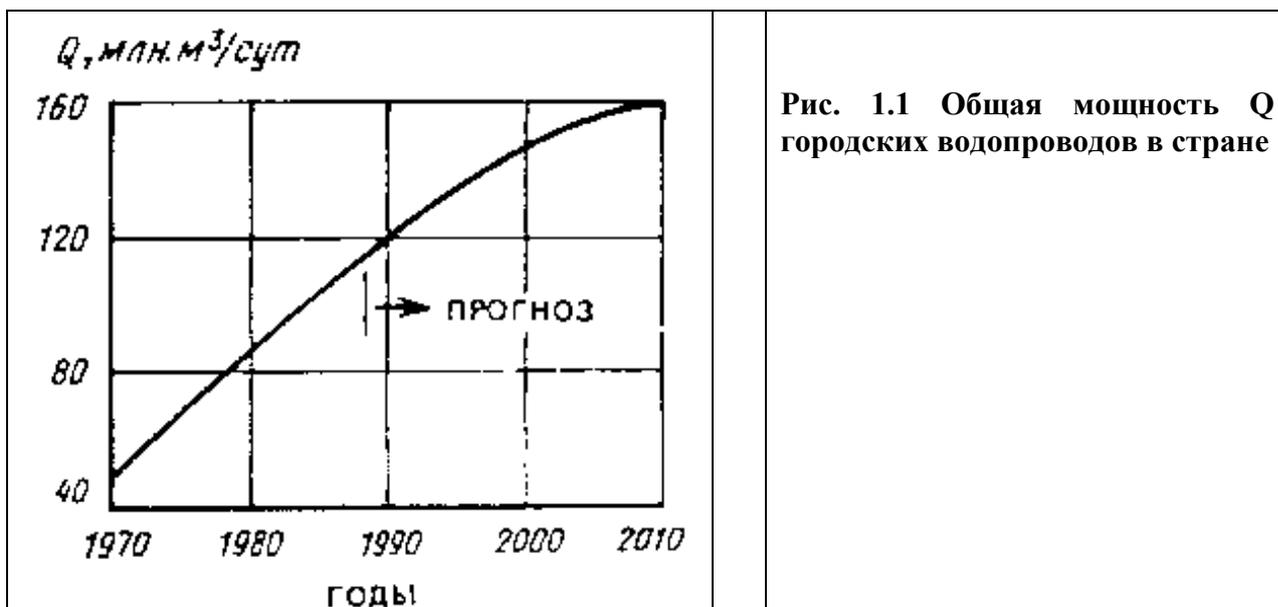


Рис. 1.1 Общая мощность  $Q$  городских водопроводов в стране

Оценить водопотребление можно по удельному среднесуточному (за год) водопотреблению в населенных пунктах на одного жителя. В зависимости от требуемой полноты учета всех видов потребителей, точности расчетов и располагаемой информации удельное водопотребление будет меняться. Так, при разработке генеральных планов и схем водоснабжения удельное среднесуточное водопотребление включает расходы воды на хозяйственно-питьевые нужды в жилых и общественных зданиях, нужды местной промышленности, поливку улиц и зеленых насаждений. При отсутствии данных о развитии промышленности дополнительный расход воды на нужды предприятий, забирающих воду из сетей хозяйственно-питьевого водопровода населенного пункта, принимают в размере определенной доли расхода воды, соответствующей удельному водопотреблению.

При проектировании систем водоснабжения населенных пунктов поступают иначе: удельное водопотребление для различных типов потребителей определяют самостоятельно в соответствии с требованиями соответствующих норм и правил. Это дает более точный прогноз водопотребления на расчетный период.

В процессе эксплуатации системы водоснабжения часто приходится определять фактическое удельное водопотребление. В этом случае в зависимости от постановки задача может быть решена с различной степенью детализации: удельное водопотребление населенного пункта в целом, удельное водопотребление на хозяйственно-питьевые и коммунально-бытовые нужды и т.д.

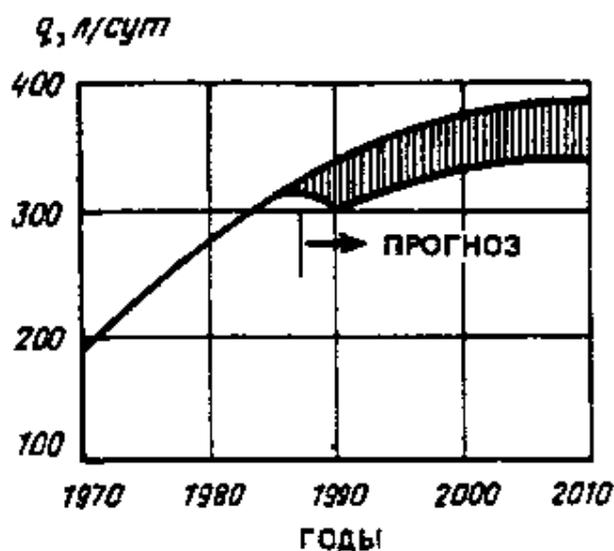


Рис. 1.2 Удельное водопотребление  $q$  на хозяйственно-питьевые и коммунально-бытовые нужды населения

Среднее удельное водопотребление на хозяйственно-питьевые и коммунально-бытовые нужды городского населения, т.е. среднесуточный расход воды в жилых и общественных зданиях и на внешнее благоустройство городской территории, до последнего времени непрерывно возрастал (рис. 1.2). Указанный рост в определенной мере отражал реальную картину улучшения санитарного благосостояния, вызванного повышением комфортности жилищ и общественных зданий, развитием централизованного холодного и горячего водоснабжения и др. В настоящее время удельное водопотребление достигло 320 л/сут, из которых около 210 л/сут приходится на водопотребление в жилых домах. С учетом отпуска городскими системами воды на нужды предприятий промышленности, транспорта, строительства и т.д. среднесуточное водопотребление возрастает приблизительно на 30 %. Таким образом, общее удельное водопотребление из городских водопроводов составляет 450 л/сут.

Как видно из рис. 1.2, темпы роста удельного водопотребления на нужды населения несколько снижаются. Согласно прогнозу Академии коммунального хозяйства, эта тенденция сохранится и в следующие десятилетия. В последнее время значительные усилия направлены на снижение нерациональных расходов и утечек воды питьевого качества у абонентов. Удельное водопотребление за счет сокращения потерь повсеместно должно быть снижено на 15 % (нижняя кривая на рис. 1.2). Однако при условии обеспечения каждой семьи отдельной квартирой и повышения уровня благоустройства жилых домов удельное водопотребление будет возрастать. При выполнении всех мероприятий по рациональному расходованию питьевой воды этот показатель к 2010 г. ожидается в пределах 350 л/сут, в том числе в жилых домах - 220-240 л/сут. Предполагается также, что доля воды, расходуемой промышленными производствами, снизится с 30 до 20-22 % общего объема водопотребления. При неполном осуществлении мероприятий по экономии воды удельное водопотребление на все нужды населения к 2010 г. может составить около 400 л/сут (верхняя кривая на рис. 1.2).

Приведенные данные носят осредненный характер. На фактическое удельное потребление воды оказывают влияние климатические условия и крупность городов. Так, в северных и центральных районах этот показатель на 15-20 % ниже, а в южных - на 25-30 % выше, чем в среднем по стране. В районах с суровым климатом удельное потребление воды в малых городах и поселках обычно на 25-30 % меньше, а в крупных городах на эту же величину больше, чем в среднем по региону.

Различие удельного водопотребления на все нужды населения по группам городов различной крупности за 1985 г. и прогнозу на 2010 г. показано на рис. 1.3, откуда видно, что в будущем ожидается некоторое сглаживание этих значений.

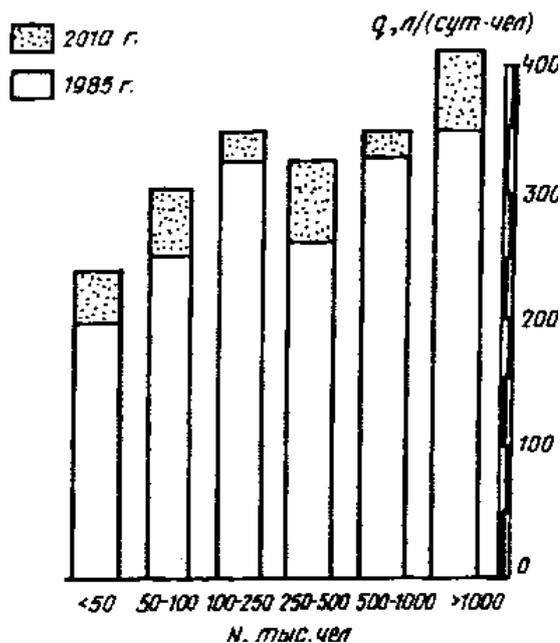


Рис 1.3 Удельное водопотребление  $q$  на хозяйственно-питьевые и коммунально-бытовые нужды населения по группам городов различной численности  $N$

В сельской местности с централизованным водоснабжением среднее удельное водопотребление составляет приблизительно 85 л/сут. Предполагается, что к 2010 г. оно возрастет до 130-160 л/сут.

В современном мире практически повсеместно происходят существенные изменения в удельном потреблении свежей воды. На рубеже 80-х годов в большинстве экономически развитых стран значительно снизились темпы роста удельного водопотребления.

По прогнозам, до конца XX в. темпы роста удельного водопотребления в развитых регионах в среднем составят не более 1,5 % в год. Это связано с ростом населения крупных городов. В развивающихся странах с более существенным ростом численности населения предполагается рост удельного потребления свежей воды от 1,5 до 7,5 % в год. При этом практически во всех странах мира происходит снижение потребления питьевой воды промышленностью. Например, в Швеции с 1972 до 1982 г. доля промышленности в потреблении воды питьевого качества снизилась с 40 до 23 %. Сравнение данных о водопотреблении показывает, что в государствах Европы удельное потребление ниже, чем в нашей стране. Так, в ФРГ удельное среднесуточное потребление менее 200 л, а в коммунальном секторе составляет 140 л/сут. Это говорит об экономности в обращении с питьевой водой, при этом ограничений на потребление воды нет.

### 2.3. ПУТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ В НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТАХ

Суммарное водопотребление по стране составляет менее 10 % наличных ресурсов. Казалось бы, нет оснований для беспокойства о дефиците свежей воды. В действительности положение достаточно сложно. Оно в значительной мере связано с неравномерностью распределения поверхностного стока по территории страны.

Пресные подземные воды служат источниками водоснабжения большинства городов и поселков, но их доля в общем водопотреблении составляет менее половины, так как наиболее крупные города используют поверхностные источники. Такая же тенденция наблюдается и в наиболее крупных странах мира, например США.

Внешнее относительно благополучное состояние и перспектива снабжения водой потребителей во многом не отражает реального положения вещей. Причины нерационального расходования воды и неудовлетворительного обеспечения ею

потребителей носят комплексный характер, включающий социальные, технические, экономические, экологические, организационные и юридические аспекты.

Рассмотрение фактических удельных расходов водопотребления в различных системах позволяет сделать определенный вывод. Достаточно высокое удельное потребление воды в жилом и коммунально-бытовом хозяйстве города или поселка сверх санитарно обоснованных норм в первую очередь говорит о неблагоприятном положении с инженерными коммуникациями и оборудованием, уровне эксплуатации холодного и горячего водоснабжения как наружных, так и внутренних систем.

На социальном фоне приоритета развитию промышленности и строительства в течение десятилетий коммунальное хозяйство и водопровод отступили на второй план. Для его нужд использовались наиболее дешевые, а следовательно, и наименее надежные и качественные изделия. Развитие служб эксплуатации отстает от строительства из-за недостаточного материального обеспечения. Это обуславливает значительные потери воды в виде утечек и возрастания водопотребления.

Социальная политика по бесперебойной неограниченной подаче воды и низкая цена на воду приводят к увеличению несоответствия затрат на снабжение каждого потребителя водой и оплатой этой услуги. Таким образом, государство оплачивает и, следовательно, планирует потери воды. В бывшем СССР потери воды в водопроводах составляли 18-21 % объема подаваемой воды. Для сравнения, в ФРГ в среднем эти потери не превышают 10 %, в Японии - 5 %. Названные выше противоречия в современных условиях могут расти, так как источники питьевой воды, близко расположенные к населенным пунктам, в большинстве случаев освоены (как поверхностные, так и подземные). Переброска воды из далеко расположенных источников водоснабжения не только дорогостоящее, но и экологически опасное мероприятие.

В значительной мере неблагоприятное положение снабжения водой вызвано несовершенством методов экономического стимулирования рационального ее использования. В развитых странах мира существуют различные виды платежей за водопользование, стимулирующие рациональное использование воды и создающие фонды финансирования водоохранных мероприятий. В СССР до 1982 г. водопользование осуществлялось совершенно бесплатно. Лишь затем была введена плата за забор воды из поверхностных источников промышленными предприятиями. Коммунальное водоснабжение за взятую из источника природную воду оплаты не производило. Это стимулировало увеличение подачи воды промышленности. Последняя, увеличив плановую водохозяйственную составляющую в себестоимости своей продукции, убытка не несла. В современных условиях, по-видимому, следует признать целесообразным руководство водохозяйственными проблемами через плату за забираемую воду.

Большинство крупных городов мира, как и в нашей стране, испытывает трудности, вызываемые ростом водопотребления. Это обуславливает необходимость расширения сооружений, что в свою очередь вызывает обострение проблем охраны окружающей среды. Поэтому в развитых странах строительство новых водопроводных систем связывают с требованиями об экономии воды и регенерации сточных вод. Снижения водопотребления в значительной мере можно достичь путем осуществления различных мероприятий.

Максимального устранения потерь и рационального использования воды можно достичь на гибких системах водоснабжения, которые правильно построены и грамотно эксплуатируются, при налаженном учете подачи и потребления. Экономичность и надежность системы закладывается уже на стадии проекта. Правильность проектных решений может быть достигнута при проведении многовариантных расчетов совместной работы насосов, водоводов, сетей и регулирующих емкостей.

Одним из важных факторов, влияющих на величину потерь воды в городских и внутренних системах, является стабилизация давления в системе. Это достигается регулированием давления в сетях, увязкой напоров в диктующих точках с работой

насосных станций, устройством зонных систем, регулирующих резервуаров. Исследования показывают, что рост давления в системе в 2 раза приводит к возрастанию потерь на 40-50 %. Вследствие этого наблюдается увеличение потерь в системах с ростом этажности зданий. Уменьшения потерь можно достичь установкой совершенного водосберегающего санитарно-технического оборудования.

Реализация проектных решений при строительстве во многом зависит от качества применяемых материалов. Несмотря на мировую общность типа применяемых труб в нашей стране до сих пор не находят широкого применения металлические трубы с внутренними покрытиями, пластмассовые и железобетонные трубы. Промышленностью не выпускается в должной мере запорно-регулирующая и предохранительная арматура, отвечающая условиям работы систем водоснабжения.

Следует иметь в виду, что многие проблемы могут быть решены на стадии эксплуатации. Необходимо наладить контроль за состоянием трубопроводов и на его основе планировать замену труб и профилактику, связанную с восстановлением пропускной способности и защитой от внутренней и внешней коррозии; планомерно проводить работы по установлению оптимальных режимов работы системы на основе установления гидравлического взаимодействия всех элементов системы с учетом реальных сопротивлений, фактических режимов водопотребления, гидравлических нагрузок, действительных отборов воды и наиболее крупных потребителей и т.д.

В комплекс мер, обеспечивающих рациональное использование воды, дополнительно следует включить: формирование общественного мнения; снижение потребления воды питьевого качества на промышленных объектах; повторное использование сточных вод после очистки до требуемых пределов для целей орошения садово-парковой растительности; создание замкнутых систем промышленного водоснабжения.

Немалую роль могут сыграть законодательные акты муниципальных органов и водопроводных служб о рациональном использовании воды, разрешении строительства объектов и их подключении к водопроводу и др. Эти акты должны подкрепляться финансовой основой. Введение сезонного тарифа стимулирует более рациональное использование воды в жаркие периоды года.

Метод прямого процентного снижения предусматривает снижение водопотребления на определенный процент по сравнению с прошедшим годом; метод раздельного водопотребления - различные пределы водопотребления для жилья, промышленности и бытового обслуживания; метод снижения внутреннего и внешнего водопотребления - различный процент снижения потребления воды в жилом секторе и для нужд организованного орошения летом и т.п. Все указанные методы предусматривают ограничения объема расходуемой воды, а также наложение штрафов и предупреждений. Однако их использование требует четкого учета потребляемой воды. Помимо этого могут быть введены просто лимиты на получение заданных количеств воды. Полное или частичное осуществление рассмотренных выше мер, как показывает международный и отечественный опыт, позволяет в короткий период получить значительную экономию воды без ущерба для нормального образа жизни и функционирования всего хозяйства.

#### **2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ РАСХОДУЕМОЙ ВОДЫ**

Первоочередной задачей проектирования системы водоснабжения является определение количества воды, которое она должна подавать. Для этого необходимо знать перечень и количество всех потребителей, получающих воду от рассчитываемой системы водоснабжения. В городах и поселках, как правило, устраивается объединенная хозяйственно-противопожарная система водоснабжения. Этой же системой подается вода на хозяйственно-питьевые нужды промышленных предприятий, расположенных в черте

города, а также на производственные нужды производств, потребляющих воду питьевого качества в силу технологической необходимости или экономической целесообразности.

При отсутствии самостоятельной системы поливного водопровода (вследствие невозможности ее устройства или экономической неэффективности) вода для мойки улиц и полива зеленых насаждений подается также объединенной системой.

При проектировании системы водоснабжения промышленной зоны или отдельного объекта, не имеющих связи с городским водопроводом, необходимо учесть все виды потребления воды, существующие на их территории. Эти системы рассчитываются самостоятельно. Целесообразность устройства таких систем определяется из условия технологической, экономической и экологической целесообразности, а также требований рационального использования водных ресурсов.

Для правильного расчета систем водоснабжения необходимо знать очередность развития объекта и соответствующее этим очередностям водопотребление. На рис. 1.4 приведена предполагаемая кривая 2 роста водопотребления, отвечающая развитию всех составляющих структур снабжаемого водой объекта, а также ломаная линия 1, характеризующая рост очередей развития системы водоснабжения. Рост водопотребления в городе во времени происходит вследствие увеличения численности населения, повышения степени благоустройства, развития промышленности и т.д.

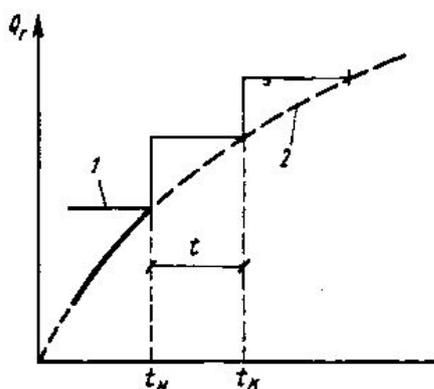


Рис 1.4. График роста водопотребления  $Q_r$  и очередей развития систем водоснабжения

Линия 1 определяет максимальную производительность системы за расчетный период  $t = t_k - t_n$ , где  $t_n$  - начальный момент пуска новых сооружений;  $t_k$  - момент окончания срока расширения или реконструкции. Водопотребление, соответствующее конечному моменту рассчитываемой очереди развития, определяется точкой пересечения линий 1 и 2.

Расчетный расход воды каждого из потребителей определяется на основании норм, получаемых путем обработки статистических данных о фактическом потреблении или технологическим расчетом. Нормы периодически пересматриваются с учетом изменений, происходящих в технологии производств, эффективности санитарно-технического оборудования, комфортабельности жилища, плотности его заселения, тарифов на воду и др.

**Расход воды на хозяйственно-питьевые нужды населения** по объекту в целом зависит от ряда факторов. Зная расход, приходящийся на 1 чел/сут, который носит название удельного хозяйственно-питьевого водопотребления, можно определить суточное потребление воды. Оно будет тем больше, чем больше число жителей в населенном пункте.

Удельное водопотребление учитывает количество воды, потребляемое 1 чел. на хозяйственно-питьевые нужды не только дома, но и в общественных зданиях. Оно зависит от степени благоустройства районов жилой застройки. Очевидно, что при более комфортабельных условиях удельное потребление воды выше. В значительной мере на него влияют климатические условия (в районах с жарким климатом воды потребляется

больше, чем в холодных районах), а также местные условия, качество воды, этажность застройки. Определить удельное водопотребление можно путем анализа фактических данных о расходовании воды в действующих системах водоснабжения, а также на основе санитарных и других требований. При проектировании систем водоснабжения населенных пунктов удельное среднесуточное (за год) водопотребление на одного жителя определяют по СНиП 2.04.02-84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Степень благоустройства районов жилой застройки	Удельное среднесуточное хозяйственно-питьевое водоснабжение в населенных пунктах на одного жителя (за год) $q_{ж}$ , л/сут
<b>Застройка зданиями, оборудованными внутренним водопроводом и канализацией:</b>	
без ванн	125–160
с ваннами и местными водонагревателями	160–280
с централизованным горячим водоснабжением	280–350

Для районов, где водопользование предусмотрено из водоразборных колонок, удельное среднесуточное водопользование на одного жителя принимается равным 30-50, л/сут. Количество воды на нужды местной промышленности, обслуживающей население продуктами, и неучтенные расходы допускается принимать в размере 10-20 % суммарного расхода воды на хозяйственно-питьевые нужды населенного пункта. В том случае, если в городе число жителей более 1 млн. чел., удельное водопотребление допускается увеличивать, но для этого требуется согласование с органами Государственного надзора. Выбирая норму водопотребления, необходимо предусматривать мероприятия по сокращению утечек в системе и нерационального расходования воды в зданиях. К ним следует отнести организацию зонирования системы, улучшение ее эксплуатации, регулирование давления и т.п.

**Расход воды на производственные и бытовые нужды промышленных предприятий.** Расходы воды на технологические нужды зависят от вида производства, принятого технологического процесса, вида системы водоснабжения, качества воды и т.д.

Расходы воды на производственные нужды определяют по удельным нормам водопотребления на единицу продукции. Эти нормы задаются на основе технологических расчетов работниками той или иной области промышленности. Они назначаются из условия применения наиболее прогрессивных технологий, предусматривающих маловодные процессы, устройство оборотных и замкнутых систем водоснабжения. В соответствии с существующими нормами расход воды на хозяйственно-питьевые нужды рабочих во время их пребывания на производстве учитывается дополнительно к тем хозяйственно-питьевым расходам, которые рассматривались выше. Они зависят как от численности работающих, так и от вида производства. Их значения определяются в соответствии со СНиП 2.04.01 -85 «Внутренний водопровод и канализация зданий». Кроме того, на производствах, требующих определенного режима, вода расходуется на прием душа.

**Расход воды на поливку и мойку улиц и площадей, а также на поливку зеленых насаждений** зависит от размеров поливаемых площадей, способа поливки, типа покрытий и т.п. В СНиП 2.04.02- 84 предусмотрены следующие удельные нормы расхода воды, л/м<sup>2</sup>, на одну мойку или одну поливку:

механизированная мойка усовершенствованных покрытий проездов и площадей	1,2—1,5
механизированная поливка усовершенствованных покрытий проездов и площадей	0,3—0,4
поливка вручную (из шлангов) усовершенствованных покрытий тротуаров и проездов	0,4—0,5
поливка городских зеленых насаждений	3—4
поливка газонов и цветников	4—6

При отсутствии данных о площадях по видам благоустройства удельное среднесуточное за поливочный сезон потребление воды принимается равным 50-90 л/сут в расчете на одного жителя. При назначении нормы поливки учитывают климатические условия, мощность источника водоснабжения, степень благоустройства населенных пунктов и другие местные условия. Число поливок в зависимости от климата принимается равным 1-2 в сутки.

Расход воды на тушение пожара зависит от характера развития пожара и условий подачи воды в очаг горения. Чем выше пожарная опасность объекта, тем больше требуется воды для тушения пожара. Подавая в очаг пожара значительное количество воды, можно ликвидировать его в течение короткого промежутка времени. Однако для строительства водопроводов, рассчитанных на пропуск большего количества воды, необходимы значительные материальные средства. Поэтому расход воды для тушения пожаров назначают в зависимости от пожарной опасности объекта и его значимости. Расходы воды для тушения пожара приведены в нормативных документах (СНиП 2.04.02-84). Они составлены на основании обработки статистических данных о фактических расходах воды с учетом создания требуемых условий тушения пожаров на различных объектах. Расход воды для тушения пожаров в населенных местах зависит от численности населения и характера застройки (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Число жителей в населенном пункте, тыс. чел.	Расчетное число одновременных пожаров	Расход воды, л/с, на один пожар (независимо от огнестойкости здания) при высоте застройки	
		до двух этажей включительно	три этажа и более
До 1	1	5	10
5	1	10	10
10	1	10	15
25	2	10	15
50	2	20	25
100	2	25	35
200	3	—	40
300	3	—	55
400	3	—	70
500	3	—	80
600	3	—	85
700	3	—	90
800	3	—	95
1000	3	—	100

Продолжительность тушения пожара в большинстве случаев принимается равной 3 ч. Расход воды для наружного пожаротушения в производственных зданиях с фонарями и в зданиях шириной до 60 м без фонарей зависит от объема здания, степени огнестойкости его строительных конструкций, а также категории пожарной опасности производства, размещенного в здании (табл. 1.3). Норма расхода воды для наружного пожаротушения в производственных зданиях без фонарей шириной 60 м и более несколько иная (табл. 1.4).

Таблица 1.3

Степень огнестойкости зданий	Категория производства по пожарной опасности	Расход воды, л/с, на один пожар при объеме здания, тыс. м <sup>3</sup>						
		до 3	более 3 до 5	более 5 до 20	более 20 до 50	более 50 до 200	более 200 до 400	более 400
I и II	Г, Д, Е, А, Б, В	10	10	10	10	15	20	25
		10	10	15	20	30	35	40
III	Г, Д, В	10	10	15	25	35	—	—
		10	15	20	30	40	—	—
IV и V	Г, Д	10	15	20	30	—	—	—
	В	15	20	25	40	—	—	—

Таблица 1.4

Степень огнестойкости здания	Категория производства по пожарной опасности	Расход воды, л/с, на один пожар при объеме здания, тыс. м <sup>3</sup>								
		до 50	50—100	100—200	200—300	300—400	400—500	500—600	600—700	700—800
I и II	А, Б и В	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	Г, Д и Е	10	15	20	25	30	35	40	45	50

Число одновременных пожаров на промышленном предприятии определяется в зависимости от занимаемой ими площади. При площади предприятия до 150 га в расчете предполагается возможность возникновения одного пожара и двух пожаров - при большей площади. Для крупных промышленных предприятий (например, нефтеперерабатывающие и химические комбинаты) создаются самостоятельные системы водоснабжения, не связанные с городскими водопроводами. Расход воды на наружное тушение пожаров в таких случаях определяется в соответствии с Противопожарными техническими условиями строительного проектирования (ПТУСП). Противопожарные водопроводы этих предприятий обычно рассчитывают исходя из условия подачи воды в пожарные автомобили, подачи воды пожарными гидрантами и лафетными стволами, а также тушения пожаров внутри зданий с помощью внутренних пожарных кранов и стационарных систем водяного или пенного тушения.

Суммарный суточный расход воды, определяемый по отдельным категориям водопотребления, зависит от вида и числа потребителей, снабжаемых водой рассчитываемой системой водоснабжения.

## 2.5. РЕЖИМ ПОТРЕБЛЕНИЯ ВОДЫ

Определенный по нормам средний суточный за год расход воды населенным пунктом или промышленным предприятием дает лишь общую характеристику масштабов водопотребления рассматриваемого объекта.

Режим потребления воды на хозяйственно-питьевые нужды населением является в значительной мере случайным и мало поддающимся управлению процессом. Поэтому для возможности получения достаточно точного и экономичного проектного решения системы водоснабжения необходимо знать расчетные графики потребления воды населением. Потребление воды на хозяйственно-питьевые нужды неравномерно как в течение года, так и в течение суток. Наблюдаются изменения расхода: сезонные, вызванные изменением температуры и влажности воздуха, недельные, обусловленные особенностями жизнедеятельности людей в различные дни недели, а также суточные. Последние характеризуются неравномерностью потребления воды в отдельные часы

суток, что в значительной мере зависит от степени благоустройства и изменения давления в водопроводной сети. Изменение часовых расходов может вызываться и такими случайными факторами, как показ популярных телепрограмм, спортивных мероприятий и т.п. Значительное влияние на режим водопотребления оказывает социальный и демографический состав населения.

Для получения указанных графиков необходим ряд наблюдений за потреблением воды в населенных пунктах, близких по численности населения, климатическим условиям, санитарно-техническому благоустройству районов жилой застройки, демографическому составу.

Пути подхода к изучению процесса водопотребления населением зависят от типа решаемых задач. Требования к информации об изменении часовых расходов воды могут быть различны. Прогноз режима водопотребления необходим для определения таких величин, как водопотребление, регулирующие объемы воды в емкостях, затраты энергии на транспортирование воды и др. В этом случае необходимо, чтобы сведения о расходах характеризовали всю совокупность их значений, ожидаемую в расчетном году.

При эксплуатации системы водоснабжения, особенно при функционировании АСУ, а также для расчета систем подачи и распределения воды необходим прогноз расходов на короткие периоды (несколько часов, суток). В этом случае помимо ожидаемых расходов нужно знать и ожидаемое время появления того или иного расхода, т.е. требуется прогноз графика часовой неравномерности водопотребления. Эти графики должны служить основой для решения задач управления: оптимального распределения нагрузок между источниками питания, выбора работающих агрегатов и т.п.

Методы разработки графиков неравномерности можно разделить на эмпирический, аналитический, статистический и вероятностный методы моделирования. Эмпирические методы получения графиков неравномерности водопотребления наиболее просты и наглядны. Широко распространенным методом является получение графика для отдельного объекта путем осреднения ординат, полученных в различные дни наблюдений. Недостатком этого графика является «сглаживание» часовых расходов, в том числе и «пиковых» расходов из-за их несовпадения в различные дни и часы.

Получение «типовых» графиков возможно осреднением нескольких однотипных по форме графиков с близкими значениями максимальных коэффициентов неравномерности, которые определяются статистическим путем (предложен проф. А.Н. Карамбиновым). Существует способ построения типового графика объекта с предварительным ранжированием в порядке возрастания ординат исходных графиков, предложенный А.С. Вербицким и М.П. Майзельсом. При использовании графиков за  $n$  суток ранжированный ряд разделяется на 24 части по  $n$  членов в каждой и часовые расходы в каждой из них усредняются. Затем производится обратная расстановка расходов по часам суток так, чтобы их номера совпадали с номерами часов, полученными при ранжировании обычного усредненного графика. Простейшим типом такого графика является условный трехступенчатый график, характеризующийся только минимальным, средним и максимальным режимами водопотребления. Он разрабатывается из условий:

$$q_{\text{чmin}} * T_{\text{min}} + q_{\text{чm}} * T_{\text{m}} + q_{\text{чmax}} * T_{\text{max}} = q_{\text{чm}} * 24;$$

$$T_{\text{min}} + T_{\text{m}} + T_{\text{max}} = 24,$$

где  $q_{\text{чmin}}$ ,  $q_{\text{чm}}$ ,  $q_{\text{чmax}}$  - соответственно минимальный, средний и максимальный часовые расходы

$T_{\text{min}}$ ,  $T_{\text{m}}$  и  $T_{\text{max}}$  - соответственно время продолжительности минимального, среднего и максимального режимов водопотребления.

Аналитические методы заключаются в математическом описании ранжированного ряда часовых расходов в течение суток. Для упрощенного аналитического описания часовых расходов воды дано предложение перейти к понятию "расчетного режима водопотребления". Расчетный режим водопотребления является упрощенным математическим описанием всей упорядоченной (ранжированной в порядке возрастания) совокупности часовых расходов, ожидаемых в расчетном году работы системы. Иными словами, это функция распределения вероятности часовых расходов. Она может быть получена в результате анализа обширных данных о фактических режимах водопотребления. Расчетный режим водопотребления определяется формулой вида:

$$q = q_{ч.т.} K_{о.ч} T$$

где  $q$  - часовой расход воды в момент времени  $T$ ;  
 $q_{ч.т.}$  - средний за рассматриваемый период (год) часовой расход воды;  
 $K_{о.ч}$  - коэффициент общей часовой неравномерности;  
 $T$  - текущее время, которое выражается в долях общего периода водопотребления и изменяется от 0 до 1.

В этой формуле коэффициент  $K_{о.ч}$  не относится к каким-либо конкретно суткам, а определяется из всего ряда часовых расходов за рассматриваемый период (год). Он определяется с заданной степенью обеспеченности. Под обеспеченностью понимается вероятность появления случайных расходов, не превышающих заданного значения. Так, если значение  $K_{о.ч}$  задано с 98 %-ной обеспеченностью, то это означает, что вероятность его превышения в течение рассматриваемого периода равна 0,02. Обеспеченность должна задаваться на основании требований по обеспечению определенного уровня надежности систем водоснабжения.

Приведенное аналитическое описание расчетных режимов водопотребления может быть использовано для долгосрочного прогнозирования при проектировании. Для этого достаточно иметь прогноз двух величин - среднего часового расхода  $q_{ч.т.}$  в расчетном году работы системы и коэффициента  $K_{о.ч}$ . Значения  $q_{ч.т.}$  определяются в зависимости от принятого для системы удельного среднесуточного водопотребления  $q_{жс}$  и ожидаемой численности населения. Величина  $K_{о.ч}$  определяется при обработке данных экспериментального изучения фактического водопотребления населением.

Статистический метод позволяет охарактеризовать суммарное действие всех случайных факторов. Использование этого метода основано на представлении часового расхода воды как о независимой случайной величине. При этом не учитываются корреляционные связи между значениями часовых расходов в реальных графиках.

Непосредственное изучение вероятностного характера последовательных случайных изменений часовых расходов воды во времени обеспечивается применением методов вероятностного моделирования (теории случайных процессов и случайных импульсных потоков). С их помощью могут быть получены прогнозы, отличающиеся определенностью и точностью. Это подтверждается опытом использования указанных методов при изучении электрических нагрузок. Из-за сложности методов вероятностного моделирования их использование в инженерной практике можно считать обоснованным при прогнозировании режимов работы систем подачи и распределения воды в процессе оперативного управления.

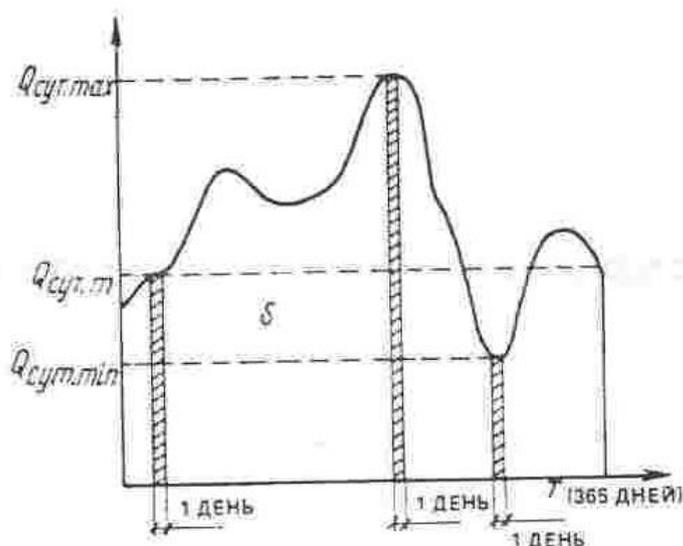
Можно констатировать, что разработать графики, адекватно отражающие водопотребление рассматриваемого объекта, весьма сложно и трудоемко. На практике это приводит к необходимости пользоваться приближенными графиками, степень упрощения которых зависит от характерных особенностей и требований проектирования и эксплуатации.

На рис. 1.5 приведен график суточного водопотребления на хозяйственно-питьевые нужды населения за год. Площадь  $S$ , ограниченная осями координат и волнистой линией, определяет годовое потребление воды (100 %). Отношение площади  $S$  к числу дней в году (365) соответствует среднесуточному за год расходу  $Q_{сут.м} = S/365$ . Удельное водопотребление  $q_{ж}$  определяется отношением  $Q_{сут.м} = S/N_{ж}$ , где  $N_{ж}$  — число жителей в данном населенном пункте. Тогда общий среднесуточный расход  $Q_{сут.м}$  на хозяйственно-питьевые цели определяется по формуле

$$Q_{сут.м} = \sum q_{жi} N_{жi} / 1000$$

где  $q_{жi}$  — удельное водопотребление, л/сут, принимаемое по СНиП 22.04.02-84;  
 $N_{жi}$  — расчетное число жителей в районе жилой застройки на конец рассчитываемой очереди развития.

В этой формуле  $q_{жi}$  и  $N_{жi}$  принимаются для отдельных районов города с разной степенью санитарно-технического оборудования зданий.



**Рис. 1.5. График суточного водопотребления в течение года**

Для проектирования системы водоснабжения сведений о среднесуточном водопотреблении недостаточно. Система должна обеспечивать потребности населения в любой момент времени, в том числе и в сутки максимального водопотребления. Для определения расходов воды в городе в различные сутки года по данным среднесуточного за год расхода воды необходимо знать коэффициенты суточной неравномерности водопотребления  $K_{сут.}$ . Они могут быть получены по графикам суточного водопотребления (см. рис. 1.5).

Коэффициенты суточной неравномерности соответствуют: Наибольший

$$K_{сут.макс} = Q_{сут.макс} / Q_{сут.м} > 1$$

Наименьший

$$K_{сут.мин} = Q_{сут.мин} / Q_{сут.м} < 1$$

Действующими нормами коэффициент суточной неравномерности водопотребления, учитывающий уклад жизни, режим работы, степень благоустройства, изменение водопотребления по сезонам года и дням недели, принимается равным:  $K_{сут.макс} = 1.1 - 1.3$ ;

$$K_{сут.мин} = 0,7 - 0,9.$$

Расчетные суточные расходы воды являются основой для расчета всех элементов водоснабжения. Как уже указывалось при расчете систем подачи и распределения воды, помимо изменений потребления воды по дням в течение года необходимо учитывать изменения водопотребления в отдельные часы расчетных суток.

Данные СНиП 2.04.02-84, полученные на основании опыта эксплуатации и анализа колебаний расходов воды в течение суток для реальных систем, позволяют приближенно определить максимальные  $q_{ч. max}$  и минимальные  $q_{ч. min}$  расчетные расходы воды по формулам:

для суток наибольшего водопотребления максимальный часовой расход

$$q_{ч. max} = K_{ч. max} \cdot Q_{сут. max} / 24;$$

для суток наименьшего водопотребления минимальный часовой расход

$$q_{ч. min} = K_{ч. min} \cdot Q_{сут. min} / 24,$$

где  $K_{ч. max}$  и  $K_{ч. min}$  - максимальный и минимальный коэффициенты часовой неравномерности водопотребления.

Коэффициенты часовой неравномерности хозяйственно-питьевого водопотребления населенных пунктов определяют по следующим формулам:  $K_{ч. max} = \alpha_{max} \beta_{max}$ ;

$$K_{ч. min} = \alpha_{min} \beta_{min}$$

Коэффициент  $\alpha$ , учитывает степень благоустройства зданий, режим работы предприятий и другие местные условия. Он принимается равным:  $\alpha_{max} = 1,2-1,4$ ,  $\alpha_{min} = 0,4-0,6$ .

Коэффициент  $\beta$  учитывает влияние численности населения объекта. С ростом населения неравномерность водопотребления уменьшается. Ниже приводятся значения коэффициентов  $\beta_{max}$  и  $\beta_{min}$  в зависимости от числа жителей  $N$ :

$N$ , тыс. чел.	до 0,1	0,15	0,2	0,3	0,5	0,75	1	1,5	2,5
$\beta_{max}$	4,5	4	3,5	3	2,5	2,2	2	1,8	1,6
$\beta_{min}$	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07	0,1	0,1	0,1

Продолжение

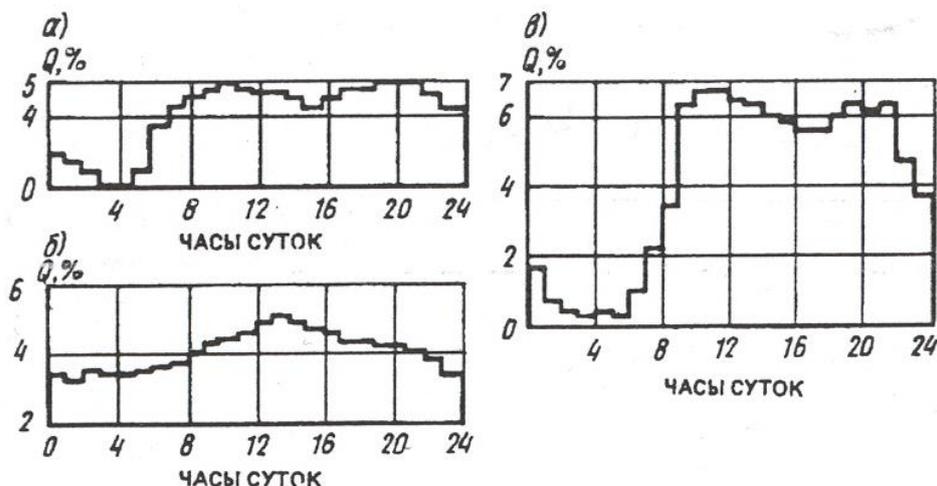
$N$ , тыс. чел.	4	6	10	20	50	100	300	1000 и более
$\beta_{max}$	1,5	1,4	1,3	1,2	1,15	1,1	1,05	1
$\beta_{min}$	0,2	0,25	0,4	0,5	0,6	0,7	0,85	1

Коэффициент может быть определен также по формуле, аппроксимирующей данные СНиП:  $\beta = 1 + 1/\sqrt{N}$ , где  $N$  - число жителей, тыс.чел.

Графики режима расходования воды, полученные по данным хозяйственно-питьевого водопотребления, не отражают в полной мере режим потребления воды населенным пунктом. Это вызвано тем, что из городской системы водоснабжения, помимо хозяйственно-питьевых расходов, отбирается вода на нужды промышленных предприятий, поливку и др. Обобщенный график расхода воды по часам суток необходимо строить с учетом всех этих расходов и вероятной степени их колебания в течение суток.

В качестве примеров на рис. 1.6 приведены графики фактического потребления воды по часам суток для населенных пунктов: с числом жителей 100 тыс.чел. (расход воды на коммунально-бытовые предприятия 12 %, удельный расход на одного жителя 260 л/сут) - рис. 1.6, а; с числом жителей 80 тыс.чел. (расход воды на коммунально-бытовые

предприятия 29 %, на нужды промышленности 12 %, удельный расход на одного жителя 320 л/сут) - рис. 1.6, б; для района города с числом жителей 5 тыс.чел. (расход воды на коммунально-бытовые предприятия 18 %, удельный расход на одного жителя 230 л/сут) - на рис. 1.6, в.



**Рис. 1.6. График расходования воды в населенных пунктах**

По этим графикам можно проследить влияние некоторых из названных выше факторов на режим водопотребления. При составлении указанных графиков исходят из предположения, что водопотребление в течение рассматриваемого часа постоянно. Изменение потребления воды в течение часа, как правило, не оказывает сколь-нибудь заметного влияния на обеспечение водой потребителей. Кроме того, развитие системы подачи и распределения воды по очередям дает возможность иметь некоторый резерв мощности системы, позволяющей обеспечивать увеличенную подачу воды в случае необходимости.

Суточное потребление воды в различные периоды года на промышленных объектах в значительной мере определяется требованиями технологического процесса. На некоторых производствах оно меняется незначительно (например, на производствах, использующих воду для отмывки продукта); на других оно весьма существенно (например, в системах кондиционирования воздуха, конденсации пара и т.п.).

Изменение расходования воды в течение суток зависит от числа смен, количества работающих в каждую смену, режима отбора воды в течение каждой смены, наличия горячих и холодных цехов и других факторов. Однако неравномерность потребления воды промышленными предприятиями в отличие от неравномерности хозяйственно-питьевого водопотребления населением может быть поставлена под определенный контроль с помощью технических решений. В ряде случаев вода из городской системы водоснабжения на нужды производства может поступать в регулирующие и запасные емкости, расположенные на территории предприятия, откуда подается местными насосными станциями. Возможно организовать подачу воды предприятиям в часы наименьшего потребления воды городом. Это способствует упорядочению суммарного графика водопотребления и повышению экономичности работы городского водопровода в целом.

Расходы на производственные нужды определяют по данным технологических расчетов или удельным нормам расходования воды на единицу выпускаемой продукции и суммарному количеству этой продукции, выпускаемой за сутки или смену. Расходы воды, отбираемой из системы на поливку улиц и зеленых насаждений, не должны попадать в часы максимума расходования воды на хозяйственно-питьевые нужды в наиболее нагруженные сутки.

Для каждой категории потребителей должны быть составлены графики потребления воды в течение суток. Для получения суммарного графика необходимо сложить ординаты

составляющих его графиков. Используя данные суммарного графика водопотребления, проводят расчеты системы на различные моменты времени.

## РАЗДЕЛ 2. СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И РЕЖИМ ИХ РАБОТЫ

### Глава 3. ОБЩАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТА

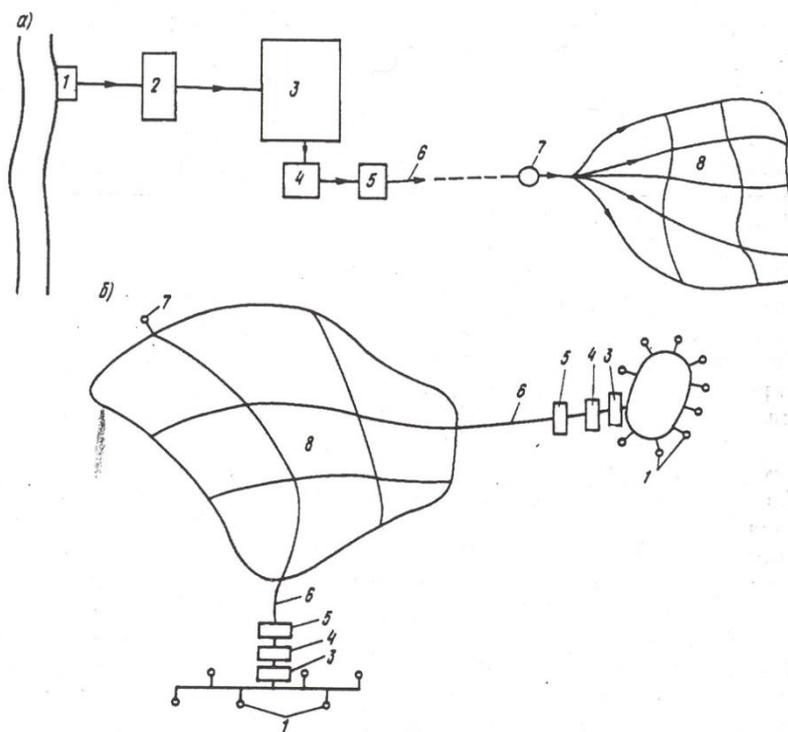
Под системой водоснабжения подразумевается комплекс сооружений, необходимых для снабжения водой потребителей в необходимом количестве, требуемого качества и под требуемым напором при обеспечении надежности их работы.

Системы водоснабжения можно разделить на хозяйственно-питьевые, производственные и противопожарные. Помимо того, вода используется для мойки улиц, проездов, площадей, а также полива зеленых насаждений и других целей. В зависимости от вида объекта, снабжаемого водой, системы бывают городскими, поселковыми, промышленными и т.п. При этом система водоснабжения может обеспечивать водой как один объект, так и группу однородных и разнородных потребителей на территории района.

На промышленных предприятиях в зависимости от схемы использования воды системы классифицируются на прямоточные, с последовательным использованием воды, оборотные и замкнутые.

В зависимости от источника питания водой объекта они подразделяются на системы, забирающие воду из поверхностных источников и из подземных источников. По способу подачи воды потребителям системы могут быть напорными и безнапорными. Возможна комбинация этих схем подачи воды. Система водоснабжения состоит из сооружений для забора воды из источника, ее транспортирования, обработки, хранения и регулирования подачи.

Вид водозаборного сооружения зависит от характера источника водоснабжения. Из поверхностных источников водоснабжения (рис. 2.1, а) забор воды осуществляется береговыми и русловыми водозаборами различных конструкций, из подземных (рис. 2.1, б) - водозаборными скважинами, шахтными колодцами, горизонтальными и лучевыми водозаборами, сооружениями для каптажа подземных вод.



**Рис. 2.1. Общая схема водоснабжения из поверхностного (а) и подземного (б) источников**

1 - водозаборное сооружение; 2, 5 - насосные станции соответственно I и II подъема; 3 - очистные сооружения; 4 - резервуар чистой воды; 6 - водоводы; 7 - напорно-регулирующая емкость; 8 - водопроводная сеть

Подъем и перекачка воды на очистные сооружения или к потребителю осуществляется насосной станцией I подъема. После прохождения процесса

кондиционирования вода подается потребителю насосной станцией II подъема. Возможно устройство нескольких последовательно или параллельно работающих станций, что определяется техническими и экономическими требованиями.

Сооружения для кондиционирования воды необходимы для доведения ее качества до требований, предъявляемых к ней абонентами. Резервуары чистой воды (сборные резервуары) служат для сглаживания неравномерности режима работы насосных станций I и II подъемов и хранения аварийных и противопожарных объемов воды.

Водоводы следует рассматривать как сооружения для транспортирования воды к местам ее распределения. Они представляют собой систему труб (напорных и безнапорных) и каналов, по которым вода поступает к городу, поселку или промышленному объекту.

Для распределения воды по территории объекта и раздачи ее потребителям устраивается водопроводная сеть. Она представляет собой систему трубопроводов, уложенных по улицам, проездам и т.д., оборудованных необходимой арматурой для целей регулирования, ремонта, отбора воды на цели пожаротушения, поливки и т.д. Сооружения для хранения и аккумуляции воды (водонапорная башня) выполняют ту же роль, что и резервуар чистой воды. Они сглаживают несовпадение режима работы насосной станции II подъема и режима водопотребления.

Место расположения водонапорной башни в значительной мере определяется рельефом местности. Как правило, ее устанавливают на возвышенных отметках с целью уменьшения строительной стоимости. Однако в общем случае место ее установки должно определяться гидравлическими и технико-экономическими расчетами систем подачи и распределения воды. Если башня на местности располагается между насосной станцией II подъема и городом (см. рис. 2.1, а), то такая система водоснабжения называется с башней в начале сети, если по схеме, показанной на рис. 2.1,б, - то системой водоснабжения с башней в конце сети. Вместо водонапорной башни может быть установлен наземный или подземный напорный резервуар, если вблизи города имеются достаточно высокие отметки земли. Емкости могут быть установлены и в промежуточное положение, если возвышенные отметки находятся в черте населенного пункта.

Расположение очистных сооружений возможно вблизи как водозаборных сооружений, так и потребителя. Это зависит от удаленности водопотребителя от источника питания, наличия строительной площадки, санитарных, технических или экономических соображений, а также качества воды в источнике.

Схема водоснабжения будет упрощена в случае соответствия качества воды в источнике требуемому. Тогда очистные сооружения могут отсутствовать. Такая схема возможна, например, при использовании артезианских вод, для которых характерно высокое санитарно-гигиеническое качество.

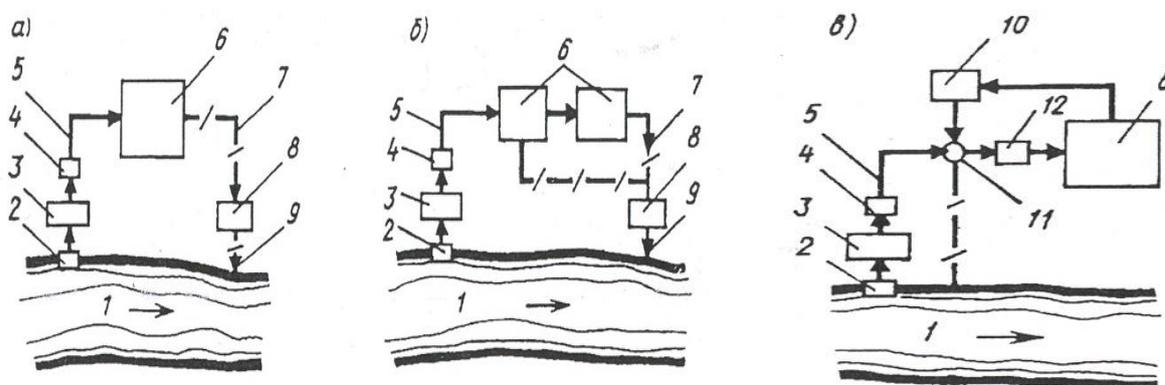
Если источник водоснабжения расположен выше отметок снабжаемой водой территории, то появляются предпосылки для подачи воды потребителю самотеком. К таким источникам относятся горные водохранилища и ключи, а также напорные артезианские воды. При этом отпадает необходимость устройства насосных станций, перекачивающих воду от источника питания до потребителя. При значительной удаленности потребителя от источника может возникнуть необходимость устройства нескольких последовательно работающих насосных станций, перекачивающих воду по водоводам. Если город имеет развитую территорию и сложный пересеченный рельеф местности, то для создания у абонентов требуемого давления устраивают несколько насосных станций.

При совпадении режима работы насосной станции и режима водопотребления необходимость устройства резервуаров и башен для целей регулирования отпадает.

Таким образом, обязательными элементами системы водоснабжения являются водозаборные сооружения, водоводы и водопроводная сеть.

Изложенные соображения относятся к системам водоснабжения как населенных пунктов, так и промышленных предприятий. Существуют, однако, системы, специально устраиваемые для целей промышленного водоснабжения (прямоточная, с повторным использованием воды, оборотная и др.). Прямоточная система (рис. 2.2, а) предусматривает забор все увеличивающихся количеств воды по мере развития промышленного предприятия. После использования в технологическом цикле вода сбрасывается в водоем. Получить необходимые количества воды часто невозможно или требуются большие капитальные затраты. Для уменьшения действия сбрасываемых загрязненных вод на качество воды в источнике приходится осуществлять их очистку, что исключительно дорого. Поэтому более перспективными являются пути уменьшения количества сбрасываемых вод.

Система повторного использования воды (рис. 2.2, б) представляет собой систему, в которой свежая вода, пройдя технологический цикл на одном из производств, участвует в технологическом процессе следующего производства. Для создания такой схемы необходимо, чтобы качество воды после использования на первом предприятии удовлетворяло требованиям технологического процесса второго производства. В противном случае требуется корректировка ее качества на очистных и охлаждающих сооружениях. Применение этой системы позволяет сократить суммарный расход свежей воды. С целью сокращения забора свежей воды из источников водоснабжения и охраны их от загрязнения широко применяются системы оборотного водоснабжения (рис. 2.2, в). Они необходимы в случае маломощности источника водоснабжения. В этой системе вода, участвующая в технологическом процессе, не сбрасывается в водоем, а после обработки вновь возвращается в производственный цикл. Потери, имеющие место в производстве, восполняются из источника.



**Рис. 2.2. Схемы производственных водопроводов**

а - прямоточная; б - с повторным использованием воды; в - оборотная; 1 - река; 2 - водозаборное сооружение; 3 - очистные водопроводные сооружения; 4 - насосная станция II подъема; 5 - водоводы; 6 - промышленное предприятие; 7 - сброс отработавшей воды; 8 - станция очистки сточных вод; 9 - сброс воды в реку; 10 - водоохлаждающее устройство; 11 - сборный резервуар; 12 - насосная станция оборотной воды

Подробно системы промышленного водоснабжения рассматриваются в курсе «Водоснабжение промышленных предприятий».

Для потребителей, расположенных на значительном расстоянии друг от друга в условиях дефицита источников водоснабжения, применяют групповые и районные системы водоснабжения (рис. 2.3). Они строятся для сельских населенных пунктов, животноводческих ферм, полевых станций, пастбищ, а также при обустройстве групп курортных поселков и объектов промышленности. Для таких условий, как правило, устраивают единые системы водоснабжения, транспортирующие воду потребителям 1 по

системе водоводов 2. Для снижения высоких давлений в водоводах, возникающих вследствие их большой протяженности, в отдельных узлах системы водоводов устанавливают резервуары 3, в которые сбрасывается вода. Вода из резервуаров забирается насосными станциями 4 и подается в последующий участок водовода, а также близлежащим потребителям.

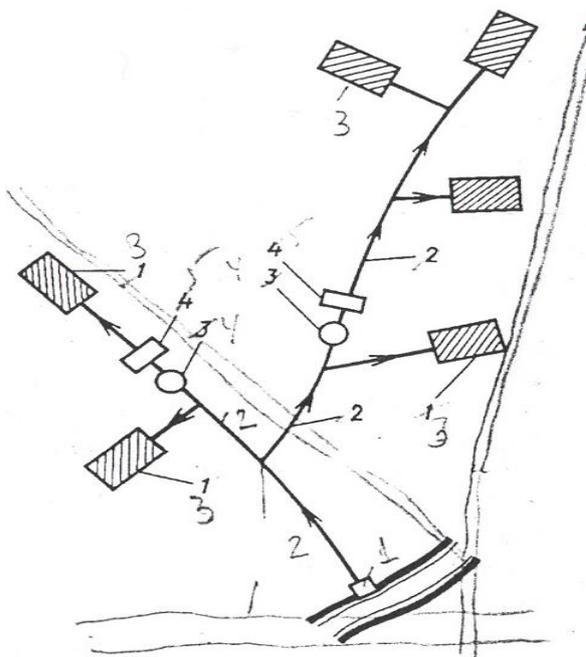


Рис. 2.3. Групповая система водоснабжения

Эти водопроводы, имеющие большую протяженность, как правило, проектируют по разветвленной схеме. Устройство кольцевой сети в этом случае приводит к значительным материальным затратам. С целью обеспечения бесперебойного снабжения водой потребителей в случае аварии на магистральных водоводах на территории объектов помимо водонапорных башен устраивают наземные резервуары. В них содержится аварийный запас воды, который может быть подан в сеть насосной станцией, расположенной рядом с ним. Возможность получения воды от двух и более источников повышает надежность водоснабжения.

Как уже говорилось, по виду потребления воды системы подразделяются на хозяйственно-питьевые, производственные, противопожарные и поливочные. Каждый из потребителей предъявляет свои требования к количеству и качеству подаваемой ему воды, напору, создаваемому в системе, и т.д. Вода к потребителю может подаваться как по единой (объединенной), так и по отдельным системам водоснабжения. В городах, как правило, устраивают единую систему водоснабжения для хозяйственно-питьевых и противопожарных целей. На хозяйственно-питьевые нужды промышленных предприятий вода также подается от городского водопровода. Вода на технологические и противопожарные нужды предприятий в зависимости от требуемого качества, экономической целесообразности и требований рационального ее использования может быть получена как от объединенной системы водоснабжения, так и от специально построенной. Забор воды на поливку может осуществляться как из городской сети, так и из постороннего источника. Вопрос об объединении систем в этом случае решается с учетом экономических, технических и санитарно-гигиенических факторов.

Система водоснабжения в процессе работы должна удовлетворять требованиям надежности и экономичности. Недоучет требований надежности при проектировании, строительстве и эксплуатации систем может привести к нарушениям нормального

водоснабжения. Под надежностью понимается способность системы обеспечивать потребителей водой в необходимых количествах, требуемого качества и под требуемым напором. Одним из показателей надежности функционирования системы может служить вероятность ее безотказной работы в течение рассматриваемого времени.

Различают технологическую и санитарную надежность. Технологическая надежность обеспечивается рядом мер на стадии проектирования, строительства и эксплуатации: созданием запасов воды в источниках водоснабжения, использованием двух и более независимых источников, увеличением числа водозаборных сооружений, прокладкой нескольких параллельно работающих водоводов, устройством кольцевых водопроводных сетей, увеличением объемов запасно-регулирующих емкостей в системе подачи и распределения воды, созданием резервных мощностей очистных сооружений, обеспечением бесперебойного энергоснабжения, разработкой математических моделей распределения воды при авариях.

К мероприятиям по повышению санитарной надежности системы водоснабжения относятся: устройство локальных прудов-водохранилищ при снабжении водой из рек и каналов, подверженных случайным залповым загрязнениям; создание системы непрерывного контроля наличия токсичных загрязнений в источнике; организация зон санитарной охраны; составление банка данных о потенциально опасных веществах, хранимых или транспортируемых на водосборной площади, которые в аварийной ситуации могут заразить источник водоснабжения; разработка моделей вероятных загрязнений водоисточника; подготовка технологии обработки воды в условиях аварийных загрязнений; устройство автоматизированных постов контроля качества воды в источнике водоснабжения выше водозаборов; предотвращение вторичного загрязнения воды в распределительной сети и регулирующих узлах; обеспечение населения питьевой водой в условиях катастроф и особо крупных аварий в системе водоснабжения.

Экономичность системы достигается принятием решений, обеспечивающих минимальные затраты на строительство и эксплуатацию при соблюдении необходимых параметров ее работы, а также требований надежности.

## Глава 4. РЕЖИМ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ .

### 4.1. РЕЖИМ РАБОТЫ ОТДЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ И ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ВЗАИМНАЯ СВЯЗЬ

Установив, расчетный график водопотребления, суточные расходы воды и взаимное расположение элементов систем водоснабжения, назначают режим работы отдельных ее сооружений. Он должен обеспечивать режим водопотребления.

Взаимосвязь режима работы системы водоснабжения (см. рис. 2.1, а), подающей воду в распределительную сеть с расчетным графиком водопотребления показана на рис. 2.4. В работе сооружений системы должна быть организована такая взаимосвязь, чтобы были обеспечены заданные требования в отношении водообеспечения потребителя. Водоприемные сооружения, насосная станция I подъема и очистные сооружения обеспечивают забор, подачу и очистку воды в объеме суточного водопотребления. Режим работы этих сооружений для средних и крупных объектов, как правило, назначается равномерным. При этом режиме (линия 1 на рис. 2.4) обеспечиваются наименьшие расчетные нагрузки указанных сооружений и их наименьшая строительная стоимость. В водопроводную сеть вода подается из резервуаров насосной станцией II подъема. При совпадении графика режима работы насосной станции II подъема (линия 2 на рис. 2.4) с графиком водопотребления водонапорная башня для целей регулирования в системе не требуется.

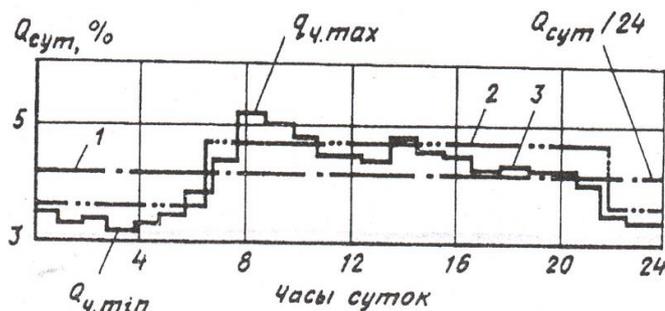


Рис. 2.4. Схема взаимосвязи режимов работы системы водоснабжения и водопотребителей  
1 и 2 - для насосных станций I и II подъема; 3 - режим водопотребления

Использование такого режима работы насосной станции при значительной неравномерности вод о потребления усложняет и удорожает эксплуатацию и строительство системы. Как правило, используется ступенчатый режим работы насосной станции II подъема (линия 2 на рис. 2.4). При этом режиме в часы максимального водопотребления насосная станция подает несколько меньшее количество воды по сравнению с требуемым. В часы минимального потребления воды подача насосов превышает потребление воды.

В первом случае недостаток воды компенсируется из водонапорной башни, во втором - избыток накапливается в резервуаре башни. Итак, в системе существуют регулирующие резервуары двух типов. К первому относится резервуар чистой воды, находящийся на границе двух зон системы. Режим работы насосной станции I подъема определяет работу сооружений первой зоны; работа сооружений второй зоны определяется режимом работы насосной станции II подъема.

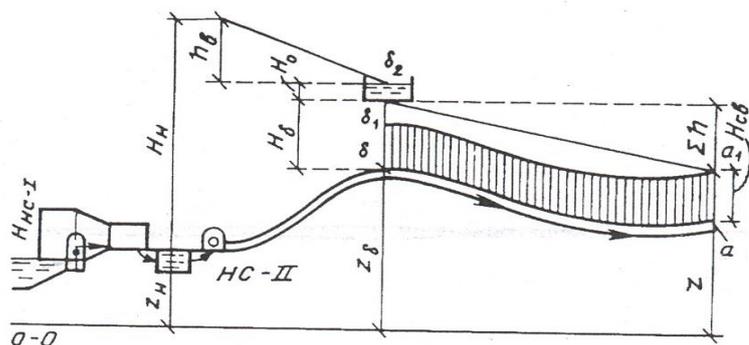
Вторым типом регулирующих резервуаров (емкостей) является водонапорная башня, находящаяся на границе зон, работа сооружений которых определяется режимом подачи воды насосной станцией II подъема и графиком водопотребления. Объем регулирующей емкости будет тем меньше, чем ближе график работы насосной станции II подъема к графику водопотребления. Это достигается увеличением ступеней графика работы насосной станции и, следовательно, установкой большего числа насосов. В любом случае

объем регулирующих емкостей должен быть достаточным для обеспечения суточного водопотребления при их совместной работе с насосными станциями.

Режим работы трубопроводов, подающих воду от водозаборных сооружений на очистные сооружения и в резервуары чистой воды, определяется режимом, работы насосной станции I подъема, а режим работы водоводов, транспортирующих воду от резервуаров чистой воды до водонапорной башни, - насосной станции II подъема. На участке от водонапорной башни до города режим работы водоводов зависит от режима водопотребления. Условия работы водонапорной башни также зависят от графика водопотребления города, а ее объем определяется путем совмещения графиков водопотребления и работы насосной станции II подъема.

К системе водоснабжения предъявляются требования, касающиеся не только подачи воды потребителям в необходимых количествах, но и напоров, которые должны быть обеспечены в точках отбора. Напор, развиваемый насосной станцией, и высота водонапорной башни должны быть достаточными для преодоления потерь напора при движении воды по трубопроводам, а также для подъема воды до наивысшей точки ее отбора и излива. Напор, необходимый в узлах сети для снабжения водой потребителей, называется требуемым «свободным напором». Его величина зависит от этажности зданий. Минимальный свободный напор в сети водопровода населенного пункта при максимальном хозяйственно-питьевом водопотреблении на вводе в здание (над поверхностью земли) при одноэтажной застройке принимается в соответствии со СНиП 2.04.02-84 не менее 10 м, при большей этажности на каждый этаж добавляется 4 м. В часы минимального водопотребления напор допускается принимать равным 3 м на каждый этаж, кроме первого.

Связь между напорами для схемы водоснабжения с башней в начале сети (см. рис. 2.1, а), на момент максимального водопотребления представлена на рис. 2.5. Она определяется положением пьезометрических линий, которые отражают падение напора в сети при движении воды от источника водоснабжения до точек сети, наиболее неблагоприятно расположенных в отношении обеспечения свободных напоров. Эти точки носят названия «диктующих» или «критических». Обычно диктующими точками являются наиболее удаленные от башни и точки отбора, имеющие наибольшие геодезические отметки земли. В них будут самые низкие пьезометрические напоры и самые малые свободные напоры.



**Рис. 2.5.** Схема взаимосвязи между напорами в системе водоснабжения с башней в начале сети

Пьезометрический напор представляет собой сумму геодезической отметки рассматриваемой точки и свободного напора в ней. Если за критическую (среди удаленных от башни) принять точку а, имеющую наибольшую геодезическую отметку  $z$ , то требуемый пьезометрический напор в ней будет равен  $z + H_{св}$ , где  $H_{св}$  - требуемый свободный напор. Свободный напор в этой точке в любой момент времени должен быть не ниже требуемого. Пьезометрическая линия  $a_1b_1$  характеризует падение напора в сети в момент максимального водопотребления. Высота водонапорной башни  $H_b$  должна быть такой, чтобы в час максимального водопотребления в точке а обеспечивался напор  $H_{св}$ .

Связь между напорами в точках  $b$  и  $a$  определяется уравнением

$$z_b + H_b = z + H_{cb} + \sum h,$$

где  $z_b$  - отметка земли в месте расположения башни;  
 $\sum h$  - потеря напора на участках сети от башни до критической точки  $a$ .

Пользуясь этим уравнением, можно определить высоту водонапорной башни

$$H_b = H_{cb} + \sum h - (z_b - z).$$

Она будет тем меньше, чем большее значение имеет величина  $z_b$ . Поэтому расположение водонапорной башни на возвышенных отметках будет приводить к уменьшению ее строительной стоимости. Если в результате расчета  $H_b < 0$ , то это указывает на то, что устройство водонапорной башни не требуется. В этом случае вместо башни устанавливается напорный резервуар, который может быть расположен на поверхности земли или быть заглубленным. Стоимость напорных резервуаров всегда меньше стоимости водонапорных башен того же объема.

Положение пьезометрической линии меняется с изменением водопотребления и степени заполнения бака. По мере уменьшения водопотребления потери напора в линиях сети и водоводов также уменьшаются и, следовательно, пьезометрическая линия будет иметь меньший уклон. Она будет поворачиваться вокруг точек  $b_1$  и  $b_2$  или их промежуточных положений. Пьезометрическая линия займет горизонтальное положение в случае прекращения отбора воды из сети, когда потери напора в ее линиях равны нулю.

Максимально допустимый напор в сети СНиП ограничивают 60 м.

Требуемый напор у насосной станции II подъема определяется из условия возможности подачи воды на отметку максимального уровня воды в баке водонапорной башни

$$H_{cb} = (z_b - z_n) + (H_b + H_o) + h_B,$$

где  $z_n$  - отметка уровня воды в резервуаре;  
 $H_o$  - расчетная высота бака башни;  
 $h_B$  - потери напора в напорных и всасывающих трубопроводах станции, включая потери в коммуникациях.

С изменением уровня воды в баке башни рабочая точка на кривой  $Q$ - $H$  насосов будет менять свое положение. Одновременно будет изменяться и подача воды насосной станцией. В результате принятый график работы насосной станции характеризует картину ее работы лишь с некоторым приближением. Реальную картину можно получить в результате гидравлических расчетов системы подачи и распределения воды в целом.

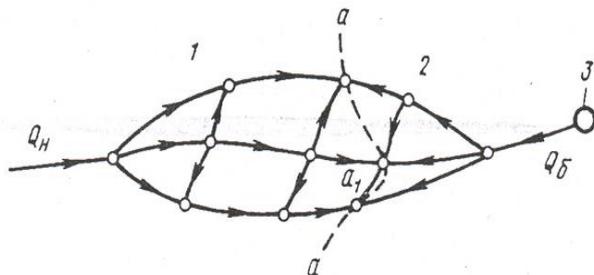
Требуемый напор насосов станции I подъема определяется аналогичным образом.

На практике возвышенные отметки снабжаемой водой территории могут находиться в противоположной от насосной станции стороне. Система водоснабжения с башней, установленной на этих отметках, называется системой с контррезервуаром (рис. 2.6). Режим работы этой системы имеет отличия от режима работы системы с башней в начале сети. При максимальном водопотреблении питание потребителей водой осуществляется с двух противоположных сторон: от насосной станции -  $Q_n$  и от водонапорной башни -  $Q_b$ . Для системы водоснабжения с башней в начале сети оно осуществляется в начальной точке сети, т.е.  $Q = Q_n + Q_b$

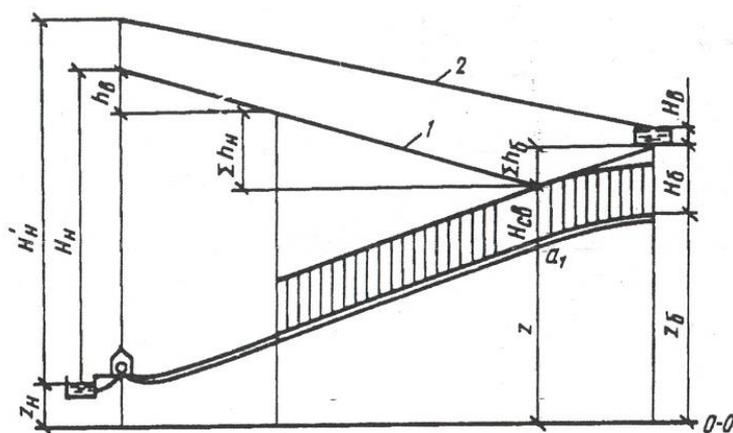
Приближенно расходы  $Q_n$  и  $Q_b$  определяются по совмещенному графику режима работы насосной станции и режима водопотребления. В системе с контррезервуаром

потоки воды от насосной станции и водонапорной башни будут направлены на встречу друг другу. Линия, проведенная через узлы, в которых произошла встреча потоков, называется границей зон питания {линия  $an$  на рис. 2.6). Критической из расположенных на этой линии точек будет та, которая имеет наибольшую геодезическую отметку.

Такой точкой на рис. 2.7 является узел  $a_1$ , с геодезической отметкой  $z$ . Требуемый свободный напор в этой точке равен  $H_{св}$ . Зная геодезические отметки расчетного уровня воды в резервуаре чистой воды  $z_n$ , земли в месте расположения башни  $z_б$ , а также потери напора  $\sum h_n$  при движении воды от насосной станции до точки  $a_1$ , и потери напора  $\sum h_б$  по пути от башни до этой точки, можно построить пьезометрические линии для часа, максимального водопотребления (линия 1 на рис. 2.7). Они будут иметь уклоны противоположных знаков и общую точку в узле  $a_1$ .



**Рис 2.6. Схема системы водоснабжения с контррезервуаром**  
1,2 - районы питания соответственно от насосов и башни 3



**Рис. 2.7. Схема взаимосвязи между напорами в системе водоснабжения с башней в конце сети**

Требуемая высота водонапорной башни  $H_б$  и необходимый напор насосов  $H_н$  определяются по выражениям:

$$H_б = H_{св} + \sum h_б - (z_б - z);$$

$$H_н = H_б + (\sum h_n + h_с - \sum h_б) + (z_б - z_n);$$

где  $h_с$  - потери напора в водоводах, соединяющих насосную станцию с сетью.

В часы, когда подача насосов в максимальной степени превышает водопотребление, избыток воды транзитом проходит через всю систему трубопроводов и поступает в резервуар водонапорной башни. Этот момент называют моментом максимального транзита. В этом случае пьезометрическая линия приобретает уклон одного знака (линия 2 на рис. 2.7). Напор на насосной станции в этот момент больше напора в час максимального водопотребления. Это вызывается возрастанием потерь напора в сети из-за увеличения пути транспортирования воды, а также ее количества в районе границы зон питания.

Приведенные схемы водоснабжения не ограничивают их многообразия. Они определяются рядом факторов: числом источников питания, местом их расположения, конфигурацией территории, ее рельефом и т.д.

## 4.2. РАБОТА СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ПОЖАРА

Для создания более жестких условий в отношении нагрузок на систему водоснабжения нормами проектирования предусматривается возможность возникновения пожара в часы максимального водопотребления. В результате такого предположения отбираемые расходы воды из сети возрастают. Это приводит к росту потерь напора в линиях сети и расходов, подаваемых насосной станцией.

Число пожаров и объемы воды для пожаротушения определяются в соответствии с требованиями СНиПа. В качестве мест пожара выбираются узлы сети, наиболее удаленные от источника питания системы с максимальными геодезическими отметками. Если однозначно выбрать эти узлы нельзя, то проводят гидравлические расчеты с альтернативными вариантами. Анализ их результатов позволяет выбрать вариант, который является диктующим.

По способу тушения пожара системы разделяют на системы пожаротушения высокого и низкого давления. В системах первого вида водопровод в момент пожара должен обеспечивать подачу воды при давлениях, достаточных для создания струй непосредственно от гидрантов. Эти системы используются на промышленных предприятиях с высокой пожарной опасностью. В системах водоснабжения городов и населенных пунктов, как правило, применяются системы пожаротушения низкого давления. При их устройстве требуется, чтобы в момент пожара свободные напоры во всех узлах сети были не ниже 10 м.

Известны различные схемы хранения противопожарного запаса воды. При хранении воды в резервуарах чистой воды насосная станция II подъема должна обеспечивать подачу, равную сумме хозяйственно-питьевой и противопожарной потребности. Если схемой водоснабжения предусмотрено устройство напорных регулирующих резервуаров, противопожарный запас может храниться в них. Тогда противопожарный расход подается из напорных резервуаров, а на хозяйственно-питьевые нужды вода поступает от насосной станции II подъема. Возможна схема, при которой часть противопожарного запаса хранится в резервуарах чистой воды вблизи насосной станции II подъема, а часть - в напорно-регулирующих емкостях.

Рассмотрим режимы пожарной работы водопровода (рис. 2.8) в системах высокого и низкого давлений. Предположим, что сеть должна быть рассчитана на пожар при наличии системы высокого давления.



Пожар происходит в наиболее возвышенной из удаленных точек сети  $N$  в момент максимального хозяйственно-питьевого водоразбора. При этом в узле  $N$  должен быть обеспечен свободный напор  $H^{п.в.}_{св}$  который превышает свободный напор при режиме хозяйственно-питьевого водоснабжения  $H^{х-п.}_{св}$ . Потери напора в сети  $h^{п.в.}_c$  и в водоводах  $h^{п.в.}_в$  в момент пожара при тех же диаметрах труб будут больше потерь напора  $h^{х-п.}_c$  и  $h^{х-п.}_в$  при хозяйственно-питьевом режиме работы. Следовательно, пьезометрическая линия 1, соответствующая моменту пожара, будет проходить выше линии 2 момента хозяйственно-питьевого водопотребления. Поэтому требуемый напор на насосной станции при пожаре  $H^{п.в.}_н$  больше напора  $H^{х-п.}_н$ .

Обычно при системе высокого давления напор, получающийся в этом случае у башни, превосходит ее высоту, и башня на время пожара должна быть выключена. Иначе невозможно будет поднять давление в сети за башней до необходимой при пожаре величины. В самой башне, если она не выключена, при увеличении напора у насосов будет наблюдаться усиленное поступление воды в бак, которое может повлечь переполнение бака.

В системе низкого давления при пожаре в узле  $N$  устанавливается свободный напор  $H^{п.н.}_{св} = 10$  м, который ниже  $H^{х-п.}_{св}$  или равен ему. В результате возросших расходов воды при пожаре по сравнению с режимом нормального хозяйственно-питьевого водопотребления потери напора в водоводах  $h^{п.н.}_в > h^{х-п.}_в$  и  $h^{п.н.}_c > h^{х-п.}_c$  и, следовательно, уклон пьезометрической линии (3 и 3') при пожаре больше уклона пьезометрической линии 2. Соотношение между указанными потерями напора, а также между  $H^{х-п.}_{св}$  и  $H^{п.н.}_{св}$  влияет на положение пьезометрической линии (3 и 3') относительно бака башни. Если она пройдет выше башни, то требуемый свободный напор ( $H^{п.н.}_{св} = 10$  м) в узле будет обеспечен, когда башня отключена от водоводов. В противном случае, как и при системе высокого давления, в узле  $N$  невозможно обеспечить требуемый свободный напор. Если пьезометрическая линия пройдет ниже бака башни, то последняя может продолжать работать.

Отличие расчета пожара при схеме с контррезервуаром от рассматриваемой выше будет заключаться в том, что отметка контррезервуара, определенная в результате хозяйственно-питьевого расчета сети, обычно будет превышать напор около башни, полученный при пожарной работе. В силу этого в указанных схемах башня большей частью может во время пожара не выключаться. Однако поскольку в городских водопроводах запас воды на тушение пожара обычно хранят не в башне, а в резервуарах чистой воды у насосной станции II подъема, в этом случае работа сети при пожаре не отражается на высоте башни. Требуемый напор противопожарных насосов определяется по ранее приведенным формулам.

#### **4.3. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕГУЛИРУЮЩИХ, ПРОТИВОПОЖАРНЫХ И АВАРИЙНЫХ ОБЪЕМОВ ЕМКОСТЕЙ**

При проектировании системы водоснабжения приходится проводить гидравлические расчеты при различных нагрузках водопотребления. В пределах рассматриваемой очереди развития расчетным моментом является последний расчетный год. Он определяет средний за год расчетный суточный расход воды  $Q_{сут}$ , который позволяет, зная коэффициенты неравномерности  $K_{сут.max}$  и  $K_{сут.min}$ , найти максимальный  $Q_{сут.max}$  и минимальный  $Q_{сут.min}$  суточные расходы. Все сооружения системы водоснабжения рассчитывают при нагрузках, соответствующих суткам максимального водопотребления в соответствии с графиком водопотребления. В пределах этих суток обязательно должны быть проведены расчеты на час максимального, среднего и минимального водопотребления. Также проводят расчеты на суммарный максимальный расход населенного пункта и расхода воды на

пожаротушение. В пределах этих суток в случае необходимости могут проводиться расчеты и при других режимах водопотребления. Например, при расчете безбашенных систем водоснабжения. По результатам этих расчетов определяют параметры этих элементов системы.

Необходимо также проводить расчеты на момент минимального водопотребления в сутки минимального водопотребления (при выбранных параметрах системы). Они позволяют определить наибольшие напоры в линиях сети, возникающие в эти часы. Кроме того, проводят расчеты на среднечасовой расход воды в сутки среднего водопотребления, по которым оценивают затраты энергии на подъем воды и т.д.

Ряд проведенных расчетов позволяет выбрать оборудование системы, обеспечивающее как ее работоспособность, так и экономичность. Помимо этого, необходимо выполнять расчеты, обосновывающие мероприятия по обеспечению водой потребителей в заданных пределах в случае возникновения аварий.

Объем резервуаров в системах водоснабжения в зависимости от назначения должен включать регулирующий, противопожарный, аварийный объемы и технологический объем воды на станциях водоподготовки. Регулирующий объем определяется на основании графиков поступления и отбора воды. Для соблюдения баланса воды суточная подача насосной станции II подъема должна равняться максимальному суточному расходу. Можно составить сколь угодно графиков работы насосной станции II подъема, формально удовлетворяющих работу водопровода. Из всего многообразия должен быть выбран такой график работы насосов и соответствующий ему объем бака башни, который давал бы наиболее экономичное решение проектируемого водопровода.

В реальной практике объем бака водонапорной башни зависит от характера графика водопотребления, подачи насосов, установленных на станции II подъема, и назначаемого режима работы их в течение суток. Это резко снижает возможное число реальных графиков работы насосной станции.

Регулирующий объем может быть определен в табличной и графической форме, а также по формулам. В табл. 2.1 дан пример определения регулирующего объема бака водонапорной башни.

Режим водопотребления населенного пункта в процентах суточного расхода приведен в графе 4. Приведены два варианта режима работы насосной станции: равномерный (графа 2) и ступенчатый (графа 3). В графах 5-8 даны разности значений между водопотреблением и подачей воды насосами по вариантам. Требуемый регулирующий объем определяется по остатку воды в баке (графы 9 и 10). Для вычисления остатка воды необходимо наметить моменты, когда бак пуст.

Таблица 2,1

Часы суток	Подача насосами, %, при работе		Водопотр ебление, %	Приток в бак, %, при работе		Расход из бака, %, при работе		Остаток в баке, %, при работе	
	равномер ной	ступенчат ой		равном ерной	ступенча той	равномер ной	ступенча той	равномерно й	ступенча той
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0-1	4,17	2	1,5	2,67	0,5			8,81	1,0
1-2	4,17	2	1,5	2,67	0,5	-	-	11,48	1,5
2-3	4,17	2	1,5	2,67	0,5	-	-	14,15	2,0
3-4	4,17	2	1,5	2,67	0,5	-	-	16,82	2,5
4-5	4,17	2	2,5	1,67	-	-	0,5	18,49	2,0
5-6	4,17	2	3,5	0,57	-	-	1,5	19,16	0,5
6-7	4,17	6	4,5	-	1,5	0,33	-	18,83	2,0
7-8	4,17	6	5,5	-	0,5	1,33	-	17,50	2,5
8-9	4,17	6	6,25	-	-	2,08	0,25	15,42	2,25
9-10	4,17	6	6,25	-	-	2,08	0,25	13,34	2,0
10-11	4,17	6	6,25	-	-	2,08	0,25	11,26	1,75
11-12	4,17	6	6,25	-	-	2,08	0,25	9,18	1,5
12-13	4,17	6	5	-	1	0,83	-	8,35	2,5
13-14	4,17	6	5	-	1	0,83	-	7,52	3,5
14-15	4,17	6	5,5	-	6,5	1,33	-	6,19	4,0

15-16	4,17	6	6	-	-	1,83	-	4,36	4,0
16-17	4,16	6	6	-	-	1,84	-	2,62	4,0
17-18	4,16	6	5,5	-	0,5	1,34	-	1,28	4,5
18-19	4,16	6	5	-	1	0,84	-	0,44	5,5
19-20	4,16	2	4,5	-	-	0,34	2,5	0	3,0
20-21	4,16	2	4	0,16	-	-	2,0	0,16	1,0
21-22	4,16	2	3	1,16	-	-	1	1,32	0
22-23	4,16	2	2	2,16	-	-	-	3,48	0
23-24	4,16	2	1,5	2,66	0,5	-	-	6,14	0,5

При равномерной работе насосов его можно ждать в период от 19 до 20 часов, а при ступенчатой - с 22 до 23 часов. Затем, прибавляя или вычитая, соответственно, значения притока и расхода воды, можно определить ее остаток в баке к концу каждого часа. Требуемый регулируемый объем бака равен наибольшему остатку воды в нем. По данным табл. 2.1, регулирующий объем бака составляет при равномерном режиме работы насосов - 19,16 %, а при ступенчатой работе - 5,5 %. Как видно, при ступенчатой работе насосов объем бака значительно меньше. Если допущена ошибка при назначении часа, когда бак пуст, то некоторые из цифр граф 9 и 10 получают отрицательное значение. В этом случае нет необходимости в пересчете, так как вместимость бака будет выражаться суммой абсолютных наибольших положительного и отрицательного значений этих граф.

Регулирующий объем резервуара чистой воды при очистных сооружениях может быть определен совмещением графиков режима работы насосных станций I и II подъема. На рис. 2.9 приведен интегральный график, соответствующий подаче воды насосной станцией II подъема, приведенной в графе 3 табл. 2.1. Подача воды насосной станцией I подъема характеризуется прямой 2, отвечающей равномерному режиму работы в течение суток. Регулирующая емкость определяется как сумма абсолютных значений разностей ординат кривых 1 и 2, т.е.  $13,02 + 11,29 = 24,31$  % суточного расхода.

Если графики водопотребления и подачи воды отсутствуют, то регулирующий объем может быть определен по формуле:

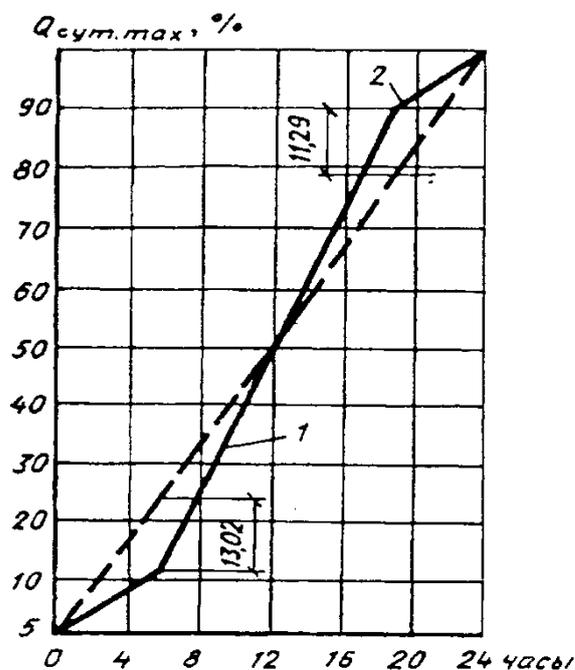


Рис. 2.9. Интегральный график водопотребления

$$W_p = Q_{\text{сут.мах}} [1 - K_n + (K_n - 1) (K_n / K_n)^{K_n / (K_n - 1)}],$$

где  $Q_{\text{сут.мах}}$  - расход воды в сутки максимального водопотребления, м<sup>3</sup> /сут;  
 $K_n$  - отношение максимальной часовой подачи воды в регулирующую

емкость при очистных сооружениях или в водопроводную сеть с регулирующей емкостью к среднему часовому расходу в сутки максимального водопотребления;

$K_{\text{ч}}$  - коэффициент часовой неравномерности отбора воды из регулирующей емкости или сети водопровода с регулирующей емкостью, определяемый как отношение максимального часового отбора к среднему часовому расходу в сутки максимального водопотребления

Пользуясь формулой, можно определить суммарный регулируемый объем резервуаров чистой воды и водонапорных башен. Этот объем в процессе проектирования можно перераспределять в различных соотношениях между отдельными регулирующими емкостями, исходя из технических и экономических принципов.

Так как намеченные графики режима работы насосов являются достаточно приближенными, то регулируемый объем, определенный любым методом, нельзя считать абсолютно точным. Вследствие непрерывного изменения водопотребления потери напора в линиях сети и давления в узлах также изменяются. Это приводит к изменению подачи воды насосами по сравнению с предполагаемой. Уточненный режим работы насосов, сети и регулируемых емкостей, найденный путем проведения необходимых гидравлических расчетов, позволяет скорректировать определенные ранее объемы резервуаров.

Противопожарный запас воды, хранящийся в резервуарах, определяется из условия обеспечения пожаротушения из наружных гидрантов, внутренних пожарных кранов и специальных средств пожаротушения (если последние не имеют собственных резервуаров). Кроме того, в этот расход должны быть включены объемы воды на наибольшие хозяйственно-питьевые и производственные нужды в период пожаротушения.

В баках водонапорных башен пожарный объем определяется из условия 10-минутной продолжительности тушения одного наружного и одного внутреннего пожаров при одновременном наибольшем расходе на другие нужды.

При прокладке водоводов в одну нитку в резервуарах, расположенных в населенном пункте, должен храниться аварийный запас воды на хозяйственно-питьевые нужды в размере 70 % расчетного среднесуточного водопотребления, а также на производственные нужды по аварийному графику.

На водопроводных станциях подготовки воды в емкостях должен содержаться запас воды на промывку фильтров, а также на обеспечение требуемого времени контакта воды с реагентами.

### **РАЗДЕЛ 3. СИСТЕМЫ ПОДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ**

#### **Глава 5. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВОДОВОДОВ И ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ**

##### **5.1. ТИПЫ ВОДОВОДОВ И ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ**

Транспортирование воды к потребителям осуществляется по водоводам и водопроводным сетям. Они должны отвечать определенным требованиям надежности и экономичности. Это достигается правильным выбором трассы водоводов и конфигурации сети, материала и диаметров труб, режима их работы. При выборе, отводе и использовании земель под трассы водоводов должны соблюдаться Основы земельного законодательства и ряд нормативных актов. В соответствии с этими документами водоводы, как правило, должны прокладываться вблизи дорог с учетом границ землепользования и севооборотов. Если это приводит к значительному удлинению трассы, необходимо технико-экономическими расчетами обосновать ее начертание с учетом

дополнительных расходов на временное использование посевных площадей и потерю посевов в случае ликвидации аварий.

Водоводы прокладывают в одну, две и более ниток. Их целесообразно прокладывать на относительно возвышенных отметках местности с минимальным числом искусственных сооружений, в местах, доступных для эксплуатации и производства ремонтных работ. Для обеспечения заданного уровня снабжения водой потребителей между параллельно уложенными водоводами устраивают переключения, а вдоль трассы и на территории объекта могут устанавливаться емкости.

Водоводы по способу транспортирования воды бывают напорными и безнапорными. Перекачка воды по напорным водоводам может осуществляться насосами или в результате разницы пьезометрической отметки уровня воды в источнике и расчетной пьезометрической отметки в месте водоотбора. Первые водоводы называются нагнетательными; вторые - гравитационными напорными или самотечно-напорными.

Безнапорные водоводы (гравитационные самотечные) работают неполным сечением. Область их применения не столь велика по сравнению с напорными водоводами. Их применение зависит от разности отметок начальной и конечной точек пути подачи воды, рельефа местности, расстояния между узлами подачи и отбора воды. Использование безнапорных труб приводит к уменьшению единичной стоимости таких водоводов по сравнению с напорными. Однако увеличение протяженности трассы из-за необходимости обеспечения требуемых уклонов может привести к возрастанию их общей строительной стоимости.

Водопроводная сеть устраивается для транспортирования и отдачи воды потребителям по всей территории объекта. Конфигурация сети зависит от планировки объекта, формы его поверхности, наличия естественных и искусственных препятствий, рельефа местности, расположения крупных потребителей воды, места расположения источника водоснабжения и т.д. По конфигурации сети бывают кольцевыми, разветвленными и смешанными. Кольцевые сети, имеющие более высокую стоимость по сравнению с другими, обладают более высокой надежностью в снабжении водой. Линии сети, транспортирующие основные потоки воды, называются магистральными. Вне зависимости от типа сети магистрали должны прокладываться в направлении основных потоков воды и охватывать всю территорию населенного пункта. Различные типы кольцевых сетей приведены на рис. 3.1.

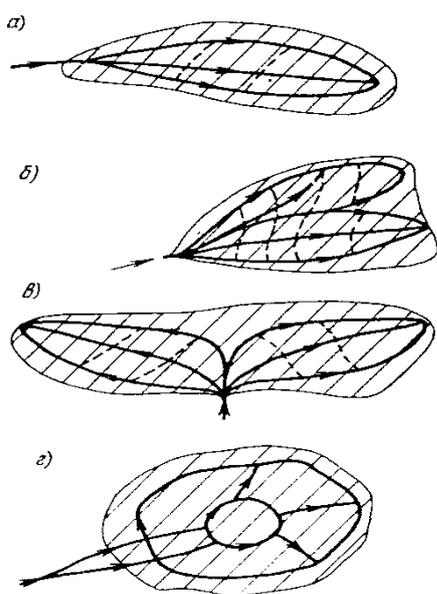


Рис. 3.1. Типы кольцевых сетей

Показанные на рис. 3.1, а расположение узла питания и форма территории, снабжаемой водой, позволяют ограничиться несколькими магистралями в виде пучка

линий вдоль города, идущих из узла питания. При территории населенного пункта, имеющего расширение по мере удаления от источника, расположение магистралей может иметь вид, приведенный на рис. 3.1, б. Если территория города растянута в направлении, перпендикулярном направлению подачи воды, то начертание основных линий сети имеет вид, показанный на рис. 3.1, в. На рис. 3.1, г показана система основных линий в виде концентрически расположенных колец, питаемых системой водоводов и соединенных рядом радиальных магистралей.

При наличии нескольких источников питания или нескольких регулирующих емкостей конфигурация магистральной сети должна учитывать эти обстоятельства.

В кольцевых сетях помимо магистралей имеются перемычки, предназначенные в основном для перераспределения воды между магистралями при аварии на одной из них. Перемычки на рис. 3.1, а-в показаны в виде пунктирной линии.

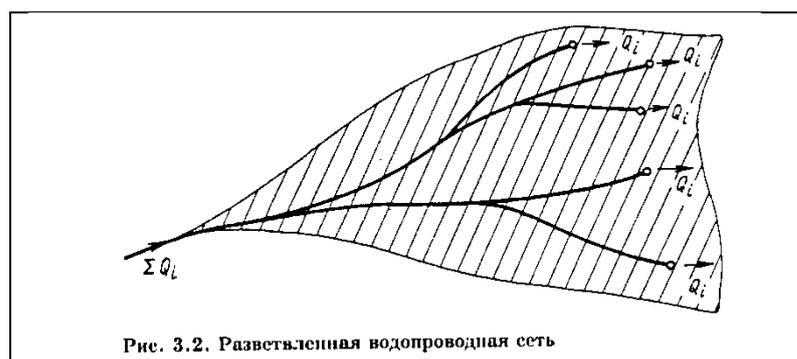
Вода от магистральной сети к домовым ответвлениям и пожарным гидрантам подается по распределительной сети, прокладываемой почти по каждой улице и проезду. Распределительная сеть оказывает существенную помощь системе магистральных линий во время аварии при переброске расходов с одних магистралей на другие.

Отбор воды может происходить и от линий магистральной сети, если их диаметры невелики. При больших диаметрах магистралей экономически оправдано применение так называемых «сопровождающих» линий, прокладываемых между узлами параллельно участку магистрали. К этим линиям присоединяются домовые ответвления.

Если в сети водопровода не выделять магистральную сеть и предполагать, что все линии сети должны участвовать в транспортировании транзитных расходов воды, то мы получим «обезличенную» сеть. В этой сети стирается различие в магистральных и распределительных линиях и диаметры всех линий должны определяться расчетом.

Обычно гидравлическому и технико-экономическому расчетам подвергаются магистральные сети, что значительно облегчает процесс их проведения, анализ результатов расчетов и принятие решений.

Система магистральных линий и перемычек образует кольца, как правило, имеющие удлиненную форму, вытянутую в направлении основного потока воды. Распределительная сеть, примыкающая к магистральной, будет в основном также представлять систему взаимно перекрещивающихся линий.



При устройстве разветвленной сети (рис. 3.2) подача воды потребителю возможна по единственному направлению. Авария на любом участке этой сети приводит к перерыву подачи воды потребителям, находящимся за местом ее возникновения. Отсюда следует, что надежность кольцевых сетей выше, чем разветвленных. Применение последних возможно на объектах, допускающих перерыв в подаче воды на период ликвидации аварии. Обеспечение надежности работы разветвленных сетей достигается устройством аварийных резервуаров.

Устройство смешанных сетей, представляющих собой комбинацию кольцевых и разветвленных сетей, можно рассматривать в большинстве случаев как временную меру

снабжения водой до превращения сетей в кольцевые при дальнейшем развитии водопровода.

## 5.2. МОДЕЛЬ ОТБОРА ВОДЫ ИЗ ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ

После установления геометрических параметров сети намечают места и значения подач и отборов воды. На основании графика водопотребления и режима работы водопитателей устанавливают расходы воды, поступающие в сеть. Действительная картина отбора воды из сети может быть представлена лишь для объектов с небольшим числом потребителей. Вследствие того, что число точек отбора воды из сети городского водопровода (число домовых ответвлений) очень велико и режим отбора воды в них очень разнообразен, учесть при расчете сети действительную картину водоразбора практически невозможно.

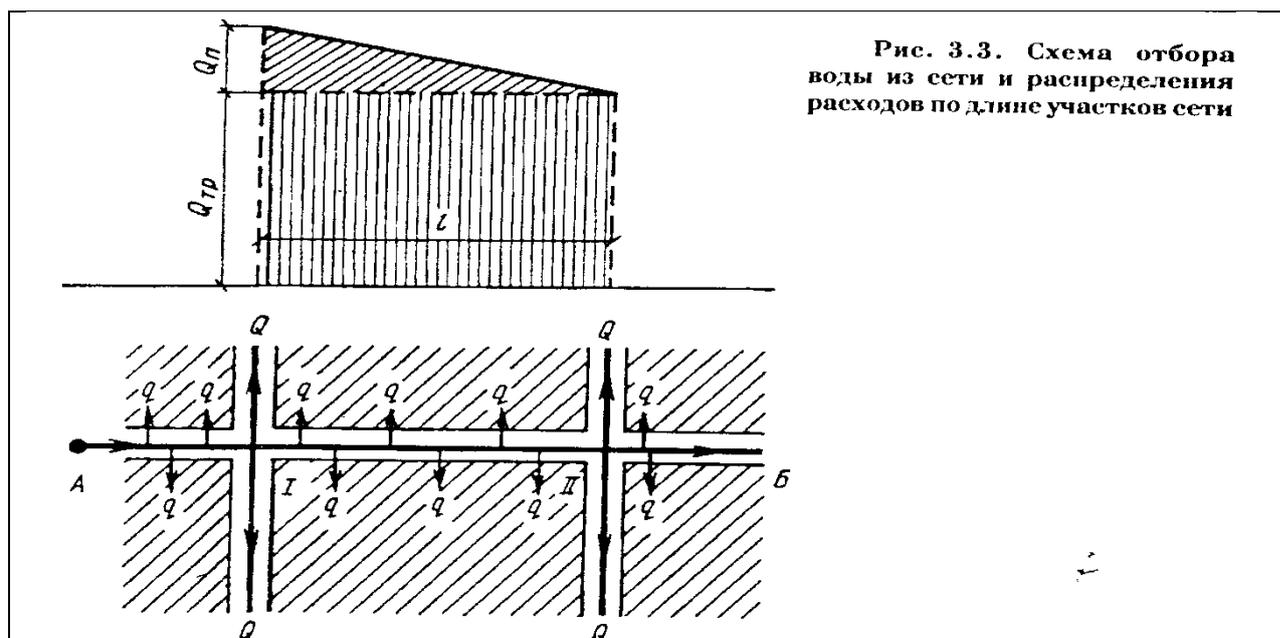


Рис. 3.3. Схема отбора воды из сети и распределения расходов по длине участков сети

Поэтому при гидравлическом расчете сети применяется упрощенная условная схема отбора воды из сети, наиболее близко соответствующая вероятной картине водоразбора из сети.

Рассмотрим один из участков А-І распределительной сети (рис. 3.3). Под участком сети подразумевается линия, ограниченная двумя узлами сети. Между точками А и І в отдельных местах отбора наблюдаются различные расходы  $q$ . Это же характерно и для всех остальных участков распределительной сети А-Б. Линия А-Б может питать водой не только вводы, но и присоединяемые к ней распределительные линии, транспортирующие расходы  $Q$ . Упрощенная схема предусматривает, что подаваемая в сеть вода расходуется равномерно по ее длине. Расход, приходящийся на единицу длины сети, называется удельным расходом. В сумму равномерно распределенных расходов не включаются крупные сосредоточенные расходы, к которым относятся расходы воды отдельных крупных предприятий и противопожарные расходы.

Удельный расход  $q_{уд}$  определяют по формуле

$$q_{уд} = (Q - Q_{собр}) / \sum l,$$

- где
- $Q$  - общий расход воды, отдаваемый сетью, л/с;
  - $Q_{собр}$  - сосредоточенные расходы на производственные нужды крупных предприятий, противопожарные расходы, л/с;
  - $\sum l$  - суммарная длина линии, разводящих воду, м.

В сумму длин  $\sum l$  не входят длины линий водоводов и сетей, проходящих по незастроенной территории, которые не отдают воду потребителям по пути. Удельный расход меняется с изменением режима водопотребления и плотности населения.

Одним из недостатков разбивки расхода пропорционально длинам линий является то, что длина линии еще не определяет число снабжаемых водой жителей и, следовательно, количество отдаваемой воды. При одной и той же длине линии могут снабжать водой различную площадь и различное число жителей. Уточнение расчета может быть достигнуто, если удельный расход определять не на единицу длины сети, а на единицу площади территории снабжаемой водой кварталов населенного пункта.

Если всю водопроводную сеть разбить на участки, то суммарный равномерно распределенный расход будет равен сумме расходов по всем участкам. Расход воды, отдаваемый каждым участком, называется путевым расходом. Он равен:

$$Q_{\text{п}} = q_{\text{уд}} l.$$

Сумма всех путевых и сосредоточенных расходов равна полному расходу  $Q$  в расчетный момент времени.

По каждому участку сети, кроме путевого расхода  $Q_{\text{п}}$ , пропускается транзитный расход  $Q_{\text{тр}}$ , необходимый для питания последующих участков. При этом расход в начале участка составляет  $Q_{\text{п}} + Q_{\text{тр}}$ , а в конце -  $Q_{\text{тр}}$ . Транзитный расход постоянен для рассматриваемого участка. Графическое изображение этих расходов на участке сети длиной  $l$  м на рис. 3.3.

При гидравлическом расчете используются расчетные эквивалентные расходы, заменяющие переменные путевые и постоянные транзитные расходы. При этой замене потери напора в линиях сети, определенные по расчетным расходам, равны потерям, вычисленным по путевым и транзитным расходам.

Расчетный расход  $Q_{\text{р}}$  участка, имеющего путевой расход  $Q_{\text{п}}$  и транзитный  $Q_{\text{тр}}$ , может быть вычислен по формуле Дюпюи

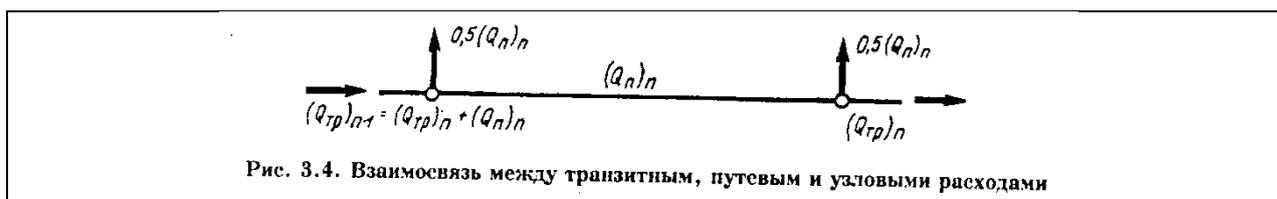
$$Q_{\text{р}} = Q_{\text{тр}} + \alpha Q_{\text{п}},$$

где  $\alpha$  - коэффициент, зависящий от соотношения транзитного и путевого расходов участка и изменяющийся от 0,5 до 0,58.

В практике расчета коэффициент  $\alpha$  принимают равным 0,5. Тогда

$$Q_{\text{р}} = Q_{\text{тр}} + 0,5Q_{\text{п}}.$$

Путевые расходы для удобства расчетов заменяют узловыми расходами. Пусть некоторый участок (рис. 3.4) имеет путевой расход  $(Q_{\text{п}})_{\text{п}}$



Транзитный расход на предыдущем  $n - 1$ -м участке равен сумме путевого и транзитного расходов данного  $n$ -го участка:

$$(Q_{\text{тр}})_{n.1} = (Q_{\text{тр}})_n + (Q_n)_n.$$

Те же расчетные расходы будут получены, если разбить путевой расход  $(Q_n)_n$  пополам и отнести 0,5  $(Q_n)_n$  в начальную и конечную точки рассматриваемого участка. При такой схеме отдачи расчетный расход данного участка будет таким же:

$$(Q_p)_n = (Q_{\text{тр}})_n + 0,5 (Q_n)_n.$$

Отбор воды в любом узле сети может быть определен по формуле

$$q = 0,5 \sum Q_n,$$

т.е. сосредоточенный отбор в узле сети равен полусумме путевых расходов всех участков, примыкающих к данному узлу. При этом расчетные расходы участков равны их транзитным расходам. Последние определяют в соответствии с предварительным потокораспределением воды по линиям сети.

Следующим упрощением схемы отбора воды является отсутствие учета влияния на отбор давления в сети. В реальности всякое изменение давления в различных точках системы приводит к изменению отбора, а изменение расхода в свою очередь приводит к изменению давления. При расчетах водопроводных сетей эту зависимость для большинства потребителей не учитывают, т.е. принимают отборы в виде фиксированных значений. В значительной мере данное предположение оправдывается корректировкой расхода и давления самим потребителем. Если в системе повышается давление, то и из водопроводных кранов идет чрезвычайно сильная струя. В этом случае абонент прикрывает кран. При снижении давления, когда уменьшается расход, он открывает кран в большей мере.

В некоторых случаях нельзя не учитывать влияние давления в системе водоснабжения на отбор воды. Например, нежелательно пренебречь его влиянием на отборы, которые осуществляются при свободном (нерегулируемом автоматически) изливе воды в регулирующие и запасные емкости городского водопровода и промышленных предприятий. Отборы воды из сети станциями подкачки, пожарными насосами также изменяются при изменении давления в сети.

Отборы воды, для которых при расчете сети необходимо учитывать влияние изменений давления в системе водоподдачи и распределения, называются нефиксированными. Для них при расчете системы подачи и распределения должна быть учтена функциональная связь расхода и давления.

Необходимо подчеркнуть особенности отдачи воды, связанные с утечками. Они наблюдаются в системах внутреннего водоснабжения из-за неудовлетворительной работы водоразборной арматуры. Утечки возрастают ночью, когда давление в сети повышается из-за снижения общего водопотребления. Они сильно влияют на коэффициент неравномерности водопотребления в течение суток в сторону снижения.

### 5.3. ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАМЕТРОВ ТРУБ ВОДОПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ

Зная расход воды, протекающей по трубопроводу, выбирают его диаметр. Решение этой задачи связано с отысканием минимума приведенных затрат  $P_{\text{пр}}$  на строительство  $P_{\text{ст}}$  и эксплуатацию  $P_{\text{эк}}$  за расчетный срок  $T_{\text{ок}}$ . Приведенные затраты представляются выражением

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{ст}}/T_{\text{ок}} + P_{\text{эк}}.$$

Величина  $P_{ст}$  определяется стоимостью труб, их транспортировки, разработки траншей, укладки и т.д. Эксплуатационные затраты  $P_{эк}$  - сумма двух составляющих: стоимости энергии  $P_{эл}$ , затрачиваемой на преодоление потерь напора в трубопроводе и подъем воды на заданную отметку, а также затрат  $P_a$ , представляющих суммарную стоимость работ по ремонту и отчислений на амортизацию. Величина  $P_a$  принимается как процент  $R$  от стоимости  $P_{ст}$ , т.е.  $RP_{ст}/100 = P_a$ .

$$P_{пр} = P_{ст}/T_{ок} + P_{ст}R/100 + P_{эл} =$$

$$= P_{ст}(1/T_{ок} + R/100) + P_{эл}.$$

Выражение

$$Q = \omega v = \frac{\pi}{4} d^2 v,$$

где  $\omega$  - площадь поперечного сечения трубы;  
 $d$  - диаметр трубы;  
 $v$  - скорость движения воды, определяет взаимосвязь между диаметром трубопровода  $d$  и расходом воды  $Q$ .

Из этой формулы следует, что возрастание скорости приводит к уменьшению диаметра трубопровода и, наоборот, увеличение диаметра приведет к уменьшению скорости движения воды. То и другое оказывает влияние на приведенные затраты.

Потери напора в напорных трубопроводах определяют по формулам гидравлики:

$$h = \lambda v^2 l / (2gd); h = KQ^{-\beta} l/d^m,$$

где  $\lambda$  и  $K$  - коэффициенты потерь напора ( $K = 8 \lambda / q \pi^2$ );  
 $l$  - длина трубопровода;  
 $\beta$  и  $m$  - показатель степени при расходе и диаметре;  
 $g$  - ускорение свободного падения.

С возрастанием скорости движения воды в трубопроводе потери напора растут. Это приводит к увеличению требуемой мощности насосных агрегатов, подающих воду:

$$N = Q(H_0 + h)/(102 \eta)$$

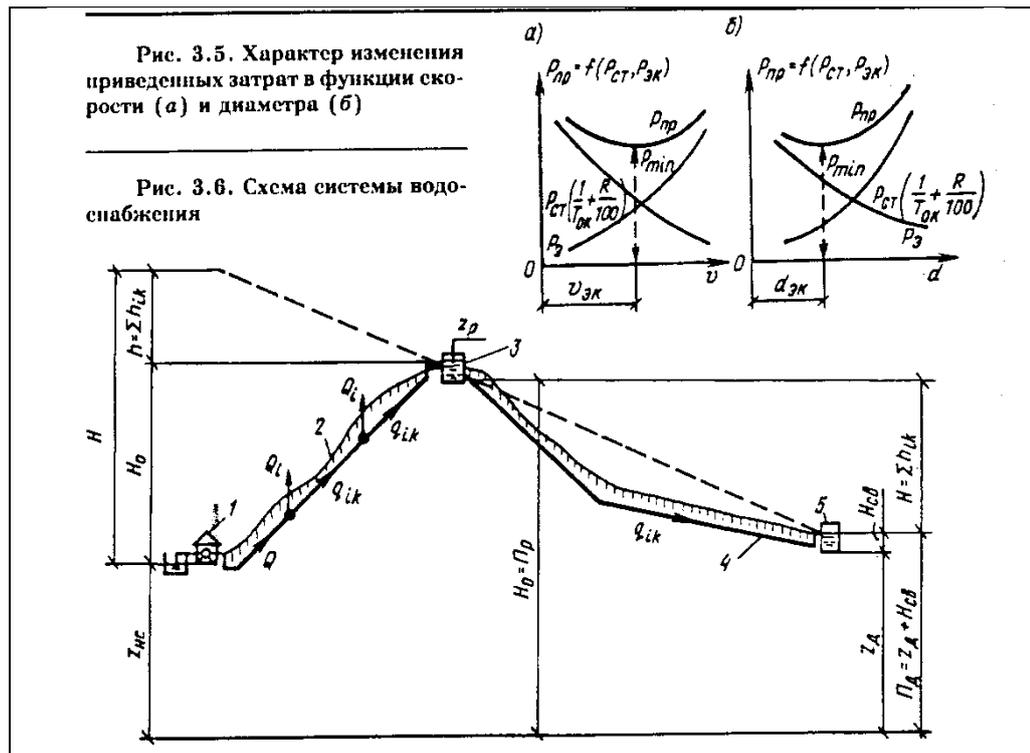
где  $H_0$  - геометрическая высота подъема воды;  
 $\eta$  - КПД насосных агрегатов.

В результате растут затраты энергии на подъем воды  $P_{эл}$ . Одновременно с увеличением скорости  $v$  происходит уменьшение требуемого диаметра  $d$  труб для транспортирования расхода  $Q$ , а следовательно, уменьшается строительная стоимость трубопровода  $P_{ст}$ . Приведенная стоимость может быть представлена как в функции скорости  $v$ , так и в функции диаметра  $d$ . Характер изменения величины  $P_{пр}$  и ее составляющих  $P_{ст}(1/T_{ок} + R/100)$  и  $P_{эл}$  в функции указанных величин приведен на рис. 3.5. Скорость и диаметр, отвечающие минимуму приведенных затрат, определяются наименьшими ординатами кривых  $P_{пр}$ .

Экономически наиболее выгодные диаметры водопроводной сети могут быть найдены аналитически для любых конфигураций сети и условий питания.

Рассмотрим схему водоснабжения, представленную на рис. 3.6. От насосной станции 1 водовод 2 подает воду в резервуар 3, расположенный на возвышенности. Из резервуара

3 вода по водоводу 4 поступает в резервуар 5, расположенный в конце магистрали. Существуют различия в работе левой и правой ветвей водовода. При подаче воды насосами, напор которых неизвестен, расчет сводится к определению диаметров труб, при которых затраты на строительство и эксплуатацию водопроводных линий и насосной станции будут минимальными за расчетный срок. Для правой ветви водовода, представляющего гравитационную (самотечную) напорную систему, располагаемый напор задан. Для этого случая задача технико-экономического расчета сводится к отысканию таких диаметров трубопровода, при которых строительная стоимость системы будет минимальна при условии полного расходования этого напора на преодоление гидравлических сопротивлений водовода.



Решим задачу по отысканию диаметров участков левой нагнетательной ветви водовода. При движении воды происходит частичный ее отбор в ряде промежуточных точек. Для нахождения экономически выгодных диаметров необходимо составляющие функции приведенных затрат выразить через гидравлические и экономические зависимости. Тогда для указанной системы приведенные затраты  $P_{пр}$  будут иметь следующий вид:

$$\dot{P}_{пр} = (1/T_{ок} + R/100) \sum (a + b d_{ик}^x) l_{ик} + P (H_0 + \sum K q_{ик}^8 / d_{ик}^m l_{ик}) Q,$$

- где
- R - ежегодные отчисления на амортизацию и ремонт в процентах строительной стоимости водовода;
  - $\sum$  - знак, определяющий полную стоимость строительства водовода;
  - $a + b d_{ик}^x = c$  - эмпирическая зависимость для определения единичной стоимости строительства водопроводной линии;
  - $d_{ик}$  и  $l_{ик}$  - диаметр и длина отдельных участков водовода;
  - $\sum K q_{ик}^8 / d_{ик}^m l_{ик}$  - сумма потерь напора на участках водовода;
  - $q_{ик}^8$  - расход воды участка водовода;
  - Q - полный расход, поступающий в водовод.

Величину  $P$  находят по формуле

$$P \approx 365 \cdot 24 \cdot \sigma \cdot \gamma / (102 \cdot \eta),$$

- где  $\sigma$  - стоимость 1 кВт ч электроэнергии, потребляемой насосными агрегатами для подъема воды;  
 $\gamma$  - коэффициент неравномерности расходования энергии на подъем воды в течение расчетного периода;  
 $\eta$  - общий КПД насосной станции.

Первый член в выражении приведенных затрат определяет ежегодные отчисления от строительной стоимости водовода; второй - затраты на эксплуатацию, связанную с расходом электроэнергии.

Для отыскания оптимальных значений  $d_{ik}$  каждого участка водовода необходимо функцию приведенных затрат  $P_{пр}$  продифференцировать по  $d_{ik}$  и приравнять нулю. В результате получим

$$d_{ik} = \mathcal{E}^{1/(\alpha+m)} Q^{1/(\alpha+m)} q_{ik}^{\beta/(\alpha+m)}$$

Здесь экономический фактор  $\mathcal{E}$ , равный:

$$\mathcal{E} = \frac{8760 \cdot \sigma \cdot \gamma \cdot k \cdot m}{102 \cdot \eta \cdot \alpha \cdot b \cdot (1/T_{ок} + R/100)}$$

характеризует условия строительства и эксплуатации системы водоснабжения. Для водовода с одним узловым отбором в кольцевой точке

$$q_{ik} = Q; \quad d_{ik} = \mathcal{E}^{1/(\alpha+m)} Q^{1/(\alpha+m)}$$

В правой ветви вода по трубопроводу транспортируется в результате разницы пьезометрических отметок уровня воды резервуара 3 ( $H_p = H_p$ ) и резервуара 5 ( $H_d = z + H_{сн}$ ). Располагаемый напор, который должен быть израсходован на преодоление гидравлических потерь  $\sum h_{ik}$ , равен

$$H = H_p - (H_{сн} + z_2) = \sum h_{ik}$$

При наличии нескольких узловых отборов, расположенных по длине водовода, соблюдение приведенного равенства возможно при сочетании на участках трубопроводов различных диаметров. Только одно из этих сочетаний отвечает минимуму строительной стоимости.

Для нахождения этого решения подставим в формулу потерь напора

$$h_{ik} = K \frac{q_{ik}^\beta}{d_{ik}^m} l_{ik}$$

выражение экономически наивыгоднейшего диаметра

$$d_{ik} = \mathcal{E}^{1/(\alpha+m)} Q^{1/(\alpha+m)} q_{ik}^{\beta/(\alpha+m)}$$

В результате получим выражение для определения экономически наивыгоднейших потерь напора на участке

$$h_{ik} = K \frac{q_{ik}^\beta l_{ik}}{d_{ik}^m} = \frac{K q_{ik}^\beta l_{ik}}{Q^{m/(\alpha+m)} q_{ik}^{m\beta/(\alpha+m)} \vartheta^{m/(\alpha+m)}} =$$

$$= \frac{K q_{ik}^{\alpha\beta/(\alpha+m)} l_{ik}}{Q^{m/(\alpha+m)} \vartheta^{m/(\alpha+m)}}$$

Тогда сумма потерь напора по всем участкам водовода составит

$$\sum h_{ik} = \frac{K \sum q_{ik}^{\alpha\beta/(\alpha+m)} l_{ik}}{Q^{m/(\alpha+m)} \vartheta^{m/(\alpha+m)}}$$

Из равенства  $H = \sum h_{ik}$  можно определить экономический фактор для данного случая:

$$\vartheta = \frac{\frac{K}{H} \sum q_{ik}^{\alpha\beta/(\alpha+m)} l_{ik}}{Q}$$

Тогда экономически наивыгоднейший диаметр гравитационного водовода может быть найден по формуле

$$d_{ik} = \left( \frac{K}{H} \sum q_{ik}^{\alpha\beta/(\alpha+m)} l_{ik} \right)^{1/m} q_{ik}^{\beta/(\alpha+m)}$$

Следует отметить, что при малых разностях пьезометрических отметок в начальной и конечной точках водовода перекачка по нему заданного расхода может привести к значительному увеличению диаметра и, следовательно, к увеличению строительной стоимости системы. В этом случае может оказаться рентабельным одновременное использование подкачки воды насосами.

Вычисленные экономически наивыгоднейшие диаметры, как правило, не соответствуют ближайшим стандартным диаметрам труб, выпускаемых промышленностью. При применении труб стандартных диаметров приведенные затраты тем больше, чем значительнее отклонение принятого сортаментного диаметра от оптимального.

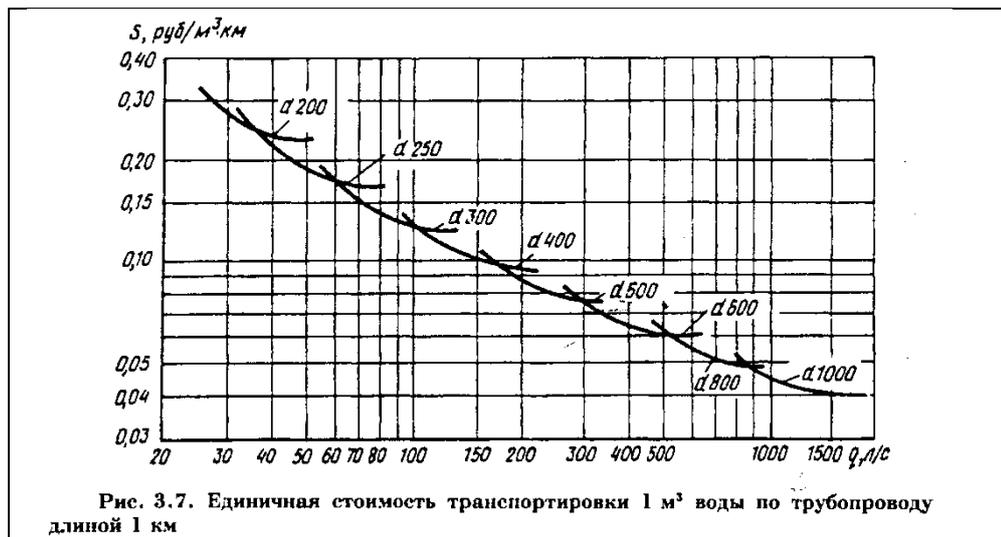


Рис. 3.7, который иллюстрирует экономический расчет стоимости,  $S$ , руб/(м³км) транспортировки 1 м³ воды по трубопроводу длиной 1 км, для ряда стандартных диаметров позволяет сделать ряд выводов.

1. Каждый сортаментный диаметр экономически выгодно использовать в диапазоне определенных расходов.

2. В пределах экономического диапазона расходов для каждого диаметра более экономичны большие расходы. Это может быть учтено при проектировании сети с рядом параллельно работающих трубопроводов. Однако одновременно необходимо учитывать ограничения, вызываемые допустимыми предельными напорами в сети и условиями зонирования, не учтенные экономическим расчетом.

3. Большим расходам, транспортируемым по одному водоводу, соответствуют меньшие стоимости транспортировки. Это подтверждает экономичность (при игнорировании условий надежности) транспортировки воды по одиночному трубопроводу.

Для возможности выбора наивыгоднейших стандартных диаметров необходимо найти расходы, при которых приведенные затраты для двух ближайших сортаментных диаметров будут равны. Эти расходы носят название «предельных». Они находятся путем сопоставления единичных приведенных затрат для каждого из двух смежных по сортаменту диаметров.

В практике расчетов пользуются таблицами предельных расходов, составленными для конкретных значений экономического фактора  $\mathcal{E}$ . В этих таблицах приведены верхняя и нижняя границы целесообразности применения каждого сортаментного диаметра. Для возможности использования этих таблиц необходимо предварительно вычислить «приведенный» расход каждого расчетного участка

$$q_{пр} = q_{ik} (\mathcal{E}/\mathcal{E}_T)^{\frac{1}{1+\beta}} \approx q_{ik} \sqrt[3]{\mathcal{E}/\mathcal{E}_T},$$

где  $q_{пр}$  - расход воды, протекающей по участку;  
 $\mathcal{E}$  - экономический фактор определенный для конкретных условий строительства и эксплуатации;  
 $\mathcal{E}_T$  - то же, принятый при составлении таблицы предельных расходов.

#### 5.4. ФОРМУЛЫ ДЛЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ВОДОВОДНЫХ ТРУБ

Для определения параметров работы системы подачи и распределения воды необходимо знать расходы, транспортируемые по трубопроводам, и соответствующие им потери напора. Основной формулой, охватывающей случаи напорного и безнапорного движения в каналах и трубах, является следующая:

$$v = C \sqrt{R i},$$

где  $C$  - коэффициент Шези;  
 $R$  - гидравлический радиус;  
 $i$  - гидравлический уклон.

Частным случаем этой формулы при напорном движении является формула Дарси-Вейсбаха, широко применяемая в инженерной гидравлике:

$$h_{ik} = \lambda \frac{l_{ik} v_{ik}^2}{d_{ik} 2g}$$

где  $h_{ik}$  - потери напора участка трубопровода;  
 $\lambda$  - коэффициент гидравлического сопротивления этого участка;  
 $l_{ik}$  и  $d_{ik}$  - длина и диаметр трубы участка;  
 $v_{ik}$  - скорость движения воды в трубе;  
 $g$  - ускорение свободного падения.

При расчете водопроводных систем удобнее использовать формулу, в которой скорость заменена расходом:

$$h_{ik} = K \frac{q_{ik}^2 l_{ik}}{d_{ik}^m},$$

где  $K$  - коэффициент;  
 $q_{ik}$  - расход воды на участке;  
 $m$  - показатель степени.

Коэффициенты  $\lambda$ ,  $C$  и  $K$ , имеющие одинаковую природу, связаны соотношением

$$\lambda = g \pi^2 K / 8 = 8g / C^2.$$

При ламинарном и турбулентном течениях в гладких трубах и в гладкостенной области турбулентного течения в шероховатых трубах  $\lambda$  ( $K$  и  $C$ ) зависит только от числа Рейнольдса, т.е. от скорости, диаметра и вязкости; в переходной области турбулентного течения - от числа Рейнольдса, шероховатости и диаметра; в квадратичной области - от диаметра и шероховатости.

Виды функциональной зависимости коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda$  от числа Рейнольдса, шероховатости и диаметра в различных областях турбулентного течения воды определяются различным соотношением толщины ламинарного слоя и величины выступов шероховатости стенок труб.

Влияние шероховатости внутренней поверхности труб на их гидравлическое сопротивление учитывается различными эмпирическими формулами. Их число весьма велико. При расчете систем водоснабжения широко используются формулы Ф.А. Шевелева, полученные на обширных экспериментах, проведенных во ВНИИ ВОДГЕО.

Учитывая, что потери напора  $h$  пропорциональны длине водопроводной линии, можно потери напора на единицу длины определять безразмерной величиной - гидравлическим уклоном  $i_{ik} = h_{ik} / l_{ik}$ .

Ф.А. Шевелевым предложены следующие формулы для определения единичных потерь напора в трубах:

нениевых стальных и чугунных, работающих в квадратичной области при  $v \geq 1,2$  м/с

$$i_{ik} = (0,001735 / d_{ik}^{5,3}) q_{ik}^2 ;$$

нениевых стальных и чугунных, работающих в переходной области при  $v < 1,2$  м/с

$$i_{ik} = 0,00148 / d_{ik}^{5,3} (1 + 0,867 / v_{ik})^{0,3} q_{ik}^2 ;$$

асбестоцементных

$$i_{ik} = 0,00091 / d_{ik}^{5,19} (1 + 3,51 / v_{ik})^{0,19} q_{ik}^2 ;$$

пластмассовых

$$i_{ik} = 0,0001052 q_{ik}^{1,774} / d_{ik}^{4,774} ;$$

Для новых металлических труб, работающих только в переходной области, существуют специальные расчетные формулы. Их использование возможно лишь при наличии уверенности, что в процессе эксплуатации не будут образовываться отложения и наблюдаться внутренняя коррозия.

В связи с ухудшением качества воды в источниках водоснабжения и применением коагулянтов в действующих системах водоснабжения, выполненных из металлических труб, наблюдается интенсивное зарастание их внутренней поверхности. Это приводит к росту гидравлического сопротивления в несколько раз. Поэтому в процессе эксплуатации таких трубопроводов необходимо предусматривать мероприятия по сохранению и восстановлению пропускной способности трубопроводов. При экономической нецелесообразности или отсутствии технической возможности проведения указанных мероприятий допускается учитывать возможное возрастание сопротивления.

При определении гидравлического уклона железобетонных труб можно пользоваться зависимостями, полученными в ЛИИЖТе под руководством В.С. Дикаревского:

для виброгидропрессованных

$$i_{ik} = 0,001078 v_{ik}^{1,85} / d_{ik}^{1,19} ;$$

для центрифугированных

$$i_{ik} = 0,00095 v_{ik}^{1,85} / d_{ik}^{1,19} ;$$

В практике расчетов широкое применение находят таблицы, графики и номограммы, которые составлены по приведенным выше формулам. Однако ряд задач делает очень неудобным использование этих формул в явном виде. Например, при выполнении расчетов по увязке водопроводной сети.

Общая формула потерь напора может быть представлена в виде

$$h_{ik} = S_0 i_{ik} q_{ik}^2 ,$$

где  $S_0 = K_{ik} / d_{ik}^{1,12}$ .

Величина  $S_0$  называется удельным гидравлическим сопротивлением. Гидравлическое сопротивление участка трубопровода  $S_{lk} = S_0 l_{lk}$ . Если трубы работают в неквадратичной области, то расход (или скорость) в формуле потерь напора имеет некоторую дробную степень, т.е.

$$h_{lk} = S_{lk} q_{lk}^\beta = (K_0 l_{lk} / d_{lk}) q_{lk}^\beta.$$

Степень  $\beta$  находится в пределах 1,7 - 2. Если формулу потерь напора невозможно привести к указанному выше виду, то они вычисляются по квадратичной зависимости. После чего в значение потерь напора вводят поправочный коэффициент  $\delta$ , зависящий от скорости:

$$h_{lk} = S_0 l_{lk} q_{lk}^2 = S_{lk} \delta q_{lk}^2.$$

Рядом авторов были предложены одночленные формулы вида

$$i_{lk} = K q_{lk}^\beta / d_{lk}^m,$$

аппроксимирующие приведенные выше двучленные. Их применение облегчает проведение гидравлических и технико-экономических расчетов.

$$i_{lk} = 0,00179 q_{lk}^{1,9} / d_{lk}^{5,1}$$

Так, для неметаллических труб при скоростях движения воды до 3 м/с, имеющих место на практике, М.М. Андрияшевым предложена формула:

$$i_{lk} = 0,00118 q_{lk}^{2,5} / d_{lk}^{4,33}$$

Для асбестоцементных труб Н.Н. Абрамовым получена формула:

$$C = 1/n R^y,$$

Для вычисления потерь напора при безнапорном движении необходимо определить значение коэффициента Шези ( $C$ ). Он может быть вычислен по формуле Н.Н. Павловского

где  $n$  - коэффициент шероховатости труб, принимаемый по табл. 3.1;  $R = \omega / \aleph$  - гидравлический радиус, соответствующий расчетному наполнению) (здесь  $\aleph = \pi d \alpha / 360$  - смоченный периметр при расчетном наполнении;  $\alpha$  - центральный угол в трубе, соответствующий расчетному наполнению;  $\omega = d/8(\pi \alpha / 180 - \sin \alpha)$  - площадь живого сечения потока, соответствующая расчетному наполнению;  $y$  - показатель степени, определяемый по формуле;  $y = 2,5 n - 0,13 - 0,75 R$  ( $n - 0,1$ ).

**Таблица 3.1**

Материал трубы	Коэффициент
----------------	-------------

Бетон и железобетон	0,014
Асбестоцемент	0,012
Чугун	0,013
Сталь	0,012
Пластмасса	0,009
Дерево	0,010

## Глава 6. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

### 6.1. ЗАДАЧИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

Целью расчета водопроводной сети является определение диаметров линий сети и потерь напора в них. В том случае, если известны диаметры характеристики насосных станций, регулирующих емкостей и др., то в результате расчета определяются истинные расходы в линиях сети, действительные подачи воды всеми водопитателями и создаваемые ими напоры, а также давления во всех узлах сети и нефиксированные отборы.

Для сети, которая подлежит расчету, всегда заданы ее конфигурация, длины участков и узловые отборы воды. В основе гидравлического расчета водопроводных сетей лежат положения о том, что распределение воды по линиям сети происходит в соответствии с законами Кирхгофа. В соответствии с I законом Кирхгофа в каждом узле должен соблюдаться материальный баланс, отвечающий принципу сплошности потока. По условиям работы водопроводной сети это означает, что алгебраическая сумма расходов в любом узле сети равна нулю:

$$\sum q_{ik} - \bar{Q}_i = 0. \quad (3.1)$$

По II закону Кирхгофа требуется выполнение условия суммарного нулевого изменения перепадов давления (разности потенциалов) в любом контуре системы. Для кольцевой сети это означает, что алгебраическая сумма потерь напора в любом контуре / сети равна нулю

$$\left( \sum S_{ik} q_{ik}^\beta \right)_I = 0, \quad (3.2)$$

где  $q_{ik}$  - расход по участкам водопроводной сети;  
 $Q$  - узловые отборы;  
 $S_{ik}$  - гидравлическое сопротивление линии.

Если имеются напорно-расходные характеристики водопитателей  $F(Q)_M$  и нефиксированных отборов  $F(Q)_K$ , расположенных в узлах системы  $M$  и  $K$ , то в дополнение к уравнению (3.2) имеются уравнения вида

$$F(Q)_M - F(Q)_K = \left( \sum S_{ik} q_{ik} \right)_{MK}^\beta. \quad (3.3)$$

Взаимодействие между водопитателями и нефиксированными отборами осуществляется через потери напора  $\left( \sum S_{ik} q_{ik}^\beta \right)_{MK}$  в линиях сети, их соединяющих.

Распределение потоков в кольцевой сети, при котором соблюдаются указанные законы, соответствует минимуму энергии, расходуемой на преодоление потерь напора в трубах.

Прежде чем установить число уравнений I и II законов Кирхгофа, характеризующих потокораспределение в системе, рассмотрим свойства водопроводной сети. Рассматривая геометрические свойства кольцевой сети, можно установить определенную связь между числом ее элементов, т.е. числом колец, узлов и участков. Обозначив число колец через  $n$ , число узлов - через  $m$ , число участков - через  $p$  и число водопитателей и нефиксированных отборов - через  $e$ , можно установить следующую зависимость:

$$p = m + n + e - 1.$$

Это положение является следствием теоремы Эйлера о соотношении между числом граней, вершин и ребер выпуклого многогранника. Оно позволяет установить соотношение между числом уровней I и II законов Кирхгофа при расчете водопроводных сетей и числом неизвестных.

В случае, если диаметры линий сети известны, можно однозначно определить расходы в линиях сети. Искомые расходы  $q_{ik}$  (числом  $p$ ) находятся из совместного решения системы  $p = m + n + e - 1$  уравнений I и II законов Кирхгофа, из которых  $n + e$  - нелинейных уравнений типа (3.2) и (3.3) и  $m - 1$  -линейных уравнений типа (3.1). Если характеристик водопитателей и нефиксированных отборов нет, то уравнение (3.3) отсутствует, а общее число уравнений определяется соотношением  $p = m + n - 1$ .

Для разветвленных сетей, не имеющих колец, число уравнений определяется соотношением  $p = m + e - 1$ . При отсутствии характеристик водопитателей и нефиксированных отборов их число уменьшается до  $m - 1$ .

При отыскании потокораспределения соблюдение линейных уравнений (3.1) достигается на стадии предварительного потокораспределения. Обеспечение требований уравнений (3.2) и (3.3) достигается поиском соответствующего им распределения расходов по линиям сети. Этот поиск носит название гидравлической увязки. Если в процессе увязки характеристики водопитателей и нефиксированных отборов не учитываются, то она называется внутренней; если учитываются - то внешней.

В общем случае, рассматривая уравнения II закона Кирхгофа, становится ясно, что помимо неизвестных  $q_{ik}$ , подлежащих отысканию, в них входят также неизвестные диаметры линий  $d_{ik}$ . Это вызвано тем, что значения  $S_{ik}$ , входящие в формулу потерь напора, выражаются в функции диаметров. Таким образом, любое изменение диаметров линий сети будет приводить к перераспределению расходов, протекающих по ним. С другой стороны, перераспределение расходов приводит к новым диаметрам.

В этой ситуации сталкиваемся (как уже указывалось выше) с задачей технико-экономического расчета. В результате этого расчета отысканию подлежат  $2p$  неизвестных:  $p$  значений  $q_{ik}$  и столько же значений  $d_{ik}$ . Для одновременного нахождения всех  $2p$  неизвестных, полученных уравнений (3.2) и (3.3) недостаточно.

Не обращая на данном этапе к методам полного технико-экономического расчета, можно сделать вывод, что гидравлический расчет сетей следует вести, задаваясь диаметрами. Как было видно выше, выбор диаметров отдельных участков сети не может быть произведен совершенно произвольно, так как диаметр, в известной степени, есть функция проводимого трубой расхода. Поэтому для сколь-нибудь точного выбора диаметров необходимо назначать предварительное потокораспределение.

## 6.2. ПЕРВОНАЧАЛЬНОЕ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДЫ В КОЛЬЦЕВЫХ СЕТЯХ

В отличие от разветвленных сетей, где возможно единственное потокораспределение, отвечающее I закону Кирхгофа, в кольцевых сетях число возможных вариантов - бесчисленное множество. Попытка решить задачу по отысканию наивыгоднейшего потокораспределения, используя лишь критерий экономичности, приводит к превращению кольцевой сети в разветвленную. Однако первоначальное назначение потокораспределения в кольцевой сети является одним из основных этапов ее расчета, так как без знания расходов по линиям сети невозможно назначить их диаметры.

Из всего многообразия возможных вариантов распределения расходов должен быть выбран тот, который позволяет обеспечить подачу заданных количеств воды ко всем потребителям, а также требуемые нормы снабжения водой потребителей при возможных

авариях на сети. Принятое решение о потокораспределении весьма важно, так как расходы, соответствующие ему, принимаются как исходные данные при технико-экономическом расчете экономически выгодных диаметров. При дальнейших расчетах и гидравлической увязке сети происходит корректировка в достаточно узком диапазоне расходов. В силу указанных причин, решение о первоначальном потокораспределении является ответственной задачей. Начальное потокораспределение должно быть намечено одновременно для основных расчетных случаев работы сети для возможности выяснения роли отдельных ее участков и пределов нагрузок в них.

Как указывалось выше, вопрос нахождения наивыгоднейшей с экономической точки зрения трассировки сети для систем городского и промышленного водоснабжения не является чрезмерно актуальным. Это вызвано тем, что в значительной мере форма и трасса сети определяются планировкой города, поселка, промышленного предприятия. Известны различные предложения по назначению “наилучшего” потокораспределения. Однако большинство из них нельзя признать удовлетворительными.

С практической точки зрения наиболее простой путь назначения первоначального потокораспределения - это нахождение такого из них, которое удовлетворит нормативным требованиям надежности. Требования надежности учитываются при начальном потокораспределении. Однако их учет на стадии назначения потокораспределения может быть проведен приближенно и требует уточнения, когда диаметры уже назначены.

Обычно принимают следующий порядок назначения начального потокораспределения в сети. На первом этапе приближенно назначают диктующие точки сети, которые располагаются в конце сети на наиболее удаленных и высоких отметках с наибольшими узловыми отборами. Затем намечают основные параллельные пути снабжения от источника питания до диктующих точек. Эти направления можно назвать транзитными. Они, как правило, имеют более короткое направление, чем конкурентоспособные им. После этого намечают расходы воды по основным путям. По возможности основные пути снабжения водой потребителей должны иметь одинаковую проводимость. Из гидравлики известно, что проводимость  $\Pi$  имеет следующую связь с сопротивлением линии  $S \rightarrow \Pi = 1/S$ . При этом соблюдение материального баланса в узлах может быть приближенным. Диаметры перемычек, соединяющие транзитные (магистральные) линии между собой, назначают, исходя из предполагаемой нагрузки, которую они могут иметь в случае аварии на некоторых магистральных линиях. В общем виде назначать потокораспределение следует с учетом надежности характеристик отдельных участков сети, которые зависят от большого числа факторов. Сбор этих показателей представляет весьма сложную задачу.

После проведения всех перечисленных операций определяют диаметры участков сети на основе технико-экономических расчетов, которые с некоторой степенью приближения можно принять удовлетворяющими требованиям надежности. Для проверки выполнения условий надежности необходимо проведение поверочных гидравлических и надежность расчетов при уже известных диаметрах.

### **6.3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВНУТРЕННЕЙ УВЯЗКИ КОЛЬЦЕВЫХ СЕТЕЙ**

Назначив потокораспределение в линиях сети и выбрав диаметры этих линий, приступают к гидравлической увязке. Обычно с первой попытки найти истинное распределение расходов и потерь напора, соответствующее I и II законам Кирхгофа, не представляется возможным. Для его нахождения необходимо решить систему  $(m - 1)$  линейных уравнений I закона Кирхгофа (уравнений баланса расходов в узлах) и  $n$

нелинейных уравнений II закона Кирхгофа (уравнений, определяющих равенство нулю потерь напора по независимым контурам).

Увязку кольцевых сетей можно осуществлять по двум принципам в зависимости от того, что принимать за основные неизвестные - расходы или напоры (потери напора). При этом нахождение одной группы неизвестных позволяет единственно возможным образом найти другую группу неизвестных.

Метод, с помощью которого за главные неизвестные принимаются, напоры (потери напора), известен как метод "уравнивания расходов". Во втором методе ищутся неизвестные расходы участков  $q_{ik}$ . При истинных значениях расходов удовлетворяются уравнения II закона Кирхгофа. Этот метод носит название метода "уравнивания напоров".

Для использования обоих методов увязки необходимо принимать начальные значения неизвестных. При пользовании методом уравнивания напоров необходимо задаваться некоторыми начальными значениями расходов воды в участках сети. Это в наибольшей степени соответствует обычной практической постановке расчета. Эта и другие причины приводят к более широкому использованию в отечественной практике метода уравнивания напоров. Он и будет рассматриваться далее.

Если в кольцевой сети имеется  $n$  независимых контуров, то система нелинейных уравнений для них может быть представлена в виде:

$$\left. \begin{aligned} F_1(q_1, q_2, q_3, \dots, q_p) &= 0; \\ F_2(q_1, q_2, q_3, \dots, q_p) &= 0; \\ F_n(q_1, q_2, q_3, \dots, q_p) &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Все функции  $F$  имеют одинаковый вид:  $\sum S_{ik} q_{ik}^{\beta}$ . Система этих уравнений в целом охватывает все участки сети. Однако число уравнений этой системы  $n$  меньше числа искомых расходов участков  $p$ . Поэтому систему этих уравнений следует рассматривать совместно с системой  $m - 1$  линейных уравнений

$$\sum q_{ik} = Q_i = 0.$$

Для решения системы нелинейных уравнений широко используют метод Ньютона и его модификации. Путь решений нелинейных уравнений следующий.

1. Предварительно принимают некоторые значения неизвестных расходов  $q_{ik}^0$ , которые предполагают достаточно близкими к истинным.

2. В качестве расходов  $q_{ik}$  принимают расходы, полученные при предварительном распределении с соблюдением I закона Кирхгофа.

3. К предварительно намеченным расходам на участках  $q_{ik}^0$  прибавляют (неизвестные) поправки  $\Delta q_1$  полагая, что  $q_{ik}^0 + \Delta q_1$  должны равняться искомому (истинным) значениям расходов  $q_{ik}$  (удовлетворяющим нелинейной системе уравнений). Тогда система нелинейных уравнений примет вид:

$$\begin{aligned} F_1(q_1^0 + \Delta \bar{q}_1; q_2^0 + \Delta \bar{q}_2; \dots; q_p^0 + \Delta \bar{q}_p) &= 0; \\ F_2(q_1^0 + \Delta \bar{q}_1; q_2^0 + \Delta \bar{q}_2; \dots; q_p^0 + \Delta \bar{q}_p) &= 0; \\ \hline F_n(q_1^0 + \Delta \bar{q}_1; q_2^0 + \Delta \bar{q}_2; \dots; q_p^0 + \Delta \bar{q}_p) &= 0. \end{aligned}$$

Здесь неизвестными будут уже не расходы  $q_{ik}$ , а поправки к расходам  $\Delta q_{ik}$ .

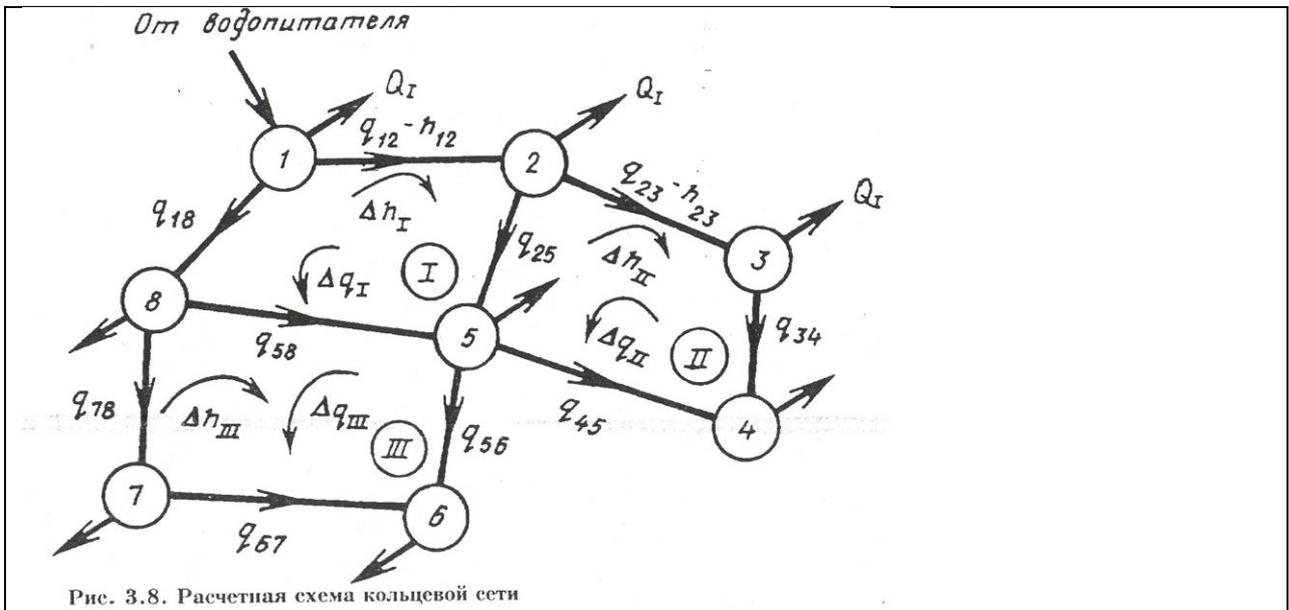
$$\begin{aligned} F_1(q_1^0, q_2^0, \dots, q_p^0)_1 + (\partial F_1 / \partial q_1 \Delta \bar{q}_1 + \partial F_1 / \partial q_2 \Delta \bar{q}_2 + \dots + \partial F_1 / \partial q_p \Delta \bar{q}_p) &= 0; \\ F_2(q_1^0, q_2^0, \dots, q_p^0)_2 + (\partial F_2 / \partial q_1 \Delta \bar{q}_1 + \partial F_2 / \partial q_2 \Delta \bar{q}_2 + \dots + \partial F_2 / \partial q_p \Delta \bar{q}_p) &= 0; \\ \hline F_n(q_1^0, q_2^0, \dots, q_p^0)_n + (\partial F_n / \partial q_1 \Delta \bar{q}_1 + \partial F_n / \partial q_2 \Delta \bar{q}_2 + \dots + \partial F_n / \partial q_p \Delta \bar{q}_p) &= 0; \end{aligned}$$

4. Разложив левую часть уравнений в ряд Тейлора в окрестности точки  $q_{ik}$  и ограничившись линейными членами разложения, получим:

При этом подразумевают, что в полученные выражения производных подставляются первоначально принятые значения неизвестных  $q_{ik}^0$ . Полученная система является системой линейных уравнений относительно поправок  $\Delta q_{ik}^0$  к предварительно принятым значениям расходов  $q_{ik}^0$ .

В написанных уравнениях отброшены все члены разложения, кроме линейных. Поэтому для нахождения значений  $q_{ik}$  требуется проведение ряда подобных расчетов. При проведении каждого из них в качестве предварительных принимаются расходы, полученные из предыдущего расчета. Таким образом, полученная система линейных уравнений решается методом последовательного приближения.

Наиболее широкое применение в практике получил аналитический метод, предложенный В.Г. Лобачевым и независимо от него Х. Кроссом. Он предусматривает выражение поправок к расходам на участках сети через контурные поправочные расходы  $\Delta q_I$  в отдельных кольцах. При этом в процессе увязки сети автоматически обеспечивается соблюдение I закона Кирхгофа. Сущность этого метода заключается в следующем. Пусть в некоторой сети (рис. 3.8) после предварительного распределения расходов  $q_{ik}$  по ее участкам, определения диаметров и гидравлических сопротивлений вычислены потери напора  $h_{ik} = S_{ik}q_{ik}^2$  для всех участков сети. Условно принимается квадратичный закон сопротивления. Истинное распределение расходов характеризуется равенством  $(\sum h_{ik})_I = 0$  для каждого из колец сети. При этом потерям напора на участках с движением расходов по часовой стрелке (относительно рассматриваемого кольца) присваивается знак плюс, с движением против часовой стрелки - знак минус.



Допустим, что после первоначального распределения расходов величина  $(\sum h_{ik})_I$  в отдельных кольцах не равна нулю; предположим, что во всех кольцах их верхние и правые участки (с положительными  $h_{ik}$ ) оказались перегруженными, а левые и нижние - недогруженными. Тогда алгебраическая сумма потерь напора в кольцах будет равна не нулю, а некоторой величине  $\Delta h_I$  т. е.  $(\sum h_{ik})_I = \Delta h_I$ .

$$S_{12}q_{12}^2 + S_{25}q_{25}^2 - S_{58}q_{58}^2 - S_{18}q_{18}^2 = \Delta h_1;$$

$$S_{23}q_{23}^2 + S_{34}q_{34}^2 - S_{45}q_{45}^2 - S_{25}q_{25}^2 = \Delta h_{II};$$

$$S_{58}q_{58}^2 + S_{56}q_{56}^2 - S_{07}q_{07}^2 - S_{78}q_{78}^2 = \Delta h_{III}.$$

Для сети, схема которой представлена на рис. 3.8, получим следующую систему уравнений:

Величина  $\Delta h_1$  представляет собой невязку потерь напора в кольце I; эта величина и ее знак характеризуют степень отклонения принятого в кольце распределения расходов от истинного (искомого).

$$\begin{aligned} & S_{12}(q_{12} - \Delta q_1)^2 + S_{25}(q_{25} - \Delta q_1 + \Delta q_{II})^2 - \\ & - S_{58}(q_{58} + \Delta q_1 - \Delta q_{III})^2 - S_{18}(q_{18} + \Delta q_1)^2 = 0; \\ & S_{23}(q_{23} - \Delta q_{II})^2 + S_{34}(q_{34} - \Delta q_{II})^2 - \\ & - S_{45}(q_{45} + \Delta q_{III})^2 - S_{25}(q_{25} - \Delta q_1 + \\ & + \Delta q_{II})^2 = 0; \\ & S_{58}(q_{58} + \Delta q_1 - \Delta q_{III})^2 + S_{56}(q_{56} - \Delta q_{III})^2 - \\ & - S_{07}(q_{07} + \Delta q_{III})^2 - S_{78}(q_{78} - \Delta q_{III})^2 = 0. \end{aligned}$$

Для снижения невязки необходимо уменьшить расходы на перегруженных ветвях каждого кольца и увеличить их на недогруженных, соблюдая при этом баланс расходов в узлах  $\sum q_{ik} + Q_i = 0$ . Это может быть достигнуто путем переброски некоторых контурных расходов  $\Delta q_1$  по всем кольцам в направлении, обратном знаку невязки. После переброски таких расходов (пока неизвестных) получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} & S_{12}(q_{12} - \Delta q_1)^2 + S_{25}(q_{25} - \Delta q_1 + \Delta q_{II})^2 - \\ & - S_{58}(q_{58} + \Delta q_1 - \Delta q_{III})^2 - S_{18}(q_{18} + \Delta q_1)^2 = 0; \\ & S_{23}(q_{23} - \Delta q_{II})^2 + S_{34}(q_{34} - \Delta q_{II})^2 - \\ & - S_{45}(q_{45} + \Delta q_{III})^2 - S_{25}(q_{25} - \Delta q_1 + \\ & + \Delta q_{II})^2 = 0; \\ & S_{58}(q_{58} + \Delta q_1 - \Delta q_{III})^2 + S_{56}(q_{56} - \Delta q_{III})^2 - \\ & - S_{07}(q_{07} + \Delta q_{III})^2 - S_{78}(q_{78} - \Delta q_{III})^2 = 0. \end{aligned}$$

Раскрыв скобки и выполнив некоторые преобразования, имеем для первого кольца уравнение

$$\begin{aligned} & [S_{12}q_{12}^2 + S_{25}q_{25}^2 - S_{58}q_{58}^2 - S_{18}q_{18}^2] - 2[S_{12}q_{12} + \\ & + S_{25}q_{25} + S_{58}q_{58} + S_{18}q_{18}] \Delta q_1 + 2S_{25}q_{25} \Delta q_{II} + 2S_{58} \Delta q_{III} = 0. \end{aligned}$$

Первый член этого уравнения, заключенный в квадратные скобки, представляет собой невязку в кольце I при первоначально принятых расходах, т.е.  $\Delta h_1$ . Коэффициент при неизвестном расходе  $\Delta q_1$  во втором члене равен  $2 \sum S_q$  в *кольце* I; последние два члена представляют собой неизвестные поправочные расходы смежных колец  $\Delta q_{II}$  и  $\Delta q_{III}$  с коэффициентами, равными  $2S_q$  общих участков кольца I со смежными кольцами.

$$\Delta h_1 - 2 \sum (S_q)_I \Delta q_1 + 2(S_q)_{25} \Delta q_{II} + 2(S_q)_{58} \Delta q_{III} = 0;$$

$$\Delta h_{II} - 2 \sum (S_q)_{II} \Delta q_{II} + 2(S_q)_{25} \Delta q_1 = 0;$$

$$\Delta h_{III} - 2 \sum (S_q)_{III} \Delta q_{III} + 2(S_q)_{58} \Delta q_1 = 0.$$

Приведенные выше уравнения могут быть представлены следующим образом:

Получим систему линейных уравнений относительно неизвестных  $\Delta q_I$ ,  $\Delta q_{II}$  и  $\Delta q_{III}$ . Величины  $\Delta h_I$  - свободные члены, известные после первого распределения расходов. Эту систему линейных уравнений можно решать любым из существующих способов. Метод Лобачева-Кросса предусматривает предельное упрощение написанной системы уравнений путем исключения из каждого уравнения членов, содержащих  $\Delta q_I$  смежных колец. Тогда для всех колец получаются однотипные равенства вида  $2 \sum (S_{ik} q_{ik})_I \Delta q_I = \Delta h_I$ . Отсюда вытекает общая формула для приближенного определения искомым неизвестных поправочных расходов

$$\Delta q_I = \Delta h_I / 2 \sum (S_{ik} q_{ik})_I.$$

При использовании этой формулы упрощается операция вычисления  $\Delta q_I$  в каждом приближении, по требуется увеличение числа последовательных приближений (итераций) для нахождения значений  $\Delta q_I$ , достаточно близких к истинным (дающим увязку сети).

При работе труб в неквадратичной области для определения поправочных расходов может использоваться та же формула, не при условии, что в величины  $S_{ik}$  участков введены коэффициенты:  $\beta$ . Поправочные расходы могут определяться по формуле

$$\Delta q_I = \Delta h_I / \beta \sum S_{ik} q_{ik}^{\beta-1}$$

если потери напора определяли непосредственно по неквадратичной формуле вида

$$h_{ik} = S_{ik} q_{ik}^\beta.$$

Существуют различные модификации метода Лобачева-Кросса. Он широко используется при составлении программ расчета водопроводных сетей с применением ЭВМ.

Задача увязки сети может быть решена и другими методами последовательного приближения. Широкое распространение получил метод, предложенный М.М. Андрияшевым. Автор метода рекомендует после первого определения невязок осуществлять выбор системы контуров (охватывающих одно кольцо или группу элементарных колец), по которым можно провести поправочные расходы для получения значительного снижения невязок в сети. Под элементарным кольцом понимается кольцо, в котором не имеется участков, пересекающих его площадь, и которое не делится на более мелкие кольца. Эти расходы могут проводиться как одновременно по нескольким выбранным контурам, так и последовательно с учетом результатов предыдущих операций. Результаты всех вычислений записывают непосредственно на схемах сети. После каждого цикла проведения поправочных расходов анализируют полученные результаты (значения и знак невязок), намечают следующую группу контуров увязки и определяют новые поправочные расходы. Для более успешной и быстрой увязки автор метода рекомендует:

объединение смежных колец с невязками одинакового знака в укрупненные контуры, по которым надо проводить поправочные расходы;

последовательную увязку колец или группы колец (с невязками попеременно то одного, то другого знака) циклами;

увязку в каждом цикле кольца или группы колец с невязками наибольшего значения.

$$\Delta q_I = \Delta h_I / 2 \sum (S_{ik} q_{ik})_I.$$

Поправочные расходы по выбранному контуру I можно определять по формуле вида

Использование этой формулы связано с большим числом вычислений. Так как в процессе увязки величина  $\sum (S_{ik} q_{ik})_I$  по контурам меняется относительно мало, автор метода считает, что поправочные расходы при последовательно проводимых увязках изменяются пропорционально невязкам. Если принять, что величина  $\sum (S_{ik} q_{ik})_I$  постоянна

и обозначить поправочный расход пробной увязки через  $\Delta q_0$ , а соответствующее изменение невязки - через  $\Delta h_0$ , то получим

$$\Delta q_l / \Delta h_l = 1/2 \sum (S_{ik} q_{ik})_l = \text{const} = \Delta q_0 / \Delta h_0,$$

откуда

$$\Delta q_l = \Delta h_l \Delta q_0 / \Delta h_0.$$

Для контуров, имеющих малоразличающиеся длины и диаметры отдельных участков, М.М. Андрияшев предлагает определять поправочные расходы по приближенной формуле:

$$\Delta q_l = q_{\text{ср}l} \Delta h_l / 2 (\sum h_{ik})_l,$$

где  $q_{\text{ср}l}$  - средний расход для всех входящих в контур участков;  $\Delta h_l$  - невязки и контуре;  $(\sum h_{ik})_l$  - сумма абсолютных значений потерь напора в контуре.

Применение приемов увязки сети, рекомендованных М.М. Андрияшевым, пояснено ниже на примере расчета сети городского водопровода. В отличие от других методов увязки сети метод М.М. Андрияшева предназначен для проведения расчетов вручную; при его применении обеспечивается значительное ускорение процесса увязки сети. В последнее время он используется также при расчете сетей на ЭВМ в диалоговом режиме.

#### **6.4. ПРИМЕРЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ УВЯЗКИ СЕТИ МЕТОДАМИ В.Г. ЛОБАЧЕВА И М.М. АНДРИЯШЕВА**

Рассмотрим пример гидравлической увязки четырехкольцевой водопроводной сети (рис. 3.9) по методу В.Г. Лобачева. Поскольку водонапорная башня расположена в начале сети, то вода в нее поступает с одной стороны и суммарная подача от насосной станции и башни равна сумме узловых отборов. Расчет приводят для момента максимального водопотребления.

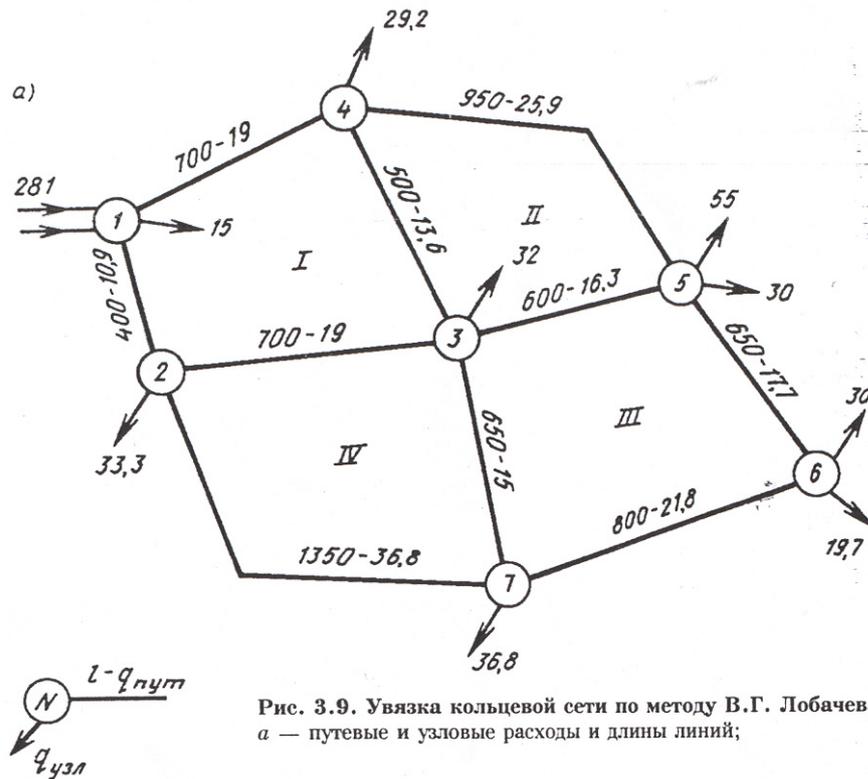
Расчетный расход в час максимального водопотребления составляет 281 л/с; из них 85 л/с в точках 5 и 6 забирают крупные потребители (промышленные предприятия). Принимаем, что удельный расход для всех линий одинаков и составляет на 1 м длины сети

$$q_{\text{уд}} = Q / \sum l = (281 - 85) / 7200 = 0,0272 \text{ л/с},$$

где  $\sum l$  - суммарная длина сети, равная 7200 м.

Зная длины участков  $l$ , получают путевые расходы для каждого из них  $q_{\text{п}} = q_{\text{уд}} l$ , а затем узловые расходы; узловой расход равен  $q_{\text{узл}} = 0,5 \sum q_{\text{п}}$ . Полученные путевые расходы, л/с, указаны на схеме (см. рис. 3.9, а). На этой же схеме приведены узловые расходы  $q_{\text{узл}}$ , л/с, а узловые расходы промышленного предприятия обозначены цифрами у черных стрелок.

После подготовки к гидравлическому расчету намечают предварительное распределение потоков по линиям сети с учетом требований взаимозаменяемости линий в случае выключения отдельных участков. Распределение потоков воды производят с соблюдением баланса расходов в узлах  $\sum q_{ik} + Q_i = 0$ . В результате получают расчетные расходы для каждого участка сети.

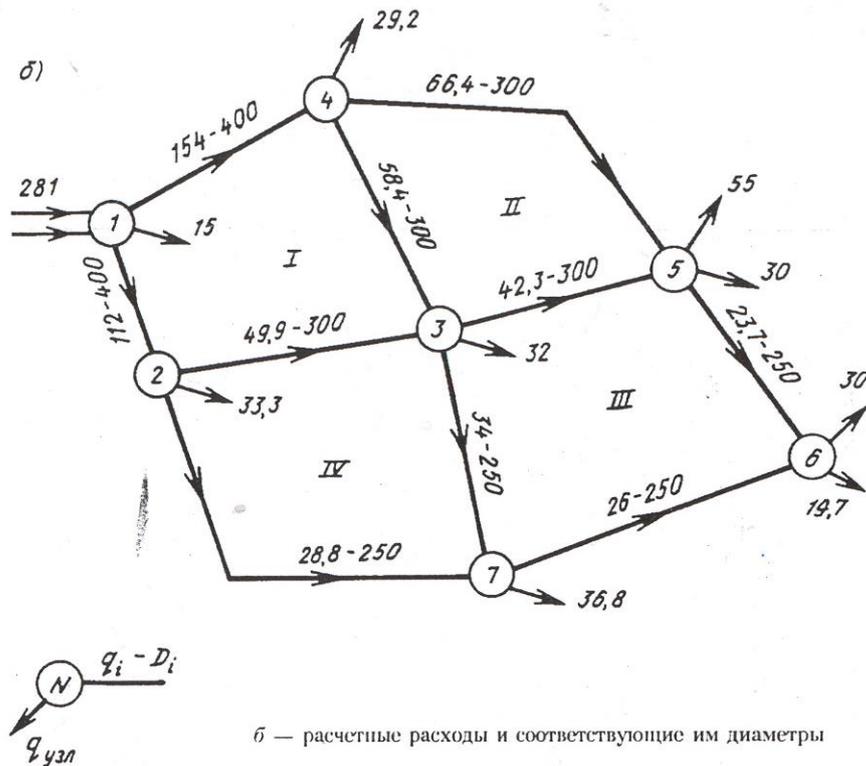


Экономически наиболее выгодные диаметры определяют по таблице предельных расходов для чугунных труб для экономического фактора  $\Theta = 0,75$ . При назначении диаметров учитывают требования надежности сети и роль перемычек при отключении отдельных линий сети, а также условия работы сети во время пожаротушения.

Значения расчетных расходов  $q_{ик}$ , л/с, и диаметров  $d_{ик}$ , мм, нанесены на схему сети (см. рис. 3.9, б). Зная диаметры и длины линий, а также скорости, можно определить сопротивление каждого участка

$$S = S_0 \delta l_1,$$

где  $S_0$  - удельное сопротивление, определяемое по таблицам Ф.А. Шевелева;  
 $\delta$  - поправочный коэффициент, зависящий от скорости  $v$ .



Сопротивления, зависящие не только от  $d$ , но и от  $q$  (или от  $v$ ), будут несколько изменяться при распределении расходов в процессе увязки сети. Но так как изменения расходов на большинстве участков сети будут при этом относительно невелики, можно считать сопротивления постоянными в процессе увязки.

В случае необходимости в конце расчета можно внести поправки для тех участков, на которых расход в процессе расчета значительно изменился.

Увязка сети производится методом В.Г. Лобачева. Результаты расчета записывают в табл. 3.2. В нее же внесены все необходимые данные, соответствующие начальному распределению потоков (см. рис. 3.9, б).

Далее определяют значения  $S_{ik}q_{ik}$ , потери напора  $h_{ik} = S_{ik}q_{ik}$ , невязки сети в кольцах  $h_{ik}$ , значения  $\Sigma (S_{ik}q_{ik})_I$ ; и увязочные расходы колец, которые находят по формуле

$$\Delta q_I = - \Delta h_I / 2 \Sigma (S_{ik}q_{ik})_I.$$

Таблица 3.2

№ кольца	№ участка	l, м	Предварительное распределение расходов							
			q, л/с	d, мм	S	v, м/с	δ	S = S <sub>0</sub> l	Sq	h = Sq <sup>2</sup> , м
I	1-4	700	154	400	0,2189 · 10 <sup>-6</sup>	1,2	1	0,000153	0,0236	+3,63
	3-4	500	58,4	300	0,9485 · 10 <sup>-6</sup>	0,81	1,06	0,000503	0,0294	+1,72
	2-3	700	49,9	300	0,9485 · 10 <sup>-6</sup>	0,7	1,085	0,000720	0,0369	-1,79
	2-1	400	112	400	0,2189 · 10 <sup>-6</sup>	0,9	1,04	0,000091	0,0102	-1,14
			$\Sigma (Sq)_I = 0,0991$					$\Delta h_I = +2,42$		
			$\Delta q_I = 2,42 / (2 \cdot 0,0991) \approx -12,2$							
II	4-5	950	66,4	300	0,9485 · 10 <sup>-6</sup>	0,85	1,05	0,000946	0,0628	+4,17
	3-5	600	42,3	300	0,9485 · 10 <sup>-6</sup>	0,58	1,12	0,000637	0,0270	-1,14
	3-4	500	58,4	300	0,9485 · 10 <sup>-6</sup>	0,81	1,06	0,000503	0,0294	-1,72
			$\Sigma (Sq)_{II} = 0,119$					$\Delta h_{II} = +1,31$		
			$\Delta q_{II} = [(1,31 / 2 \cdot 0,119)] \approx -5,5$							
III	3-5	600	42,3	300	0,9485 · 10 <sup>-6</sup>	0,58	1,12	0,000637	0,027	+1,14
	5-6	650	23,7	250	2,528 · 10 <sup>-6</sup>	0,47	1,17	0,00192	0,0455	+1,08
	3-7	550	34,0	250	2,528 · 10 <sup>-6</sup>	0,68	1,09	0,00153	0,052	-1,77
	6-7	850	26,0	250	2,528 · 10 <sup>-6</sup>	0,52	1,15	0,00233	0,061	-1,58
			$\Sigma (Sq)_{III} = 0,1865$					$\Delta h_{III} = -1,13$		
			$\Delta q_{III} = -[1,13 / (2 \cdot 0,1865)] \approx +3,0$							
IV	2-3	700	49,9	300	0,9485 · 10 <sup>-6</sup>	0,7	1,085	0,00072	0,0359	+1,79
	3-7	550	34,0	250	2,528 · 10 <sup>-6</sup>	0,68	1,09	0,00163	0,052	+1,77
	2-7	1350	28,8	250	2,528 · 10 <sup>-6</sup>	0,58	1,12	0,00382	0,110	-3,17
			$\Sigma (Sq)_{IV} = 0,198$					$\Delta h_{IV} = +0,39$		
			$\Delta q_{IV} = -[0,39 / (2 \cdot 0,198)] \approx -1,0$							

Продолжение табл. 3.2

№ кольца	№ участка	l, м	I исправление				II исправление			
			Δq, л/с	q <sub>1</sub>	Sq	h <sub>1</sub> = Sq <sub>1</sub> <sup>2</sup> , м	Δq, л/с	q <sub>2</sub>	Sq <sub>2</sub>	h <sub>2</sub> = Sq <sub>2</sub> <sup>2</sup> , м
I	1-4	700	-12,2	141,8	0,0217	+3,08	-1,6	140,2	0,0215	+3,01
	3-4	500	12,2 + 5,5 = -6,7	51,7	0,0260	+1,34	-1,6 + 2,3 = +0,7	52,4	0,0264	+1,38
	2-3	700	12,2 - 1,0 = +11,2	61,1	0,0440	-2,69	+1,6 - 1,7 = -0,1	61,0	0,0439	-2,68
	2-1	400	+12,2	124,2	0,0113	-1,40	+1,6	125,8	0,0115	-1,44
			$\Sigma (Sq)_I = 0,106$				$\Delta h_I = 0,33$		$\Delta h_I = +0,27$	
			$\Delta q_I = -[0,33 / (2 \cdot 0,106)] \approx -1,6$							
II	4-5	950	-5,5	60,9	0,0576	+3,51	-2,3	58,6	0,0554	13,25
	3-5	600	+5,5 + 3,0 = +8,5	50,8	0,0323	-1,64	+2,3 - 1,1 = +1,2	52,0	0,0331	-1,72
	3-4	500	+5,5 - 12,2 = -6,7	51,7	0,0260	-1,34	+2,3 - 1,6 = +0,7	52,4	0,0264	-1,38
			$\Sigma (Sq)_{II} = 0,116$				$\Delta h_{II} = +0,53$		$\Delta h_{II} = +0,14$	
			$\Delta q_{II} = -[0,539 / (2 \cdot 0,116)] \approx -2,3$							

№ кольца	№ участка	l, м	I исправление				II исправление			
			$\Delta q$ , л/с	$q_1$ , л/с	$Sq$	$h_1 = Sq_1^2$ , м	$\Delta q$ , л/с	$q_2$	$Sq_2$	$h_2 = Sq_2^2$ , м
III	3-5	600	+3,0 + 5,5 = +8,5	50,8	0,0323	+1,64	1,1 + 2,3 = +1,2	52,0	0,0331	+1,72
	5-6	650								
	3-7	550	+3,0	26,7	0,0513	+1,36	-1,1	25,6	0,0492	+1,26
	6-7	850	-3,0 - 1,0 = -4,0	30,0	0,0459	-1,38	+1,1 - 1,7 = -0,6	29,4	0,045	-1,32
			-3,0	23,0	0,0536	-1,13	+1,1	24,1	0,0562	-1,35
			$\Sigma (Sq)_{III} = 0,183$			$\Delta h_{III} = +0,39$		$\Delta h_{III} = +0,31$		
			$\Delta q_{III} = - [0,39/2 \cdot 0,183] = -1,1$							
IV	2-3	700	-1,0 + 12,2 = +11,2	61,1	0,0440	+2,69	-1,7 + 1,6 = -0,1	61,0	0,0439	+2,68
	3-7	550								
	2-7	1350	+1,0	29,8	0,114	-3,39	+1,7	31,5	0,120	-3,79
				$\Sigma (Sq)_{IV} = 0,204$			$\Delta h_{IV} = +0,68$		$\Delta h_{IV} = +0,21$	
			$\Delta q_{IV} = - [0,68/2 \cdot 0,204] = -1,7$							

Обычно принимают, что невязки в отдельных кольцах не должны превышать 0,5 м, а по внешнему контуру - 1-1,5 м (для сетей средней протяженности). После I исправления невязки в двух кольцах и по внешнему контуру превосходят принятое допустимое значение; после II невязки во всех кольцах и по внешнему контуру не превосходят допустимых значений.

Ниже приводится увязка по методу Андрияшева той же сети, которая была рассчитана по методу Лобачева. Все записи расчета ведут на расчетных схемах. На схеме, представленной на рис. 3.10, а показан пример записи расчета для начального (верхняя строка) и конечного (нижняя строка) распределения расходов: первая цифра - расход л/с; вторая - потеря напора, м. Цифры у стрелок внутри колец указывают значения невязок; начальные - у пунктирной стрелки и конечные - у сплошной стрелки; цифры в рамках - сопротивления участков.

Для наглядности на рис. 3.10, б показана схема определения увязочных расходов для данного примера расчета. В первый контур включают I, II и IV кольца. Используя приближенную формулу для определения поправочного расхода, получают

$$\Delta q_I = - \Delta h_I q_{срI} / [2(\Sigma h_{ик})_I] = 4,12 \cdot 72 / 2 \cdot 15 \approx -10 \text{ л/с,}$$

$$\text{где } \Delta h_{(1-2-7-3-5-4-1)} = 4,12 \text{ м; } q_{ф(1-2-7-3-5-4-1)} = 72 \text{ л/с; } \Sigma h_{(1-2-7-3-5-4-1)} = 15 \text{ м.}$$

Но для определения поправочного расхода этого контура целесообразнее использовать метод пробных расходов, так как в первый контур включают участки со значительно отличающимися длинами, диаметрами и расходами. Поправочный расход, как будет видно из дальнейшего, определенный по приведенной выше приближенной формуле, окажется завышенным. Поэтому сначала по контуру пропускается пробный расход  $\Delta q_0 = -2$  л/с; при пропуске этого расхода по первому контуру снижается невязка на 1,03 м, т.е. остаточные невязки будут  $4,12 - 1,03 = 3,09$  м и окончательный поправочный расход составит

$$\Delta q_I = -2 (3,09/1,03) \approx -6 \text{ л/с.}$$

Суммарный поправочный расход

$$\Delta q_I = -2 - 6 = -8 \text{ м.}$$

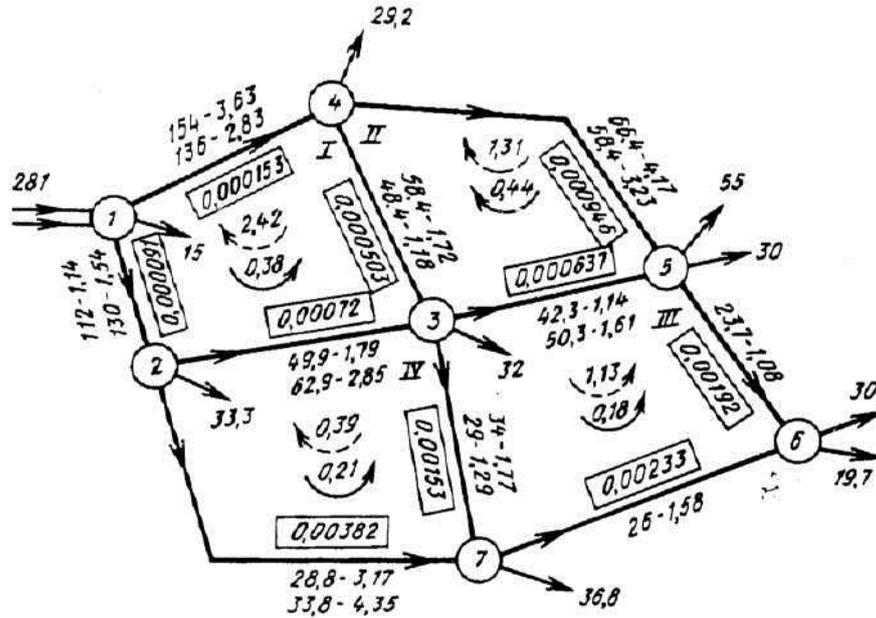
Во второй контур входит кольцо //. Поправочный расход второго контура

$$\Delta q_{II} = -1,86 \cdot 41 / (28,08) \approx -10 \text{ л/с.}$$

Поправочный расход третьего контура

$$\Delta q_{III} = -(-1,57 \cdot 41) / (28,83) \approx +3 \text{ л/с.}$$

а)



б)

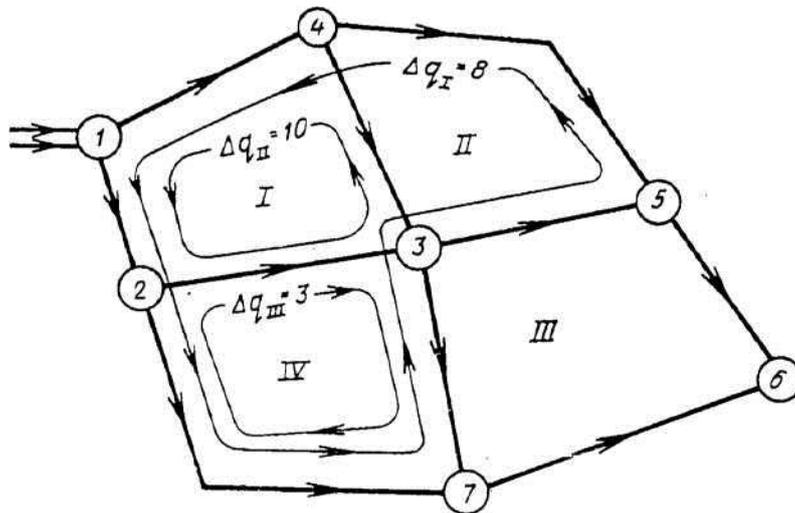


Рис. 3.10. Увязки кольцевой сети по методу М.М. Андрияшева  
а - запись результатов расчета; б - схема внесения увязочных расходов

Невязка в отдельных кольцах после третьего перераспределения расходов не превышает 0,5 м. Общая невязка по контуру сети составляет 0,33 м.

## 6. 5. СОВМЕСТНАЯ РАБОТА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ (СПРВ)

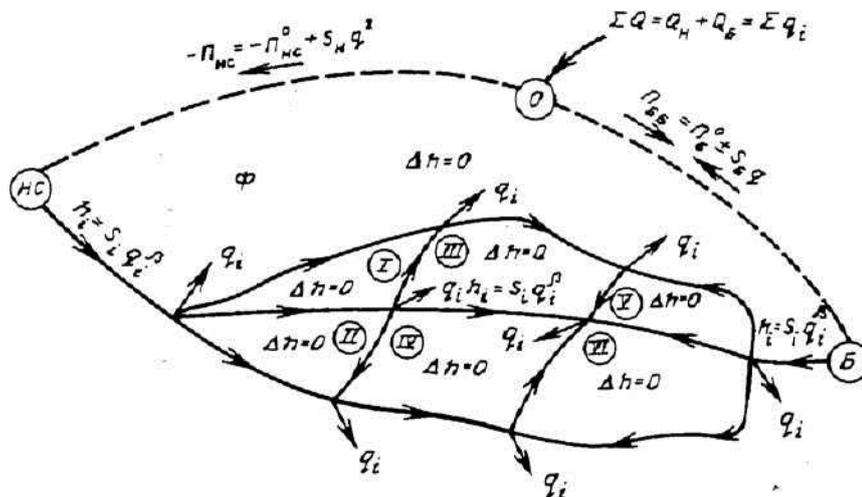
Как указывалось выше, все элементы систем: подачи и распределения воды представляют единую гидравлическую систему. Поэтому после назначения параметров насосных станций, регулирующих емкостей, нефиксированных отборов и диаметров линий сети необходимо провести поверочные расчеты при различных режимах водопотребления и работы элементов системы. Они позволяют узнать, как будет работать система, т.е. определить фактические подачи и напор насосных станций, пополнение и сработку регулирующих емкостей, фактические отборы и напоры в узлах нефиксированных отборов, напоры в различных узлах сети и т.д. Эти поверочные расчеты носят название внешней увязки. Их проведение в реальной практике без использования ЭВМ нереально.

Для проведения внешней увязки системы, имеющей  $e > 1$  водопитателей и нефиксированных отборов, необходимо (дополнительно к уравнениям для внутренней увязки) иметь  $e - 1$  уравнение вида  $F(Q)_M - F(Q)_K = (\sum h)_{MK}$ . Указанные уравнения отражают II закон Кирхгофа для «фиктивных» колец, образованных линиями реальной сети и условными «фиктивными» линиями, отображающими напорно-расходные характеристики водопитателей.

Расчетная схема СПРВ приведена на рис. 3.11. По результатам увязки сети при заданных  $Q_H$  и  $Q_6$  определяются требуемые напор насосов  $H_H$  и высота водонапорной башни  $H_6$ .

По полученным значениям  $Q_H$  и  $H_H$  выбирают марки и число насосных агрегатов, а также геометрические размеры регулирующей емкости.

Нахождение действительных  $Q$  и  $H$ , которые будут обеспечиваться насосной станцией и регулирующей водонапорной башней, возможно лишь при анализе результатов внешней увязки (поверочных расчетов). При этом насос задается его каталожной характеристикой  $H_H = F(Q)_M$ , а башня - расчетной отметкой уровня воды в ее баке  $H_6 = F(Q)_K$ .



**Рис. 3.11.** Расчетная схема системы подачи и распределения воды

Обычно характеристика  $Q-H$  насосов может быть выражена двухчленной зависимостью. Для нахождения величин  $H_0$  и  $S_H$  необходимо решить систему уравнений:

$$H_1 = H_0 - S_H q_1^2; H_2 = H_0 - S_H q_2^2$$

где  $H_1$  и  $H_2$  - напоры, развиваемые при расходах  $Q_1$  и  $Q_2$ ,  $q_1 = Q_1$  и  $q_2 = Q_2$  - расходы на границах рабочей зоны каталожной характеристики насоса

Для возможности учета в процессе расчета взаимного высотного расположения насосной станции и водонапорной башни необходимо привязать их характеристики к

фактическим пьезометрическим отметкам. Пьезометрическая отметка, соответствующая напору насосной станции, выражается уравнением

$$P_{nc} = P_{nc}^0 - S_n q^2$$

где  $P_{nc}^0 = Z_{cm} + H_o$  - пьезометрическая отметка, соответствующая напору насосной станции при полностью закрытой задвижке на напорном патрубке, т.е. при  $q = 0$ ;  $Z_{ct}$  - отметка уровня и резервуаре чистой воды.

Пьезометрическая отметка, соответствующая уровню воды в баке водонапорной башни в конце рассматриваемого режима с учетом его сработки (пополнения), определяется формулой

$$P_{ББ} = P_{Б}^0 + 3600tq/F$$

где  $P_{Б}^0 = P_{Б} + h_0$  - пьезометрическая отметка, соответствующая уровню в баке в начальный момент рассматриваемого режима потребления ( $P_{Б}$  - пьезометрическая отметка, соответствующая дну бака;  
 $h_0$  - высота слоя воды в баке в начальный момент рассматриваемого режима водопотребления);  
 $t$  - продолжительность рассматриваемого режима водопотребления;  
 $q$  - расход, идущий из бака (в бак);  
 $F$  - площадь зеркала воды в баке башни (резервуар).

В рассматриваемой расчетной схеме, помимо реально существующих колец, образованных магистральными линиями сети  $I...VI$ , существует фиктивное кольцо  $\Phi$ . Оно образовано двумя фиктивными ветвями, соединяющими фиктивный узел  $O$  с насосной станцией и башней, и любой цепью участков сети и водоводов (реальной системы), соединяющих насосную станцию с башней. В расчетный момент водопотребления в узел  $O$  поступает расход, равный  $\sum q_i$ , т.е. сумме фиксированных отборов из сети. Фиктивные линии не имеют реальных сопротивлений. Им условно присваивают напоры, соответствующие напорам, создаваемым насосами и башней. Для соблюдения равенства

$P_{nc} = P_{ББ} + \sum h_i$ , т.е.  $-P_{nc} + P_{ББ} + \sum h_i = 0$ , составляющие формулы, по которой вычисляется пьезометрическая отметка, соответствующая напору насосной станции, пишутся с обратным знаком (см. рис. 3.11). Если расход, поступающий от насосной станции, больше водопотребления города, то избыток поступает в башню. В этом случае движение воды в линии  $B-O$  происходит от узла  $B$  к узлу  $O$  и величина  $S_B q$  имеет положительный знак. Если происходит срабатывание резервуара, то расход имеет направление движения от узла  $O$  к узлу  $B$  и величина  $S_B q$  будет отрицательной. Обход всего фиктивного контура позволяет составить уравнение, связывающее  $P_{nc}$  и  $P_{ББ}$  через суммарные потери напора в сети:  $-P_{nc} + P_{ББ} + \sum h_i = 0$ .

При проведении увязки поправочный расход определяют по формуле:

$$\Delta q = - ( \Delta h / \sum \beta S_i q^{\beta-1} )$$

где  $\Delta h$  - невязка, т.е. сумма величин  $P_{ББ} + \sum h_i$  и  $P_{nc}$ , значения которых вычисляются по приведенным выше формулам;

$$\sum \beta S_i q^{\beta-1} = 2S_n q + 2\sum S_i q_i + S_B (S_i - \text{сопротивление насосной станции } S_n, \text{ водоводов и линий сети, а также башни } S_B).$$

Увязка системы позволяет определить фактические расходы, подаваемые насосной станцией и башней, напоры, развиваемые ими, а также свободные напоры в узлах сети.

Следует отметить, что расчет разветвленных сетей с учетом характеристик водопитателей ничем не отличается от внешней увязки кольцевой сети.

## Глава 7. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СИСТЕМ ПОДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ

### 7.1. ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ВОДОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

Как указывалось ранее, гидравлические расчеты систем подачи и распределения воды производятся при уже назначенных диаметрах и ставят целью определить истинные расходы в линиях сети, а также соответствующие им величины потерь напора.

В общем виде задача расчета сводится к нахождению такого распределения воды и соответствующих диаметров, которые отвечали бы наибольшей экономичности как сети, так и связанных с ней насосных станций и регулирующих емкостей при соблюдении требований надежности.

Отличие от расчета систем подачи и распределения воды, когда диаметры назначены, при технико-экономическом расчете неизвестными являются как расходы  $q_{ik}$ , так и диаметры  $d_{ik}$ . Тогда общее число неизвестных расходов и диаметров в системе, имеющей  $p$  участков, равно  $2p$ . В случае нахождения расходов и диаметров все потери напора в линиях сети будут найдены одним, единственным образом. Однако при рассмотрении задачи неизвестные  $q_{ik}$  и  $d_{ik}$  между собой не связаны и не могут быть выражены одни через другие, так как диаметры труб еще не известны и, следовательно, не известны гидравлические сопротивления участков, которые позволяли бы выразить  $h_{ik}$  через соответствующее  $q_{ik}$ .

Для нахождения неизвестных могут быть использованы  $n$  контурных уравнений типа  $\sum h_{ik} = 0$  или  $(\sum k q_{ik}^\beta / d_{ik}^m l_{ik}) = 0$ , а также  $m - 1$  узловых уравнений вида  $\sum q_{ik} + Q_i = 0$ , т.е.  $m + n - 1 = p$  уравнений.

Недостающие  $p$  уравнений могут быть получены из условий получения минимума приведенных затрат  $P_{np}$  по системе в целом. Они имеют вид  $\partial P_{np} / \partial d_{ik} = 0$ . Число уравнений данного вида при соблюдении условий гидравлических связей будет в сумме равно  $p$ . Формула для расчета приведенных затрат  $P_{np}$  для простейшей системы была приведена ранее в гл. 5. Все величины, входящие в выражение  $P_{np}$ , кроме  $d_{ik}$  и  $q_{ik}$ , принимают для расчета заданными. Из трех величин  $q_{ik}$ ,  $d_{ik}$  и  $h_{ik}$  для каждого участка сети независимыми переменными являются только два. Искомые величины  $q_{ik}$  и  $d_{ik}$  должны соответствовать наименьшему значению  $P_{np}$ . Для этого необходимо исследовать экстремальные значения функции  $P_{np}$ . Так как расходы и потери напора в сетях связаны соответственно I и II законами Кирхгофа, задача состоит в определении условного экстремума функции  $P_{np}$  при соблюдении условий увязки:  $\sum q_{ik} + Q_i = 0$  для всех узлов и  $\sum h_{ik} = 0$  для всех колец сети.

Исследование функции  $P_{np}$  на экстремум показывает, что найти одновременно экономически наиболее выгодные диаметры и определить расходы воды по линиям водопроводной сети не представляется возможным, так как найденное потокораспределение в сети отвечает не минимуму функции  $P_{np}$ , а ее максимуму. Этот же анализ указывает на то, что минимальное значение функция  $P_{np}$  будет иметь в том случае, если кольцевая сеть превратится в разветвленную. Однако применение кольцевых сетей вызывается необходимостью обеспечения определенного уровня надежности работы системы. Для этой цели требуются дополнительные затраты.

Если задаться первоначальным потокораспределением в кольцевой сети, то оказывается, что найденные  $d_{ik}$  из уравнений  $\partial P_{np} / \partial d_{ik} = 0$  являются наиболее выгодными, т.е. соответствуют наименьшему значению  $P_{np}$ .

Таким образом, для нахождения экономически выгодных диаметров линий сети требуется знание предварительного потокораспределения, назначаемого из условий обеспечения заданного уровня надежности системы.

## 7.2. МЕТОДЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

Для нахождения экономически выгодных диаметров линий водопроводной сети при заданном потокораспределении существует значительное число методов и их модификаций. В последние годы появился ряд новых методов оптимизационных расчетов водопроводных сетей, базирующихся на построении непрерывных математических моделей и методах дифференциального исчисления.

Наиболее известным из классических методов оптимизации является метод проф. Л.Ф. Мошнина. Сущность этого метода заключается в следующем. Затраты энергии на транспортирование воды в количестве  $Q$  по одиночному водоводу без попутных расходов, в котором потери напора равны  $H$ , можно выразить:  $\mathcal{E} = QH$ .

В более общем случае - при рассмотрении водоводов с попутными расходами, разветвленной и кольцевой сети эта формула дает лишь часть затрат энергии, связанных с преодолением трения в трубах. Если подсчитать по этой формуле затраты энергии на транспортировку воды по каждой из линий сети, принимая для каждой из них свое значение  $q_{ik}$  и затем просуммировать затраты энергии по всем линиям, то эта сумма будет меньше общих затрат энергии, равных произведению суммарного расхода  $Q$  на напор  $H$ . Напор  $H$  представляет собой сумму потерь напора от начальной точки до конечной «диктующей» точки сети.

Величина  $QH$  оказывается больше суммы затрат энергии по каждой из линий сети вследствие существования дополнительных затрат энергии, также связанных с потерями напора в сети. Эти дополнительные потери вызваны тем, что в ряде точек водоразбора сети давление оказывается выше того, которое необходимо для обеспечения нормального водоразбора. Это объясняется тем, что давление в какой-либо точке водоразбора приходится принимать равным сумме свободного напора в «диктующей» конечной точке сети и потерь напора от рассматриваемой точки водоразбора до этой «диктующей» точки. Таким образом, потери напора по какой-либо линии сети вызывают затраты энергии не только на транспортировку воды по этой линии, но и могут вызывать затраты энергии на излив воды в лежащих выше точках водоразбора под давлением, превышающим необходимое.

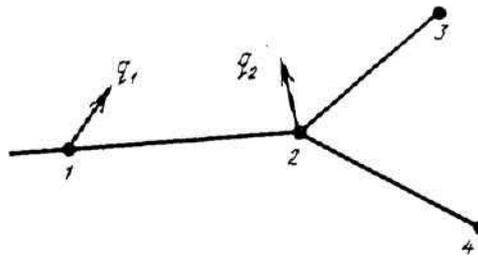
При определении наивыгоднейших диаметров линий сети необходимо учитывать взаимодействие линий, связанных между собой условиями I и II законов Кирхгофа.

Затраты энергии в той или иной степени зависят от потерь напора в любой из линий сети, независимо от того, входят или не входят линии в тот ход от начала сети до ее конечной точки, по которому определяется величина  $H$ . Поэтому вместо того, чтобы определять величину  $H$  как сумму потерь напора по какому-либо одному ходу и затем вводить условия «увязки сети», величину  $H$  можно представить как функцию потерь напора по всем линиям сети, что аналитически записывается как  $H = f(h_{ik})$ .

Найдем эту функцию в виде суммы произведений, каждое из которых равно потере напора по одной из линий сети, умноженной на некоторый поправочный коэффициент  $x_{ik}$  т.е. примем, что  $H = \sum x_{ik} h_{ik}$ , суммирование распространяется на все линии сети.

Выясним значение коэффициентов  $x_{ik}$ . Для этого рассмотрим простейшую разветвленную сеть (рис. 3.12). В сеть через узел 1 поступает вода в количестве  $Q$ . В узлах 1 и 2 имеются сосредоточенные расходы  $q_1$  и  $q_2$ . Таким образом, по линии 1-2 протекает расход  $q_{12} = Q - q_1$ ; сумма расходов по линиям 2-3 и 2-4 равна расходу по линии 1-2 за вычетом узлового расхода  $q_2$ . Предположим, что

Рис. 3.12. Разветвленная сеть



рассматриваемая сеть (плоская), т.е. во всех точках водоразбора требуемые пьезометры одинаковы. Неравенство между собой требуемых пьезометров никаких принципиальных изменений в рассматриваемый вопрос не вносит. Если сеть «плоская», то для обеспечения требуемых пьезометров в концевых точках водоразбора необходимо, чтобы пьезометр в узле 1 превышал требуемый пьезометр в одной из концевых точек водоразбора на величину потерь напора от узла 1 до этой точки. Так как в узлах 3 и 4 требуемые пьезометры одинаковы, то при равенстве потерь напора в линиях 2-3 и 2-4 напор в узле 1 будет один и тот же, при подсчете как по точке 3, так и по точке 4.

Тогда можно записать

$$H = \sum x_{ik} h_{ik} = x_{1,2} h_{1,2} + x_{2,3} h_{2,3} + x_{2,4} h_{2,4}$$

Так как по условию «увязки сети»  $h_{2,3} = h_{2,4}$ , то

$$H = x_{1,2} h_{1,2} + h_{2,3} (x_{2,3} + x_{2,4})$$

С другой стороны, известно, что

$$H = h_{1,2} + h_{2,3}$$

Сопоставляя эти два равенства, найдем

$$h_{1,2} + h_{2,3} = x_{1,2} h_{1,2} + h_{2,3} (x_{2,3} + x_{2,4})$$

Легко убедиться, что это выражение при любых значения  $h_{1,2}$  и  $h_{2,3}$  будет справедливо, если окажется, что  $x_{1,2} = 1$  и  $x_{2,3} + x_{2,4} = 1$ .

Установленные соотношения показывают, что коэффициенты  $x_{ik}$  можно рассматривать как некоторые фиктивные расходы, протекающие транзитом от начала сети до ее концевых точек. Действительно, если в сеть поступает фиктивный расход, равный 1, то такой же расход будет перетекать по линии 1-2; в соответствии с этим  $x_{1,2} = 1$ . В узле 2 этот расход разделяется на два, один из которых оттекает от узла 2 по линии 2-3, а второй - по линии 2-4. Очевидно, сумма этих двух расходов равна 1; в соответствии с этим

$$x_{2,3} + x_{2,4} = 1$$

Таким образом, определение коэффициентов  $x_{ik}$  можно производить исходя из баланса расходов в узлах сети, рассматривая их как некоторые фиктивные расходы. В общем виде для кольцевой сети, имеющей  $m$  узлов, система уравнений баланса фиктивных расходов в узлах будет иметь  $m - 1$  уравнение вида  $\sum x_{ik} = 0$ .

Однако для определения расходов воды  $n_0$  линиям сети недостаточно трех уравнений, которые могут быть получены исходя из баланса расхода воды в узлах. Для получения недостающих уравнений необходимо использовать также условия «увязки сети». В применении к рассматриваемой сети это означает, что для определения коэффициентов  $x_{ik}$  линий надлежит использовать уравнения  $h_{2,3} = h_{2,4}$ . Для кольцевой сети это условие определится  $n$  уравнениями вида  $\sum h_{ik} = 0$ .

Так как

$$x_{ik} = \frac{2 \frac{q_{ik}}{AQ} + \frac{(\alpha+m) l_{ik}}{AQ} - \frac{(\alpha+m) h_{ik}}{AQ}}{AQ}$$

где

$$A = \frac{P}{(R + E) b k^{\alpha/m}}; \beta = 2$$

то

$$h_{ik} = \frac{2\alpha(\alpha+m) q_{ik} I_{ik}^{-m/(\alpha+m)}}{(AQ) x}$$

Поскольку  $(AQ)^{m/(\alpha+m)}$  есть величина постоянная, то для каждого кольца

$$\sum q_{ik}^{2\alpha(\alpha+m)} I_{ik} X^{m/(\alpha+m)} = 0$$

Система уравнений (3.4) есть система контурных уравнений увязки колец по фиктивным расходам  $x_{ik}$ . Величину  $q^{2\alpha(\alpha+m)} I_{ik}$  можно рассматривать как фиктивные сопротивления  $S_{fik}$ . Тогда фиктивные потери напора в линиях сети

$$h_{fik} = S_{fik} X^{m/(\alpha+m)}$$

Увязав сеть по фиктивным расходам, найдем значения  $x_{ik}$ , отвечающие I и II законам Кирхгофа. В общем виде связь между коэффициентами  $x_{ik}$  и диаметрами линий имеет вид

$$d_{ik} = \vartheta^{1/(\alpha+m)} (X_{ik} Q)^{1/(\alpha+m)} q_{ik}^{\beta/(\alpha+m)}$$

Округление диаметров до их стандартных значений производится путем определения приведенных расходов

$$q_{пр ik} = \left( \frac{\vartheta}{\vartheta_T} \frac{Q x_{ik}}{q_{ik}} \right)^{1/(1+\beta)} q_{ik}$$

с помощью таблиц предельных расходов.

Значительная трудоемкость расчетов без применения ЭВМ долгое время сдерживала использование этого метода в полном объеме. В этой связи широко применялись и продолжают применяться приближенные методы отыскания экономически наиболее выгодных диаметров. Они предусматривают, например, использование значений  $x_{ik}$ , определенных по результатам их разброски, по линиям сети с соблюдением лишь баланса расходов в узлах. Иногда диаметры линий сети определяются для условий независимой их работы. В этом случае учитывается действительный расход и экономический фактор. Существуют и другие способы приближенного расчета.

## Глава 8. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭВМ В ПРАКТИКЕ РАСЧЕТОВ СИСТЕМ ПОДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ (СПРВ)

### 8.1. ТИПЫ РЕШАЕМЫХ ЗАДАЧ

Исходя из рассмотренных выше методов гидравлического и технико-экономического расчетов водопроводных сетей, можно выделить две принципиальные группы: гидравлические расчеты, ставящие целью отыскание истинных расходов воды по линиям сети, потерь напора в них, напоров в узлах и условий работы водопитателей; технико-экономические расчеты по отысканию диаметров линий сети, отвечающих минимуму приведенных затрат. Анализ встречающихся на практике гидравлических задач по проектированию и эксплуатации систем водоснабжения позволяет исследовать

влияние различных частей системы водоснабжения на работу ее в целом. Основной информацией, получаемой в результате расчета, являются данные о расходах и потерях напора в линиях, расходах воды, поступающих от водопитателей, характеристиках нефиксированных отборов, пьезометрических отметках в узлах сети.

Ниже представлено несколько основных типов задач, которые встречаются в практике расчета систем подачи и распределения воды. Они решаются с использованием ЭВМ. Задачи первого типа предусматривают отыскание основных параметров системы по заданным условиям работы водопитателей, которые характеризуются напором или  $Q$ - $H$  характеристикой. Кроме того, определяют узлы, в которых найденные расчетом пьезометрические отметки меньше требуемых, и недостающий напор. Помимо этого, проводятся расчеты с изменяющимися пьезометрическими отметками одного из водопитателей, позволяющие определить требуемый напор в заданном водопитателе с учетом ограничений в диктующей точке.

Задачи второго типа предназначены для определения напоров на некоторых из насосных станций и отметок уровня воды в резервуарах, при которых фактические пьезометрические отметки в диктующих точках сети оказываются равными заданным. Проводятся расчеты с изменением отборов воды в одной из точек сети. В результате расчетов определяют основные данные, диктующие узлы и требуемые напоры у водопитателей.

Задачи третьего типа предусматривают проведение серии расчетов, на основе которых выбираются характеристики насосов как основных, так и регулирующих насосных станций, а также уровни воды в резервуарах и башнях.

Технико-экономические расчеты позволяют при заданном режиме водопотребления определять экономически выгодные диаметры участков сети, отвечающие минимуму приведенных затрат, и соответствующие им требуемые напоры водопитателей, а также находить оптимальные диаметры линий сети, если напоры водопитателей заданы. Кроме того, они позволяют определять экономичность принятых решений на стадии решения задач первой группы. Они носят поверочный характер.

## 8.2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭВМ ПРИ РАСЧЕТАХ СПРВ

ЭВМ для решения задач СПРВ стали использовать несколько десятилетий назад. В своем развитии ЭВМ прошли ряд этапов, каждый из которых создавал новые возможности для их применения. Поэтому одновременно с вычислительной техникой развивались и продолжают развиваться методы создания программ для их эксплуатации.

Программы последующих поколений, как правило, не повторяют автоматически старые программы. При их разработке учитываются и используются возможности, предоставляемые новыми машинами. Эти программы по сравнению с программами предыдущего поколения более удобны в эксплуатации, позволяют учесть при расчете большее число факторов, решать задачи большей размерности, требуют меньше машинного времени.

Применение ЭВМ позволяет не только ускорить решение задач по расчету СПРВ, отличающихся при ручном счете чрезвычайной трудоемкостью, но и решать принципиально новые задачи, сама постановка которых была невозможна до их появления. Так, если гидравлическая увязка несложных сетей еще возможна с помощью ручного счета, то проведение многовариантных расчетов при различных режимах водопотребления, учитывающих совместную работу различных водопитателей и сетей, сравнение различных вариантов СПРВ по технико-экономическим показателям и т.п., как правило, в реальной практике невозможно без применения ЭВМ.

Реализация решения задач расчета СПРВ на ЭВМ осуществляется на нескольких этапах: инженерная постановка задач, создание математической модели, выбор численных методов, программирование задачи, отладка программ, проведение расчетов и анализ результатов.

Инженерная постановка задач рассмотрена в ранее рассмотренных материалах. Математическая модель задач гидравлического и технико-экономического расчетов базируется

на системе линейных и нелинейных уравнений, отражающих I и II законы Кирхгофа для узлов и контуров сети, а также на функции приведенных затрат.

Для перехода от аналитического выражения решения к конкретным числовым результатам необходимы численные методы решения задач, Расчеты на ЭВМ, как правило, производятся достаточно простыми методами, легко поддающимися программированию. Универсальных методов, позволяющих решать новые задачи, нет. Поэтому для каждой конкретной задачи выбирают тот, который в данном случае дает лучшую сходимость и достаточно прост в реализации. В большинстве программ расчета СПРВ, находящихся применение в практике проектирования, используют метод Лобачева-Кросса и его модификации. Подробно о численных методах решения задач СПРВ можно познакомиться в литературе, посвященной их расчету.

Длительное использование ЭВМ для расчета систем подачи и распределения воды привело к созданию большого числа программ, различных по совершенству и области применения. Если первые программы ставили своей целью механизировать увязку колец, то современные комплексные программы позволяют проводить предварительное распределение расходов воды по участкам, назначать диаметры линий сети по экономическому принципу, определять пьезометрические отметки в узлах сети и выявлять диктующие точки: выбирать параметры питающих и регулирующих насосных станций; определять режим дросселирования при перепуске воды из верхней зоны в нижнюю; определять значения отборов, зависящие от давления, режима сработки и пополнения регулирующих емкостей; изменять схемы и диаметры тех или иных участков; проводить серии расчетов по заданному графику водопотребления и т.п. Разработанные программы позволяют вести счет как в автоматическом, так и диалоговом режиме. Они используются для проектирования новых и реконструируемых сетей. Кроме того, их применение позволяет принимать решения в процессе эксплуатации СПРВ для выбора режима работы системы при оперативном управлении. Широкому использованию ЭВМ в практике решения всевозможных задач СПРВ способствует тот факт, что современные комплексные программы ориентированы на специалистов, достаточно опытных в области проектирования и эксплуатации, но не знакомых с теми дисциплинами, которые необходимы разработчикам программ. К указанному типу, например, относятся программы, в основу которых положен метод расчета СПРВ, разработанный НИИ ВОДГЕО.

### **8.3. ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПО ВЫБОРУ ВАРИАНТОВ И ОЧЕРЕДНОСТЬ ИХ РАССМОТРЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ СПРВ**

Для возможности проведения гидравлических и технико-экономических расчетов на ЭВМ прежде всего необходимо иметь модель реальной системы подачи и распределения воды. Она представляется в виде идеализированной водопроводной сети. Степень соответствия ее реальной системе зависит от ряда факторов: сложности реальной СПРВ, необходимой глубины проработки, требуемой точности расчетов, возможностей ЭВМ и др. С учетом этих факторов отдельные схемы, изображающие СПРВ на различных стадиях ее развития или при различных режимах работы, следует рассматривать как подмножество общей схемы, отражающей систему в наиболее полной фазе развития. Эта общая схема называется структурной схемой или информационной моделью. Она, как правило, непосредственно для проведения расчетов не используется, так как при ее составлении определяется только расположение водопитателей и топология трубопроводной сети. Но она позволяет генерировать все возможные для данной системы расчетные схемы на единой информационной базе. Основой информационной модели служит схема сети трубопроводов на конец развития какого-либо этапа системы водоснабжения. При ее построении отображаются с требуемой степенью детализации водоводы, магистрали и

распределительные линии, а также насосные станции, резервуары, башни и т.д. Такой способ представления информации по сети удобен как для качественного и количественного восприятия инженером, так и для предоставления информации о ней в памяти машины.

Рассмотренный подход представляет большие возможности при анализе СПРВ городов, так как позволяет совмещать в одной расчетной схеме подсистемы с различной степенью детализации. В результате этого может быть выполнен детальный анализ подсистемы с учетом достаточно полного ее взаимодействия со всей системой подачи и распределения воды с помощью программ расчета, предназначенных для расчета схем водопроводных систем средних и малых размеров. В этом случае, если система не очень сложна, то структурная схема может совпадать с ее расчетной схемой.

Проведение гидравлических расчетов систем подачи и распределения воды может потребовать больших затрат времени на составление расчетных схем и анализ результатов расчета. Существенного его сокращения можно добиться при четком разграничении задач, решаемых на каждом этапе расчетов. Рассмотрим основные положения рекомендаций, основанные на опыте НИИ ВОДГЕО и других организаций по проведению этих расчетов. Они проводятся в три этапа.

На первом этапе расчета назначается некоторое предполагаемое распределение нагрузок между водопитателями, задаются расходы воды, подаваемые в резервуары (башни) или поступающие на них. По результатам расчета, проводимого без учета характеристик насосов и высотного расположения резервуаров, определяются напоры на выходе из питающих насосных станций и отметки уровней воды в резервуарах. Это позволяет выбрать оборудование насосных станций и параметры регулирующих емкостей. Излишняя детализация расчетов на этом этапе, как правило, приводит к большим бесполезным затратам машинного времени.

На втором этапе определяется влияние саморегулирования системы на изменение нагрузок между водопитателями. Результаты этих расчетов позволяют уточнить объемы регулирующих емкостей. Зачастую уточненные объемы регулирующих емкостей значительно отличаются от определенных по результатам первого этапа. Это приводит к необходимости повторения расчетов первого этапа при уточненном распределении нагрузок между основными водопитателями.

Поверочные расчеты работы системы при авариях на тех или иных элементах и при пожаротушении проводятся на третьем этапе. Они выполняются с учетом характеристик насосных станций и изменения уровней воды в резервуарах.

Приведенная последовательность расчетов рекомендуется для вновь проектируемых систем без учета очередности развития и ввода в эксплуатацию ее отдельных элементов.

При проектировании развивающихся и реконструируемых СПРВ по очередям развития рассмотрение условий работы систем начинается не с начальной, а с некоторой последующей стадии развития, для которой выявляются узкие места, образующиеся в результате роста водопотребления. Следует обратить внимание на взаимосвязь гидравлических и технико-экономических расчетов.

Для разветвленных сетей вновь проектируемых систем потокораспределение не зависит от выбираемых диаметров труб, поэтому технико-экономический расчет таких сетей может предшествовать гидравлическому. Проведение гидравлического расчета позволяет лишь уточнить потери напора в линиях сети и требуемые напоры в точках питания.

Для кольцевых сетей расчетные расходы зависят не только от величин отборов, но и от выбранных диаметров. При такой постановке вопроса это означает, что методы технико-экономического расчета при заданном потокораспределении в применении к кольцевым сетям могут быть использованы как поверочные.

В зависимости от того, задавались ли первоначально потокораспределение или предварительно выбранные диаметры, поверочный технико-экономический расчет определит,

насколько распределение расходов отличается от желаемого или насколько предварительно выбранные диаметры труб отличаются от оптимальных.

При одновременной прокладке проектируемых трубопроводов, что характерно для большинства систем водоснабжения городов и промышленных объектов, необходимо учитывать как фактические характеристики уже существующих линий, так и их загрузки.

Выбор оптимальных проектных: решений по развитию и реконструкции действующих водопроводов тесно взаимосвязан с установлением оптимальных режимов использования уже имеющихся сооружений и устройств, что является задачей автоматической системы управления производственными процессами (АСУП). Он базируется на той же информации, которая требуется для выбора оптимальных проектных решений и проведения гидравлических и технико-экономических расчетов СПРВ. Поэтому необходимо, чтобы техникой выполнения расчетов СПРВ владели не только проектные, но и эксплуатационные организации. Достигнутый уровень гидравлического и технико-экономического расчетов с помощью ЭВМ позволяет поставить и успешно решить такую задачу.

## **Глава 9. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ЗОННЫХ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

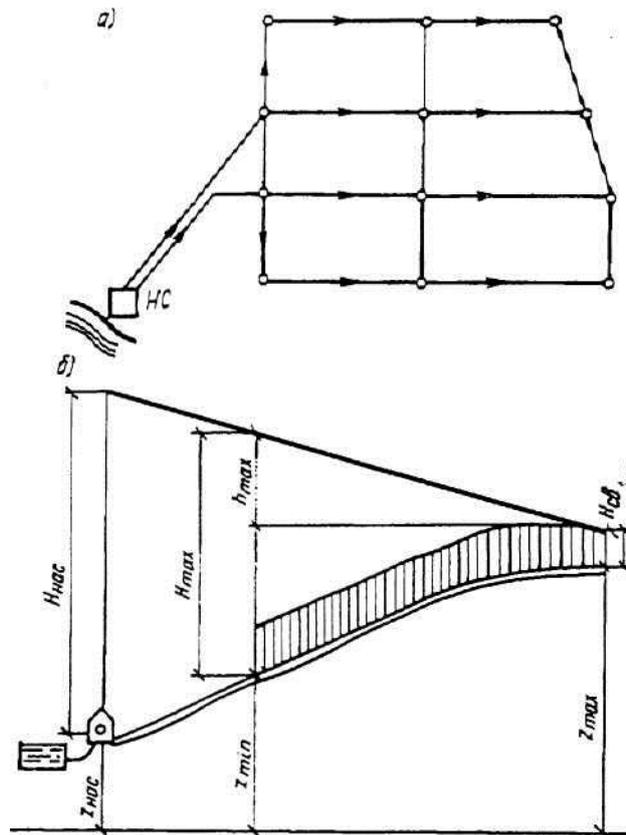
### **9.1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ**

Основным принципом, по которому проектируются и строятся современные системы водоснабжения, является устройство централизованных систем водоснабжения. Создание единого водопровода, охватывающего всех потребителей обслуживаемого объекта или района, как правило, обеспечивает наименьшие затраты средств на сооружение и эксплуатацию системы подачи и распределения воды. Однако в ряде случаев наличие разнородных требований, которые предъявляют отдельные группы потребителей к системе водоснабжения, делает целесообразным вместо единой системы устраивать несколько более или менее самостоятельных систем водоснабжения для обслуживания соответствующих групп потребителей. При этом учитывается различие требований отдельных потребителей к напорам, характер планировки снабжаемых водой объектов и рельеф местности, а в ряде случаев и различие требований к степени водоподготовки.

Снабжение водой подобных объектов обуславливает необходимость производить группировку потребителей по их требованиям к напорам и соответственно разделить единой централизованной системы водоснабжения. Такое разделение единой системы водоснабжения на отдельные системы для каждой группы потребителей принято называть зонированием систем водоснабжения, а сами системы - зонными.

Зонирование применяется и в городских, и в промышленных водопроводах.

Зонирование водопроводов промышленных предприятий часто обуславливается значительной разницей в требованиях отдельных производственных потребителей к давлениям на вводе; зонирование городских систем водоснабжения - в основном значительной разностью геодезических отметок в пределах территорий города и требуемых напором в его сети. При этом в случае создания единой системы водоснабжения города вся вода должна подаваться головной насосной станцией под напором, необходимым для снабжения потребителя, требующего наибольшей подачи воды. Это может привести к возникновению в водопроводной сети давлений, больших допустимых. Наибольшие давления наблюдаются в районах с пониженными геодезическими отметками и в районах, наиболее близко расположенных к местам подачи воды в сеть.



**Рис.. 3.13. Однозонная система водоснабжения**  
*a* - план; *в* - пирометрический профиль

На рис. 3.13 схематически показаны план и пьезометрический профиль сети города при устройстве единой (незонированной) системы водоснабжения. Из рисунка видно, что между максимальным пьезометрическим напором в сети  $H_{нас}$ , разностью геодезических отметок местности в пределах территории, охватываемой городской водопроводной сетью ( $z_{max} - z_{min}$ ), требуемым свободным напором  $H_{св}$  и максимальной потерей напора на преодоление гидравлических сопротивлений в сети  $h_{max}$  может быть установлена следующая зависимость:

$$H_{max} = (z_{max} - z_{min}) + H_{св} + h_{max}$$

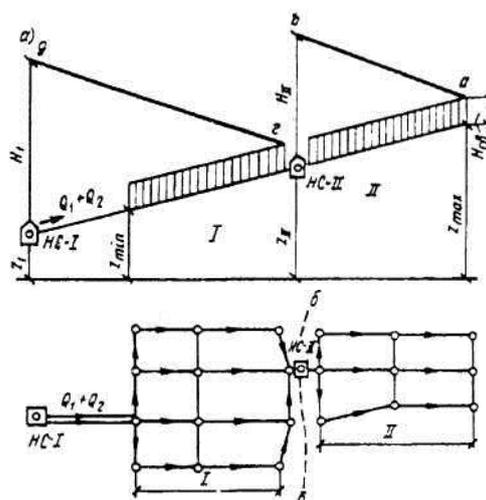
Величина  $H_{max}$  не должна превышать пределов, которые определяются конструкцией водопроводной сети (материалом и типом труб) и условиями эксплуатации внутренних водопроводов.

Большие давления расстраивают водоразборную арматуру (особенно различные поплавковые краны), повышают размеры утечек и непроизводительных трат воды. С учетом этих соображений и в соответствии с требованием СНиП 2.04.02-84 максимальное расчетное давление в наружной магистральной водопроводной сети не должно превосходить 6 ат (60 м вод. ст.). В случае превышения допустимого напора необходимо разделить сеть на зоны, чтобы в пределах каждой из них напор не превышал допустимого. Таким образом, область применения зонирования может обуславливаться как характером рельефа местности, так и требуемыми напорами и допустимыми давлениями в точках отбора воды потребителями.

## 9.2 ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ЗОННЫХ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

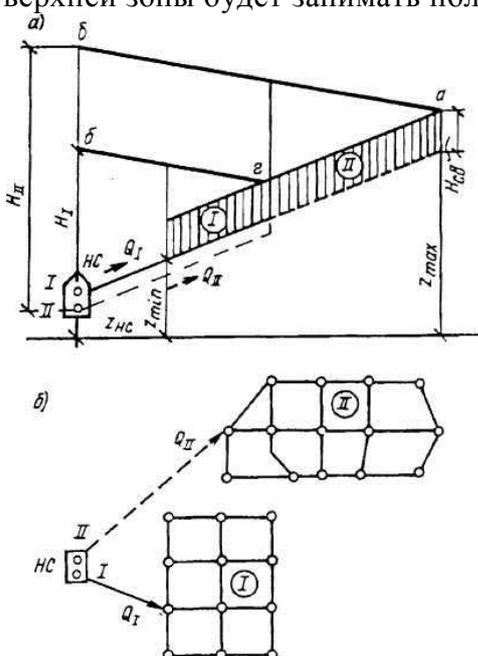
В зависимости от характера взаимного соединения зон различают системы последовательного и параллельного зонирования. При последовательном зонировании

общая водопроводная сеть объекта делится на две последовательно соединенные сети (рис. 3.14). Граница  $б-б$  между зонами I и II определяется значением наибольшего допустимого в сети напора  $H_I$ . Головная насосная станция  $НС-I$  подает все количество воды  $Q_I + Q_{II}$  но под напором  $H_p$ , необходимым для снабжения водой первой (нижней) зоны; следующая насосная станция  $НС-II$  берет из сети первой зоны количество воды  $Q_{II}$  необходимое для второй (верхней) зоны, и подает его под напором  $H_{II}$ , необходимым для снабжения водой ее потребителей. Таким образом, расход верхней зоны  $Q_{II}$  подается транзитом через сеть нижней зоны. Пьезометрические линии при последовательной системе зонирования будут занимать положение  $абгд$ .



**Рис. 3.14. Схема последовательного зонирования**  
 $a$  - пьезометрический профиль;  $б$  - план

При параллельной системе зонирования (рис. 3.15) сети отдельных зон включены параллельно. Вода подается в сеть каждой зоны по отдельным водоводам своей группой насосов, установленных на головной насосной станции. Насос нижней зоны I подает расход  $Q_I$  под напором  $H_I$  необходимым для этой зоны; насос верхней зоны II подает расход  $Q_{II}$  под значительна большим напором  $H_{II}$  на значительно большую геометрическую высоту. При параллельной системе зонирования пьезометрическая линия для системы верхней зоны будет занимать положение  $аб$ , а нижней - положение  $зб$ .



**Рис. 3.15. Схема переменного зонирования**  
 $a$  - пьезометрический профиль;  $б$  - план

Очевидно, что в пределах каждой зоны при параллельном зонировании напор будет иметь те же значения, что и при последовательном. Однако при параллельной системе напор в водоводе, подающем воду в верхнюю зону, может быть весьма велик и у границы города достигнет того же значения  $H_{max}$ , которое было до зонирования сети. При этом большие давления в водоводе не отразятся на условиях работы сети, так как водоводы не имеют присоединения к отдельным водопотребителям.

Выбор той или иной системы зонирования зависит от местных условий, от многих технических и экономических факторов и должен производиться на основе сравнения вариантов при условии обеспечения требуемой надежности подачи воды потребителю.

### 9.3. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЗОНИРОВАНИЯ

Необходимость зонирования определяется тремя основными факторами:

- а) разностью отметок в пределах снабжаемой водой территории

$$\Delta z = z_{max} - z_{min};$$

- б) требуемыми свободными напорами  $H_{св}$ ;

- в) потерями напора в сети  $h_{max}$ .

Исходя из необходимости обеспечить в сети напоры, допустимые техническими условиями эксплуатации водопровода, расчетная высота зоны, т.е. разность  $\Delta z = z_{max} - z_{min}$

не должна быть более  $\Delta z_{кр} = H_{max} - h_{max} - H_{св}$ . В городских водопроводах максимальный напор  $H_{max}$  не должен превышать 60 м.

Очевидно, принимая ориентировочно потери напора в сети  $h_{max}$  и задаваясь значениями  $H_{max}$  и  $H_{св}$ , можно определить предельную разность геодезических отметок  $\Delta z_{кр}$ , при которой давление в сети не будет превышать допустимых максимальных.

Если в пределах территории, подлежащей снабжению водой, разность отметок будет соответственно  $z_{max} - z_{min} > \Delta z_{кр}$ , то давления в неблагоприятно расположенных (критических) точках сети будут выше допустимых, и поэтому система должна быть разбита на зоны.

Технико-экономический анализ вопросов зонирования, выполненный в работах проф. Н.Н. Абрамова, показал, что весьма часто экономические факторы могут играть решающую роль и применение зонирования может дать значительные сокращения расхода энергии на подъем воды. Это обстоятельство обуславливает применение зонирования и в тех случаях, когда необходимость его не вызывается техническими причинами.

Подход к определению условий, при которых зонирование будет экономически целесообразным, основывается на энергетической оценке систем водоснабжения. Для этого проанализируем, на что и в каких количествах расходуется общая энергия, затрачиваемая насосными станциями на подъем воды.

Рассмотрим простейшую систему в виде одной линии водовода с несколькими отборами  $Q_i$  в последовательно расположенных узлах (рис. 3.16). Полная энергия, затрачиваемая в единицу времени насосной станцией, может быть выражена произведением:

$$\mathcal{E} = QH_y$$

- где  $Q$  - количество воды, подаваемой насосом в сеть;  
 $H$  - напор, создаваемый насосом.

Полная энергия может быть разделена на три составляющих в зависимости от того, на что расходуется энергия. Во-первых, энергия расходуется на подачу требуемых потребителю количеств воды  $Q_i$  на высоту, определяемую отметкой земли  $z_i$  и требуемым свободным напором  $H_i$ . Она выражается формулой

$$\mathcal{E}_e = \sum (z_i + H_i) Q_i$$

Эта часть энергии и является собственно полезно затрачиваемой энергией.

Вторая часть энергии идет на преодоление гидравлических сопротивлений в сети (в основном на трение в трубах).

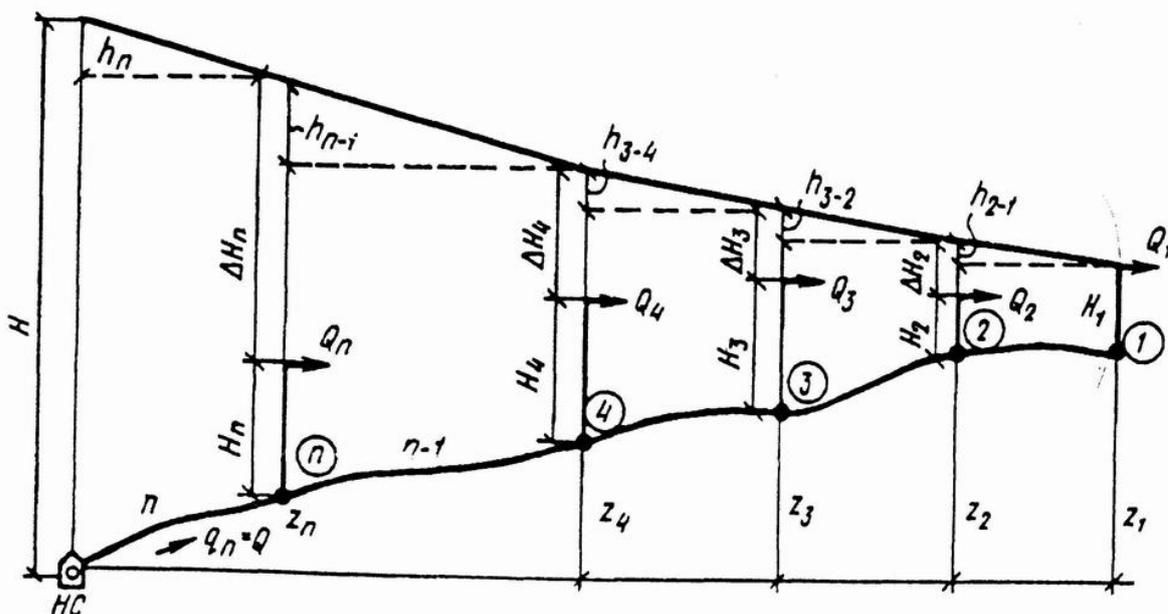


Рис. 3.16. Водовод с попутными отборами воды

Эта часть энергии теряется в системе, но она необходима для транспортирования воды:

$$\mathcal{E}_z = \sum q_{ik} h_{ik} ,$$

где  $q_{ik}$  - расход на отдельных участках сети;  
 $h_{ik}$  - потеря напора на этих участках.

Величина  $\mathcal{E}_T$  определяется для каждой данной системы в результате технико-экономического расчета сети.

Наконец, третья часть энергии тратится совершенно бесполезно при изливе под избыточным по сравнению с требуемым напором

$$\mathcal{E}_y = \sum (Q, \Delta, H),$$

где  $H_i$  - избыточный напор.

Так, для водовода с попутными отборами воды (см. рис. 3.16) напор  $H$ , создаваемый насосами, определяется из условий подачи воды в самую удаленную и высокорасположенную точку  $l$ :

$$H = (z_1 + H_1) + \sum h_{HC-1},$$

где  $z_1$  - отметка земли;  
 $H_1$  - требуемый свободный напор в точке  $l$ ;  
 $\sum h_{HC-1}$  - сумма потерь напора от насосной станции до точки  $l$ .

Во всех водоразборных точках, расположенных ближе к насосной станции и требующих меньшего напора, излив воды будет происходить под избыточным по сравнению с потребным для этих точек напором. Этот избыточный напор  $\Delta H$  гасится водоразборной арматурой, сопротивление которой приходится искусственно увеличивать, чтобы получать воду под необходимым напором.

Нетрудно убедиться, что для любой водопроводной системы сумма этих трех компонентов равна количеству гидравлической энергии, создаваемой насосной станцией:

$$\mathcal{E}_z + \mathcal{E}_m + \mathcal{E}_y = \mathcal{E}$$

Приведенное разделение полной энергии на три составляющие дает возможность установить простой критерий для энергетической оценки системы подачи и распределения воды - коэффициент использования энергии  $\varphi$ :

$$\varphi = (\mathcal{E}_z + \mathcal{E}_m) / \mathcal{E}$$

Так как величины  $\mathcal{E}_z$  и  $\mathcal{E}_m$  для данной системы всегда определены (в величину  $\mathcal{E}$  входит требуемая высота подъема воды, а в величину  $\mathcal{E}_m$  - все потери в сети), то величина  $\mathcal{E}_y$  получит единственно возможное значение

$$\mathcal{E}_y = \mathcal{E} - \mathcal{E}_z - \mathcal{E}_m$$

Для существующих или проектируемых сетей несложно определить коэффициент  $\varphi$ . Для любого расчетного случая имеются схемы сети с расходами, приведенными к узловым  $Q_i$ , и с указанием для каждого узла располагаемых свободных напоров  $H'_{св}$ . Кроме того, зная свободные напоры (принятые по расчетной этажности -  $H_{св}$ , можно получить избыточные напоры)  $\Delta H_i = H'_{св} - H_{св}$  для всех узлов сети.

Избыточная энергия  $\mathcal{E}_y$  может быть вычислена для такой сети по формуле

$$\mathcal{E}_y = \sum \Delta H_i Q_i.$$

Так как для рассчитанной сети известны подача насосов и напор, полная энергия может быть легко определена:  $\mathcal{E} = QH$ . Следовательно, легко может быть получен и коэффициент использования энергии:

$$\varphi = (\mathcal{E} - \mathcal{E}_y) / \mathcal{E} = 1 - (\mathcal{E}_y / \mathcal{E}).$$

Следует иметь в виду, что при расчете по упрощенной схеме водоотбора с использованием сосредоточенных расходов в узлах магистрали и принятии расчетного свободного напора  $H_{св}$  единым для всей территории города величина  $\mathcal{E}_y$  (а следовательно и  $\varphi$ ) не будет точно соответствовать действительной величине  $\mathcal{E}_y$  в той же системе. Для

анализа реальных систем водоснабжения и более точной их энергетической оценки следует учесть переменный режим расходования воды.

Вместе с тем, используя даже приведенный «осредненный» метод энергетической оценки систем подачи и распределения воды, можно установить, в каких именно случаях следует ожидать наиболее низкие значения коэффициентов  $\varphi$  и наибольшие потери энергии  $\mathcal{E}_y$ . Установлено, что низкие значения  $\varphi$  будут иметь системы, в которых:

- а) отметка местности и требуемые свободные напоры заметно снижаются по мере приближения к водопитателю;
- б) наибольшие отборы воды сосредоточены в районах с низкими отметками и в районах, близко расположенных к водопитателю;
- в) снабжаемая водой территория имеет форму, расширяющуюся по мере приближения к водопитателю;
- г) в пределах снабжаемой водой территории наблюдается значительная разница требуемых свободных напоров для отдельных потребителей.

Низкие значения коэффициента  $\varphi$  и, следовательно, высокие значения бесполезно теряемой энергии  $\mathcal{E}_y$  характеризуют недостаточно эффективное использование энергии в анализируемой системе. Для такой системы необходимо рассмотреть вопрос о целесообразности устройства данного водопровода, при котором избыточно затрачиваемая энергия может снижаться за счет уменьшения величины  $\mathcal{E}_y$ , при этом уменьшается стоимость энергии, затрачиваемой на подъем воды.

Очевидно, что применение зонирования для повышения экономичности системы целесообразно в том случае, если вызываемое зонированием повышение строительной стоимости системы и стоимости содержания персонала нескольких насосных станций не перекрывает экономии за счет снижения затрат на энергию.

#### 9.4. ВЫБОР СИСТЕМЫ ЗОНИРОВАНИЯ

Если вопрос о целесообразности зонирования системы водоснабжения объекта решен положительно, то необходимо правильно и экономически обоснованно произвести выбор системы зонирования (последовательного или параллельного) и определить число зон. Экономически наиболее выгодное число зон соответствует минимальным приведенным затратам на строительство и эксплуатацию системы. Оно определяется технико-экономическими расчетами при сравнении вариантов разделения систем на отдельные зоны, с учетом соблюдения допустимых давлений в сети.

Основными факторами, влияющими на выбор системы зонирования, являются:

- а) форма территории города;
- б) рельеф местности;
- в) величина и характер изменения уклонов местности в пределах снабжаемой водой территории;
- г) расстояние от водисточника до города.

В системах параллельного зонирования удорожание идет в основном за счет увеличения строительной стоимости водоводов от головной насосной станции до территории зон, а в системах последовательного зонирования - за счет увеличения затрат на строительство и эксплуатацию дополнительной насосной станции. Поэтому если территория снабжаемого водой объекта имеет вытянутую вдоль горизонтальную форму (рис. 3.17), то система параллельного зонирования на зоны *I* и *II*, как правило, более выгодна. При этом укладка водоводов небольшой длины  $L_1$ , и  $L_2$  вызовет меньшие расходы, чем устройство дополнительной насосной станции при последовательной системе.

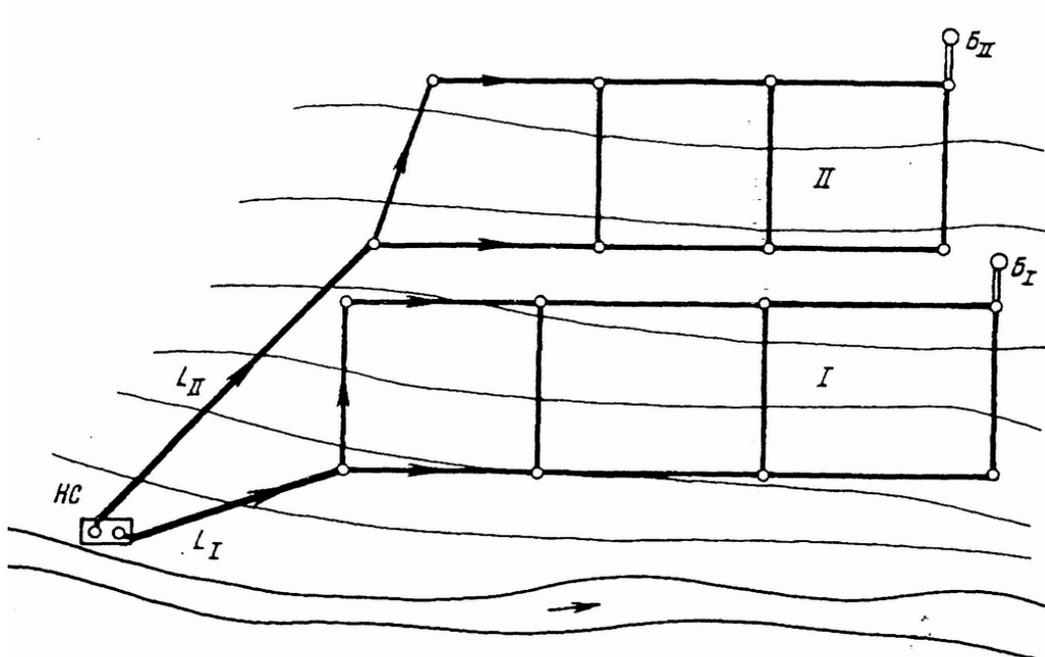
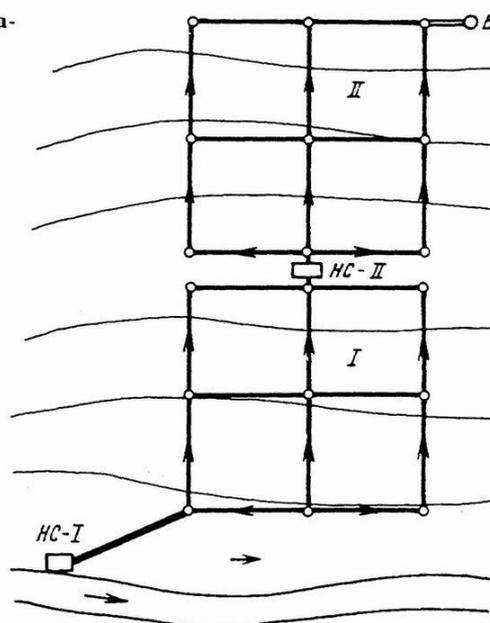


Рис. 3.17. Система параллельного зонирования

Если застройка вытянута в направлении, перпендикулярном направлению горизонталей (рис. 3.18), то более выгодным оказывается последовательное зонирование с устройством отдельных зон I и II и дополнительной насосной станции вместо укладки самостоятельных водоводов в каждой зоне от головной насосной станции. При сравнении двух вариантов зонирования для какого-либо реального объекта и выборе системы зонирования кроме указанных выше соображений следует иметь в виду достоинства и недостатки каждой из двух систем.

Рис. 3.18. Система последовательного зонирования



К достоинствам параллельной системы зонирования могут быть отнесены:

- большая надежность водообеспечения потребителей (по сравнению с последовательной), так как каждая зона имеет независимое питание от головной насосной станции;
- меньшая стоимость эксплуатации, так как все, насосное оборудование сосредоточено в одной насосной станции.

Недостатками параллельной системы зонирования являются:

а) большая дополнительная длина водоводов до территории каждой зоны, что приводит к увеличению капитальных затрат на их сооружение;

б) высокие по абсолютному значению давления в водоводах и, следовательно, необходимость применения высоконапорных насосов и труб высокой прочности.

К недостаткам системы последовательного зонирования относятся необходимость устройства дополнительных отдельно стоящих насосных станций для каждой зоны и, следовательно, увеличение затрат на строительство и эксплуатацию (в частности, содержание обслуживающего персонала). Кроме того, надежность этих систем ниже, чем систем параллельного зонирования.

В практике проектирования зонных водопроводов сочетание разнообразных местных условий и особенностей снабжаемого водой объекта приводит к устройству смешанных «параллельно-последовательных» систем зонирования. Например, при большой удаленности источника водоснабжения от объекта (рис. 3.19) будет рентабельным устройство насосной станции II подъема и очистных сооружений вблизи города. При этом водоводы по отношению к обеим зонам включены последовательно, а сети отдельных зон - параллельно.

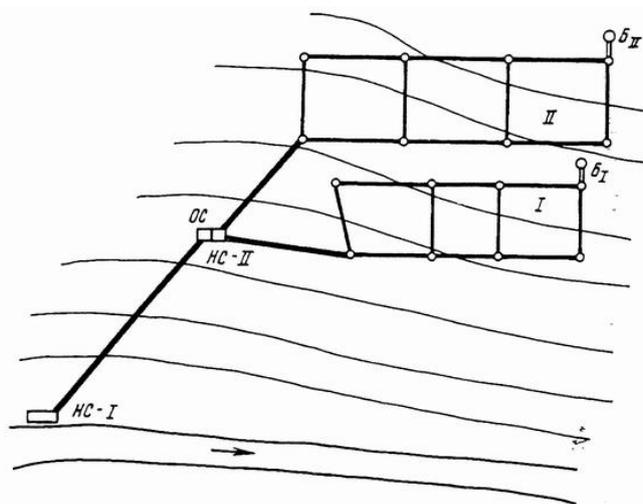


Рис. 3.19. Смешанная система зонирования

На рис. 3.20 показан случай, когда I и II зоны включены параллельно, а III зона последовательно присоединена ко II зоне.

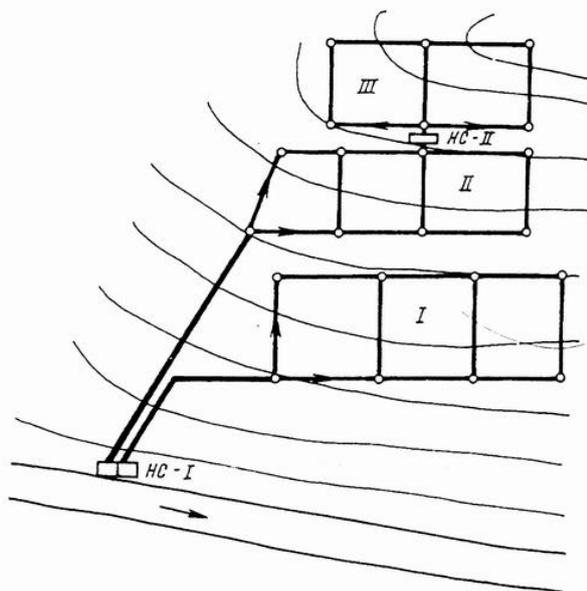


Рис. 3.20. Последовательно-параллельная система зонирования

В крупных городах, имеющих обширную территорию и сложный пересеченный рельеф местности (рис. 3.21), оказывается выгодным выделять отдельные возвышенные районы в самостоятельные зоны. Эти зоны обычно получают воду из общей городской сети, повышая напор с помощью специальных повысительных насосных подстанций (станций подкачки). Выделение в самостоятельные зоны районов с повышенными отметками позволяет значительно уменьшить напор, создаваемый на головной насосной станции, а следовательно, и затраты на подъем воды. Зонирование водопроводных систем по условиям допустимых давлений применяется не только при большой разности отметок снабжаемой водой территории, но и при большом протяжении сети на местности с плоским рельефом.

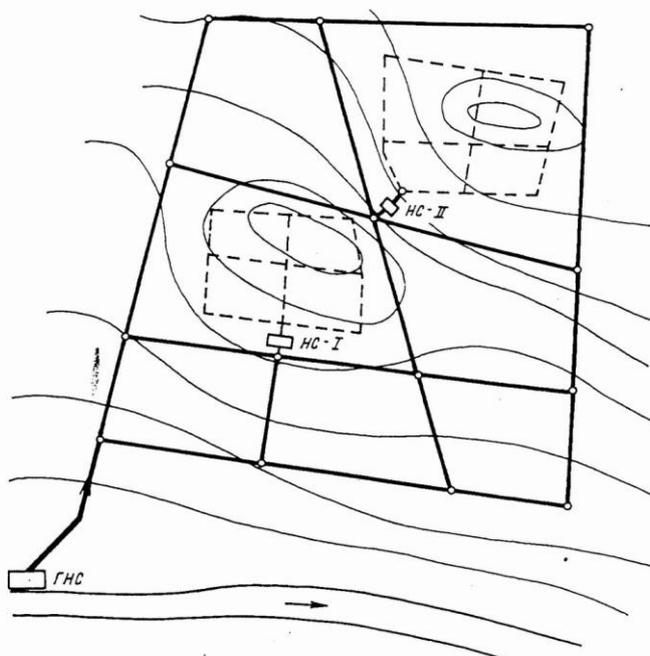


Рис. 3.21. Зонная система со станциями подкачки

Значительная протяженность водоводов этих систем приводит к необходимости преодолевать большие потери напора в трубопроводах при относительно малых геометрических высотах. Поэтому при проектировании таких систем решаются вопросы последовательного горизонтального зонирования с устройством насосных станций подкачки нескольких подъемов (рис. 3.22).

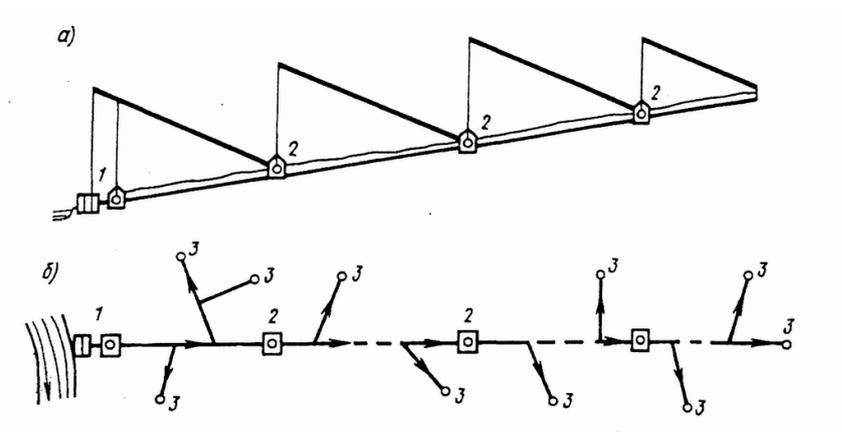


Рис. 3.22.  
Районная система водоснабжения

а - пьезометрический профиль; б - план; 1 - головные сооружения; 2 - насосные станции подкачки; 3 - пункты водопотребления

Гидравлический расчет зонных систем производится теми же методами, что и расчет обычных водопроводов, но при расчете сетей нижних зон должна учитываться их связь с верхними зонами.

## РАЗДЕЛ 4. КОНСТРУИРОВАНИЕ СИСТЕМ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ВОДЫ

### Глава 10. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛУ ТРУБ. ТИПЫ ТРУБ И ИХ ВЫБОР

Выбор материала труб представляет ответственную задачу, так как их стоимость в огромной мере определяет затраты по всей системе водоснабжения в целом.

К трубопроводам предъявляют ряд требований. Строящиеся в настоящее время сети и водоводы характеризуются значительными объемами и трудоемкостью строительных и монтажных работ, а также сложностью инженерных решений. Поэтому необходима дальнейшая индустриализация строительных и монтажных работ, предусматривающая использование сборных конструкций, изготавливаемых на заводах и монтируемых на строительных площадках. В наибольшей мере этим требованиям отвечают трубы заводского изготовления, обеспечивающие легкость, быстроту и надежность монтажа стыковых соединений и узлов.

В системах водоснабжения могут применяться трубы, материалы которых безвредны для здоровья человека. В процессе эксплуатации на трубопроводы влияет множество отрицательно воздействующих на их работу факторов. Их необходимо учитывать при выборе материала труб.

Трубы должны обладать высокими антикоррозионными свойствами по отношению к воздействию транспортируемой воды, подземных вод, грунта, блуждающих токов и т.п. Правильный выбор материала труб и их покрытий применительно к конкретным условиям строительства и эксплуатации позволяет значительно увеличить срок службы трубопровода и снизить эксплуатационные расходы.

Шероховатость внутренней поверхности труб в большей мере влияет на затраты энергии по транспортированию воды. Поэтому внутренняя поверхность труб должна быть гладкой и не изменяться в процессе эксплуатации. Это зависит от материала труб, технологии их изготовления, качества транспортируемой воды, вида внутреннего покрытия.

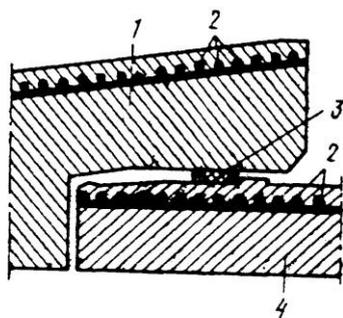
Надежность работы трубопровода во многом зависит от правильного выбора прочностных характеристик труб и их соответствия внешним и внутренним нагрузкам, действующим на трубопровод. Кроме того, трубы и их соединения должны оставаться герметичными в процессе всего периода эксплуатации. От этого зависит экономичность и надежность системы подачи и распределения воды, а также ее санитарное состояние.

Параметры, определяющие работу системы трубопроводов, изменяются в очень широком диапазоне.

Водопроводные сети и водоводы устраиваются как из неметаллических, так и металлических труб. К первым относятся железобетонные, асбестоцементные и пластмассовые трубы; ко вторым - чугунные и стальные трубы.

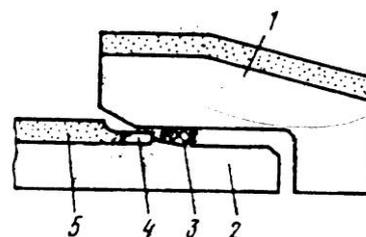
Железобетонные трубы обладают коррозионной устойчивостью, являются диэлектриками, способны сохранять в условиях эксплуатации гладкую поверхность, имеют малую металлоемкость и большую долговечность. Недостатком их является большая масса.

Напорные железобетонные трубы, изготавливаемые методами виброгидропрессования (ГОСТ 12586.0-83 и ГОСТ 12586.1-83) и центрифугирования (ГОСТ 16953-78), имеют гибкое раструбное стыковое соединение. Последние в настоящее время сняты с производства. Герметичность стыкового соединения обеспечивается применением резинового уплотнительного кольца круглого сечения. Конструкция раструбного соединения виброгидропрессованных труб представлена на рис. 4.1, а центрифугированных - на рис. 4.2. Конструкции стыковых соединений рассчитаны на возможные угловые деформации труб в соединении около  $0,75-1^\circ$ .



**Рис. 4.1. Стыковое соединение железобетонных предварительно напряженных труб, изготовленных методом виброгидропрессования**

1 - раструб; 2 - напряженная спиральная арматура; 3 - резиновое кольцо; 4 - втулочный конец трубы



**Рис. 4.2. Стыковое соединение раструбных железобетонных предварительно напряженных труб, изготовленных методом центрифугирования**  
1 - раструб; 2 - втулочный конец трубы; 3 - резиновое кольцо; 4 - упорный буртик; 5 - защитный слой бетона

Монтаж труб начинают с того, что на втулочный конец укладываемой трубы надевают резиновое кольцо. Затем эту трубу краном или трубоукладчиком опускают в траншею и центрируют относительно раструба уложенной трубы. Дальнейший монтаж заключается во введении втулочного конца укладываемой трубы в раструб уложенной с одновременным закатыванием резинового кольца в раструбную щель. Монтаж осуществляется с помощью различных механизмов и приспособлений.

Сортаментом предусмотрено изготовление труб диаметром от 500 до 1600 мм. В зависимости от расчетного внутреннего давления в трубопроводе трубы подразделяются на три класса прочности. Трубы I класса предназначены для прокладки трубопроводов с расчетным внутренним давлением 1,5 МПа, II - 1,0 МПа и III класса - 0,5 МПа. На заводе трубы подвергают испытаниям на водонепроницаемость давлением 0,6 - 1,8 МПа в зависимости от класса.

Трубопроводы всех классов в соответствии с требованиями ГОСТов должны укладываться на глубину 2 - 4 м до верха трубы в зависимости от грунтовых условий, временной нагрузки на поверхность земли, способа опирания на основание и степени уплотнения засыпки.

Как показывают расчеты, железобетонные трубы всех диаметров можно укладывать на глубину до 5 м до верха трубы на плоское основание из мелких песчаных грунтов при нормальной степени уплотнения пазух и расчетном внутреннем давлении до 1,0 МПа. Для укладки труб с более высоким внутренним давлением требуется спрофилированное грунтовое основание под выкружку с углом охвата 90-120° либо бетонное или железобетонное основание.

Существует документация на изготовление железобетонных напорных труб со стальным цилиндром на давление до 1,0 МПа. Железобетонные трубы могут подвергаться коррозии, если они уложены в агрессивных грунтах, где возможно влияние производственных сточных вод и сильноминерализованных агрессивных подземных вод. В этом случае наружную поверхность труб покрывают битумом или кузбаслаком.

Учитывая, что размеры втулочного конца и раструба железобетонных труб значительно отличаются от размеров гладкого конца и раструба чугунных стальных труб, для их соединения применяют стальные сварные вставки.

Асбестоцементные трубы имеют малую массу и теплопроводность, достаточную коррозионную стойкость и являются диэлектриками. У них небольшое гидравлическое сопротивление, которое незначительно меняется в процессе эксплуатации. Необходимо учитывать возможность внешней коррозии этих труб под воздействием веществ, разрушающих соединения, входящие в состав асбестоцемента (гидрат окиси кальция, карбонат кальция, силикат кальция, карбонат магния и др.). При прокладке трубопроводов

в грунтах, агрессивных по отношению к асбестоцементу, следует устраивать противокоррозионную защиту. Грунт агрессивен, если pH грунта ниже 6.

Асбестоцементные трубы хрупки. При ударах в материале труб появляются напряжения, которые могут превышать допустимые, и в стенке появляются трещины, которые обнаруживаются лишь при гидравлических испытаниях. Асбестоцементные трубы необходимо укладывать в ненарушенный грунт, чтобы исключить просадку.

Асбестоцементные трубы выпускают по ГОСТ 539-80. Трубы подразделяются на четыре класса: ВТ6 - на рабочее давление 0,6 МПа, ВТ9 - 0,9 МПа; ВТ12 - 1,2 МПа и ВТ15 - 1,5 МПа. Рабочим давлением являются максимальное гидравлическое давление, при котором может быть использована труба данного класса при отсутствии внешней нагрузки. Класс труб определяют расчетом, в котором учитывают условия эксплуатации. Трубы каждого класса в зависимости от внешнего диаметра и длины подразделяются на три типа. Трубы первого типа выпускают диаметрами 100 - 500 мм, длиной 3 - 4 м; второго - диаметрами 200 - 500 мм, длиной 5 м; третьего - диаметрами 200 и 300 мм, длиной 6 м.

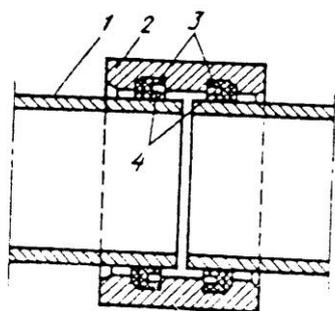


Рис. 4.3. Стык с асбестоцементной муфтой

1 - асбестоцементная труба; 2 - муфта; 3 - резиновое кольцо; 4 - перфорация

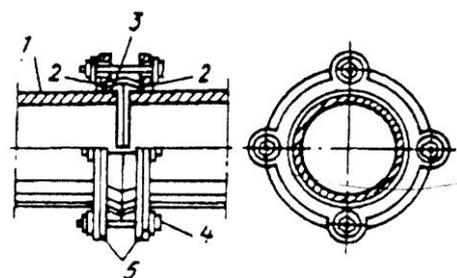


Рис. 4.4. Стык с чугунной фланцевой муфтой

1 - асбестоцементная труба; 2 - резиновые кольца; 3 - втулка; 4 - стяжной болт; 5 - фланцы

Трубы стыкуют с помощью асбестоцементных муфт САМ по ГОСТ 539 - 80 (рис. 4.3) или чугунных муфт по ГОСТ 17584 - 72 с изм. (рис. 4.4). Для уплотнения муфт применяют резиновые кольца. Монтаж трубопровода с применением муфт типа САМ производится следующим образом. В пазы муфты вставляют уплотнительные резиновые кольца. Затем муфту надвигают на всю длину на конец присоединяемой трубы, после чего ее опускают в траншею и центрируют с ранее уложенной трубой. Для надвигания муфты используют винтовой домкрат, который устанавливают и закрепляют на ранее уложенной трубе.

Монтаж трубопроводов на чугунных фланцевых муфтах производится в таком порядке. На конец ранее уложенной трубы надевают фланец, резиновое кольцо и втулку муфты, а на конец присоединяемой трубы - второй фланец и резиновое кольцо. После центровки фланцы стягивают с помощью болтов с шайбами. Чугунные муфты удобны при ремонте или замене части трубопровода. Однако стяжные болты могут разрушаться коррозией. В асбестоцементных трубопроводах в большинстве случаев используют чугунные фасонные детали. В последнее время появились данные о том, что эти трубы содержат вещества, небезопасные для здоровья человека.

Пластмассовые трубы обладают рядом свойств, выгодно отличающих их от труб из традиционных материалов. Потери напора на трение в них приблизительно на 30 % меньше, чем в металлических трубах. Они не подвержены электрохимической коррозии. В них не происходит увеличение сопротивления во времени.

Гидравлический удар, возникающий в трубопроводах из пластмассовых труб, значительно слабее из-за более низкого модуля упругости материала. Они имеют

меньшую массу по сравнению с другими трубами. Вероятность разрушения этих трубопроводов при замерзании в них воды мала.

Пластмассовые трубы применяют для наружных сетей водоснабжения поселков, пастбищного, локального и группового сельскохозяйственного водоснабжения. Они перспективны при прокладке сетей в агрессивных грунтах, в сейсмических районах, в гористой и болотистой местности, где применение других труб связано с дополнительными затратами. Однако пластмассовые трубы не обладают высокой сопротивляемостью раздавливанию и имеют большой коэффициент линейного расширения.

В системах водоснабжения разрешается применять лишь те трубы из полимерных материалов, которые обеспечивают сохранение качества воды. Для наружных и внутренних сетей водоснабжения применяют пластмассовые напорные трубы из полиэтилена низкой плотности (ПНП) и полиэтилена высокой плотности (ПВП) по ГОСТ 18599 - 83 с изм. Наиболее полный ряд наружных диаметров (10 - 1200 мм) представлен этим ГОСТом на трубы из полиэтилена высокой плотности (полиэтилен низкого давления). Выпуск труб из полиэтилена низкой плотности (полиэтилен высокого давления) предусматривают в диапазоне диаметров 10 - 160 мм. Указанные трубы изготавливают четырех видов - Л, ЧЛ, Ч и Т на рабочее давление соответственно 0,25; 0,4; 0,6 и 1,0 МПа. Эти давления принимают из условия предполагаемого срока службы не менее 50 лет при температуре воды 20°С.

Трубы напорные из непластифицированного поливинилхлорида (ПВХ) выпускаются по ТУ 6-19-231-83. Их изготавливают четырех классов: СЛ, С, Т и ОТ на давление соответственно 0,4; 0,6; 1,0 и 1,5 МПа в диапазоне диаметров 10 - 315 мм.

Для систем водоснабжения могут также применяться напорные полипропиленовые трубы, выпускаемые по ТУ 38-102-100-89 диаметрами 32 - 200 мм на рабочее давление до 1,0 МПа.

С понижением температуры пластические свойства пластмассовых труб ухудшаются, потому должны соблюдаться требования по транспортировке, разгрузке, хранению, монтажу и сварке труб. При низких температурах наружного воздуха целесообразно применять трубы из полиэтилена высокой и низкой плотности.

Тип соединений труб выбирают в зависимости от конкретных условий работы и прокладки трубопроводов, а также материала труб и фасонных частей. Неразъемные соединения из полиэтилена высокой и низкой плотности выполняют с помощью сварки контактным нагревом, а из ПВХ - склеиванием или газовой прутковой сваркой.

Для укладываемых в грунт напорных пластмассовых трубопроводов со сварными и клеевыми соединениями линейная компенсация температурных напряжений, как правило, не предусматривается. Для снижения этих напряжений при прокладке в летнее время укладку трубопроводов в траншею осуществляют «змейкой».

С целью замедления старения трубы из пластмассы должны быть защищены от попадания солнечных лучей.

Стальные трубы выпускают в широком диапазоне диаметров, толщин стенок, марок стали и различных классов точности. Они обладают высокой прочностью, относительно небольшой массой, пластичностью и применяются при промышленном монтаже. Недостатками стальных труб являются подверженность коррозии и зарастанию, меньший срок службы по сравнению со сроком службы неметаллических труб, возрастание гидравлического сопротивления в процессе эксплуатации, если не предусматриваются необходимые меры.

Из-за необходимости экономии металла применение стальных труб строго ограничивается. Для стальных наружных трубопроводов систем водоснабжения применяют сварные трубы следующих видов:

прямошовные по ГОСТ 10704 - 91 с изм., ГОСТ 10706- 76 с изм. и ГОСТ 10705 - 80;  
спирально-шовные по ГОСТ 8696 - 74 с изм.;

спирально-шовные тонкостенные по ТУ 102-39-84;

водогазопроводные по ГОСТ 3262 - 75 с изм.

Применение бесшовных стальных труб целесообразно в случае, если расчетом на прочность установлена невозможность использования сварных труб.

Сварные трубы изготовляют из различных сталей, отличающихся химическим составом и механическими свойствами. Эти качества стали, регламентируются следующими стандартами:

ГОСТ 380 - 88 с изм. - на углеродистую сталь обыкновенного качества, применяемую для изготовления прямошовных, спирально-шовных и водогазопроводных труб;

ГОСТ 19281 - 89 - на низколегированную высококачественную толстолистовую и широкополосную сталь, применяемую для изготовления прямошовных (ГОСТ 10706 - 76 с изм.) и спирально-шовных (ГОСТ 8696 - 74 с изм.) труб.

Наиболее широкое применение находят трубы из углеродистых сталей обыкновенного качества, как наиболее дешевые и менее дефицитные. Трубы из низколегированных высококачественных сталей применяют при строительстве и эксплуатации трубопроводов в условиях низких температур, приблизительно - 20°C и ниже. Их можно применять и при более высоких температурах, если обеспечивается экономия стали и результате использования труб с меньшими толщинами стенок, чем у труб из углеродистых сталей обыкновенного качества.

В соответствии с прочностными расчетами диаметры труб  $d_{тр}$  в системах водоснабжения зависят от толщины стенки  $\delta$ :

$\delta$ , мм.....	2,8-4	4-10	6-16
$d_{мп}$ , мм.....	400	500-1000	1000

Трубы выпускаются различных групп с гарантией, как всех, так и отдельных характеристик: механических свойств, химического состава, испытательного давления. Кроме того, трубы, имеющие одинаковые гарантированные механические характеристики, могут быть изготовлены из сталей, полученных различными способами.

Выбор марки стали трубы производят по нормируемым стандартам показателям стали и механическим свойствам, а при их отсутствии - по значению гарантируемого испытательного гидравлического давления трубы.

Трубы из углеродистой обыкновенного качества кипящей стали (КП) характеризуются хладноломкостью, в связи, с чем их не следует применять при строительстве и эксплуатации трубопроводов в условиях низких температур (минус 10 - 20°C).

Трубы из полуспокойной (ПС) и спокойной стали (СП) обладают меньшей склонностью к хладноломкости, поэтому их применяют при строительстве и эксплуатации в условиях более низких температур.

Трубы из низколегированных сталей целесообразно применять, когда в период строительства и эксплуатации стенки труб могут охладиться до весьма низких температур (- 20 °C и ниже).

Ввиду того, что основным способом соединения стальных труб является сварка, необходимо учитывать их свариваемость, которая ухудшается с повышением содержания углерода.

Для трубопроводов жидкого и газообразного хлора и крепких кислот реagentного хозяйства очистных сооружений применяют трубы стальные бесшовные горяче- или холоднодеформированные. Трубы из нержавеющей стали, используют в реagentном хозяйстве для транспортирования агрессивных растворов. Возможно также применение

эмалированных и остеклованных труб. Для водозабора подземных вод пригодны бесшовные обсадные и бурильные трубы.

Для напорных водоводов и сетей применяют чугунные трубы двух типов: трубы, изготавливаемые из серого чугуна по ГОСТ 9583 - 75 методами центробежного и полунепрерывного литья диаметрами 65 - 1000 мм с раструбными стыковыми соединениями; трубы, изготавливаемые диаметрами 100 - 300 мм со стыковым соединением под резиновые манжеты (ТУ 14-3-1247-83). Трубы диаметром 65 - 300 мм выпускают длиной 2 - 6 м, а диаметром 400 мм и более длиной 5 - 10 м. ГОСТы предусматривают выпуск труб трех классов - ЛА, А и Б, отличающихся друг от друга толщиной стенок и, следовательно, выдерживающих различное давление.

Для соединения труб по ГОСТ 9583 - 75 используют смесь асбеста, цемента и воды. В качестве набивки применяют просмоленную или битуминизированную пеньковую пряжу. Конструкция соединений этих труб показана на рис. 4.5. При соединении цилиндрический конец труб 1 вводят в раструб 2 уложенной трубы так, чтобы зазор между гладким концом и упорной поверхностью раструба составлял 5 - 10 мм в зависимости от диаметра труб. До начала заделки стыков трубы центрируют. Затем раструбную щель уплотняют пеньковой прядью 3 для обеспечения водонепроницаемости стыкового соединения.

Для удержания пряжи от выдавливания гидравлическим давлением устраивают асбестоцементный замок 4. При необходимости защиты асбестоцемента от агрессивного воздействия грунта и подземных вод раструбную щель на глубину 2 - 3 мм заполняют изоляцией 5, состоящей из грунтовой краски и мастики. Внутреннее испытательное и рабочее давление смонтированного трубопровода назначают в зависимости от класса труб и внешних нагрузок. Они не должны быть выше соответственно 1,5 и 1,0 МПа. При глубине заложения до 4 м и диаметре трубопровода до 300 мм, как правило, укладывают трубы класса ЛА. При выполнении соединения труб указанным способом, несмотря на его простоту и длительность применения, не обеспечивается равнопрочность стыкового соединения с основным материалом труб, требуются большие затраты времени, не полностью используются прочностные характеристики самих труб; кроме того, этот способ не механизирован.

Стыковые соединения на резиновых уплотнителях гибкие, обеспечивают равнопрочность с трубой, герметичность трубопровода при осевом смещении до 15 мм и угловой деформации до 3 - 4°. Монтаж стыковых соединений механизирован, вследствие чего сокращается трудоемкость и гарантируется высокое качество работ.

Ввиду равнопрочности стыкового соединения с трубой максимальные значения испытательных и рабочих давлений могут быть более высокими по сравнению с их значениями для труб со стыковыми соединениями под зачеканку.

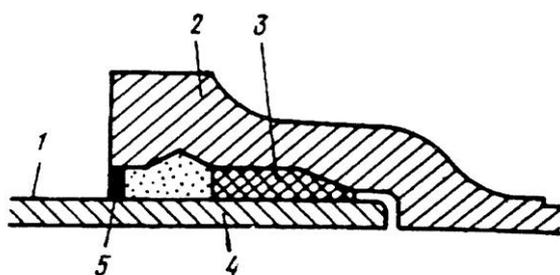


Рис. 4.5. Раструбное соединение чугунных труб с уплотнениями пеньковой прядью

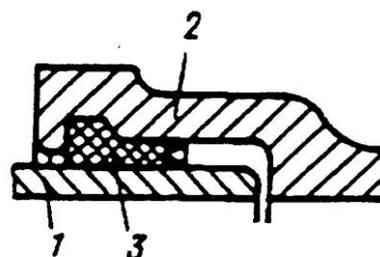


Рис. 4.6. Раструбное соединение чугунных труб на резиновых уплотнителях

Эти давления соответственно равны 1,75 - 2,8 МПа и 0,95 - 2,0 МПа в зависимости от класса труб. Конструкция этого стыкового соединения приведена на рис. 4.6. В раструбе

трубы 2 имеется внутренний кольцевой паз, в который закладывается гребень резиновой манжеты 3. Герметизация стыка обеспечивается за счет обжатия средней части манжеты при монтаже и самоуплотнения манжеты при гидравлическом давлении. Манжеты изготовляют из резины, не содержащей вредных веществ, влияющих на вкус, цвет и запах воды. Монтаж труб производят следующим образом. В кольцевой паз раструба вкладывают уплотнительную манжету. Наружный конец цилиндрической части 1 монтируемой трубы смазывают графитно-глицериновой смазкой. Затем конец монтируемой трубы с помощью специального монтажного устройства вводят в раструб уложенной трубы.

Водопроводные сети из чугунных труб монтируют с использованием чугунных фасонных частей по ГОСТ 5525 - 88 различной формы с раструбами и фланцами. Они позволяют изменять направление линий, как в горизонтальной, так и вертикальной плоскостях. С их помощью на водопроводных линиях устанавливают необходимую арматуру и устраивают ответвления (табл. 4.1). При отсутствии чугунных фасонных частей применяют нестандартные стальные сварные фасонные части.

Недостатком труб, выпускаемых из серого чугуна, является относительно плохое сопротивление их динамическим нагрузкам. Значительно большую область применения имеют высокопрочные трубы из чугуна с шаровидным графитом (ТУ 14-3-154-23-90), выдерживающие большие нагрузки и имеющие лучшие пластические свойства. Разрушение чугунных труб может приводить к осложнениям при ликвидации аварий и большим потерям воды. Кроме того, область применения этих труб ограничивается допустимыми внутренними давлениями. Чугунные трубы весьма металлоемки по сравнению со стальными.

Срок службы металлических трубопроводов, надежность и эффективность их эксплуатации определяются в основном степенью защиты металла от коррозии. Внутренняя коррозия вследствие роста выступов шероховатости приводит к резкому снижению пропускной способности трубопроводов. Это приводит к сокращению срока службы, значительным затратам на ремонт, перекладку и прокладку дополнительных линий, перерасходу электроэнергии.

Таблица 4.1

Наименование	Схема	Обозначения	
		на схемах	в документах
Труба раструбная		—	ЧНР
Тройник фланцевый		⊥	ТФ
Тройник раструбный		⊥	ТР
Тройник раструб-фланец		⊥	ТРФ
Крест фланцевый		⊥	КФ
Крест раструбный		⊥	КРФ
Крест раструб-фланец		⊥	КРФ
Выпуск фланцевый		⊥	ВФ
Выпуск раструбный		⊥	ВР
Колено фланцевое		⌒	УФ
Колено раструбное		⌒	УР
Колено раструб-гладкий конец		⌒	УРГ
Отвод раструбный		⌒	ОР
Отвод раструб-гладкий конец		⌒	ОРГ
Переход фланцевый		Δ	ХФ
Переход раструб-фланец		∇	ХРФ
Переход раструбный		Δ	ХР
Переход раструб-гладкий конец		∇	ХРГ
Патрубок фланец-раструб		⊥	ПФР
Патрубок фланец-гладкий конец		⊥	ПФГ
Двойной раструб		⊥	ДР
Муфта подвижная		⊥	МН
Муфта свертная		⊥	МС
Заглушка фланцевая		—	ЗФ
Седелка фланцевая		⌒	СФ
Седелка с резьбой		⌒	СР
Пожарная подставка раструбная		⊥	ППР
Тройник раструб-фланец с пожарной подставкой		⊥	ППТРФ
Тройник фланцевый с пожарной подставкой		⊥	ППТФ
Крест фланец-раструб с пожарной подставкой		⊥	ППКРФ
Крест фланцевый с пожарной подставкой		⊥	ППКФ

Существуют два вида защиты металлических труб от коррозии: пассивный и активный. К пассивным методам относятся изоляция наружной и внутренней поверхностей труб или покрытие труб специальными оболочками; к активным - электрическая защита.

Чугунные трубы на заводах покрывают специальными антикоррозионными мастиками, которые в течение некоторого времени обеспечивают защиту от коррозии.

Антикоррозионную защиту стальных труб выполняют перед укладкой или в процессе их укладки. Для наружной изоляции используют битумно-минеральные, битумно-полимерные, полимерные, этиленовые и другие покрытия.

В мировой практике строительства металлических водопроводов получили распространение внутренние покрытия на основе цемента. Они могут наноситься как на новые трубы, так и на трубы, находящиеся в длительной эксплуатации. Существует несколько способов нанесения покрытий на новые трубы. Наибольшее распространение имеет метод центрифугирования.

Наиболее действенным средством защиты действующих трубопроводов от коррозии является очистка внутренней поверхности и нанесение антикоррозионных покрытий. Пропускная способность трубопроводов после прочистки составляет 95-97 % первоначальной. Для нанесения покрытий также существует несколько способов в зависимости от диаметра трубопроводов.

Для создания на внутренней поверхности труб полимерных покрытий при выполнении ремонтно-восстановительных работ применяется метод протаскивания внутри эксплуатируемых трубопроводов плетей из полимерных труб.

В мировой практике все более широкое применение находят лакокрасочные покрытия, обеспечивающие простоту технологического процесса, высокую индустриализацию и сравнительно низкую стоимость.

К активным методам защиты металлических трубопроводов от коррозии относится катодная защита. Она основана на электрохимической теории коррозии. Из-за значительных затрат электроэнергии этот вид защиты целесообразен как дополнительная мера защиты трубопроводов. К дополнительным методам относится также способ нанесения цинкового покрытия.

Защита внутренней поверхности труб может быть обеспечена и методами стабилизационной обработки воды.

Трубопроводы, уложенные вдоль электрифицированных дорог, подвергаются действию блуждающих токов. Под их влиянием происходит разрушение поверхности труб. Защита труб от их действия состоит в предотвращении образования этих токов путем специального оборудования рельсовых путей электротранспорта.

В процессе эксплуатации трубопровод находится под воздействием внутреннего давления, давления грунта, временных нагрузок, собственного веса и веса транспортируемой воды, атмосферного давления при образовании вакуума и внешнего гидростатического давления грунтовых вод. Правильный учет этих нагрузок в комбинациях, наиболее опасных для конкретных условий работы трубопровода, позволяет надежно выбрать тип труб.

Для систем водоснабжения, как правило, должны применяться неметаллические трубы. Строительство напорных трубопроводов из чугунных труб в соответствии с требованиями СНиП разрешается в пределах населенных пунктов, территорий промышленных и сельскохозяйственных объектов. При рабочих давлениях свыше 1,5 МПа допускается применение стальных труб. Они также могут использоваться для переходов под железными и автомобильными дорогами, через овраги и водные преграды, в местах пересечения хозяйственно-питьевого водопровода с сетями канализации; при прокладке трубопроводов по опорам эстакад и в туннелях. В вечномёрзлых и просадочных грунтах допускается применение как стальных, так и пластмассовых труб.

В основу расчетов по определению допустимых предельных внешних и внутренних нагрузок берут показатели труб, определяемые ГОСТами или техническими условиями на их изготовление и приемку. Несущую способность трубопроводов определяют допустимые предельное внутреннее гидравлическое давление  $p^{\circ}_{\text{пр}}$  и предельная внешняя нагрузка на трубопровод  $Q^{\circ}_{\text{пр}}$ . Сравнивая эти нагрузки с полученными расчетными внутренними гидравлическими давлением  $p$  и суммарной внешней приведенной нагрузкой  $Q$ , выбирают класс труб.

Расчетное внутреннее давление принимают равным наибольшему возможному по условиям эксплуатации давлению в трубопроводе на различных участках по длине. Внешнюю суммарную нагрузку  $Q$  определяют на основе статических расчетов с учетом реальных данных о способе укладки труб, характере грунтов, нагрузок от транспорта и т.п.

Трубы, для которых предельное внутреннее гидравлическое давление равно  $p^{\circ}_{\text{пр}}$ , могут быть использованы в случае, если  $p \ll m_c p^{\circ}_{\text{пр}}$ , где  $m_c$  - коэффициент, учитывающий условия работы трубопровода.

Между величиной  $Q^{\circ}_{\text{пр}}$ , характеризующей несущую способность труб рассматриваемых типа и класса, и расчетной внешней суммарной нагрузкой  $Q$  этих труб также должно соблюдаться соотношение

$$Q = m_c Q^{\circ}_{\text{пр}}.$$

Коэффициент  $m_c$  определяется по формуле

$$m_c = m_1 m_2 / \gamma_{\text{п}}$$

где  $m_1$ , - коэффициент, учитывающий кратковременность испытаний, которому подвергаются трубы после их изготовления;  
 $m_2$  - коэффициент, учитывающий снижение прочностных свойств труб и процессе эксплуатации и результате старения материала, коррозии и абразивного износа (значения  $m_1$  и  $m_2$  принимают в соответствии с ГОСТом или техническими условиями на изготовление труб, а также требованиями СНиПа);  
 $\gamma_{\text{п}}$  - коэффициент надежности, учитывающий класс прочности труб по степени их ответственности.

Степень ответственности труб в соответствии со СНиПом может быть трех классов в зависимости от категории обеспеченности подачи воды.

Для облегчения расчетов существуют графики, позволяющие производить выбор класса труб различных типов.

Следует иметь в виду, что устройство спрופилированного основания и повышение степени уплотнения грунта засыпки позволяют уменьшить расчетную суммарную нагрузку, действующую на трубопровод. В этом случае трубы выдерживают большее давление, чем трубы, лежащие на плоском основании, что даст определенный экономический эффект.

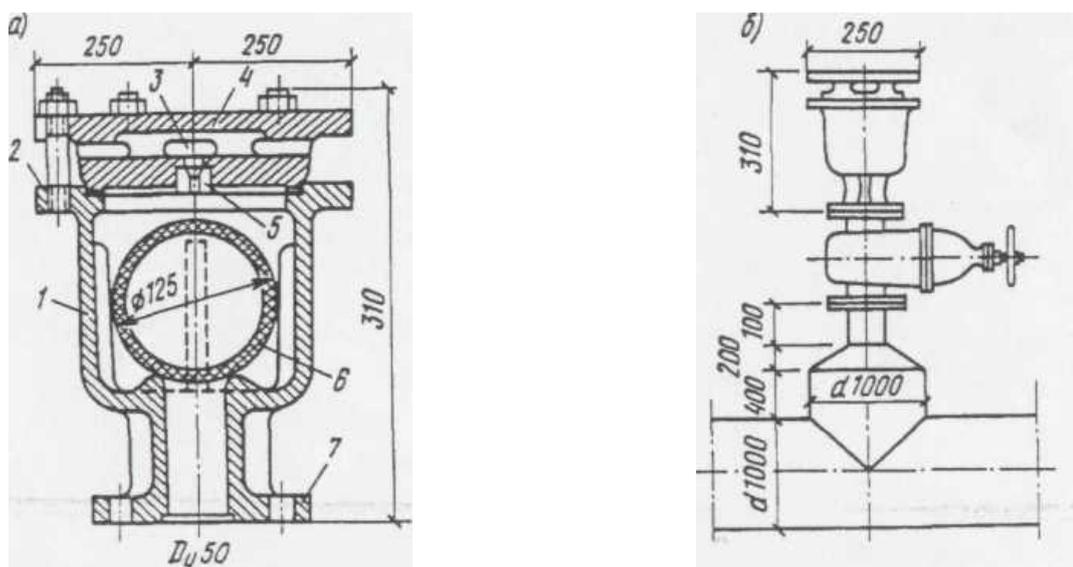
## Глава 11. ТРУБОПРОВОДНАЯ АРМАТУРА СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Трубопроводная арматура представляет собой комплект устройств для целей регулирования, обслуживания, ремонта и обеспечения надежной работы систем водоснабжения. По назначению трубопроводная арматура бывает следующих видов: аэрационная, водоразборная, запорная, запорно-предохранительная, предохранительная, регулирующая. Она должна отвечать ряду требований: соответствовать внешним и внутренним нагрузкам на трубопровод, обеспечивать герметичность, иметь необходимые гидравлические, кавитационные и противокоррозионные свойства, отвечать требованиям надежности.

Основные параметры арматуры характеризуются диаметром условного прохода  $D_y$ , значения которого установлены ГОСТом и условным давлением  $p_y$  - наибольшим избыточным рабочим давлением при температуре среды 20 °С. В каталогах трубопроводной арматуры в дополнение обычно указывают ее рабочее и пробное давления.

Аэрационная арматура служит для впуска в трубопровод и выпуска из него воздуха. Она необходима для удаления воздуха, скапливающегося в трубопроводе в процессе эксплуатации, из участков водоводов при их заполнении водой, а также для впуска в места разрывов сплошности потока, возникающих при переходных режимах, и в трубопровод при плановом или аварийном опорожнении его. К аэрационной арматуре относятся вантузы и клапаны для впуска, выпуска и заземления воздуха.

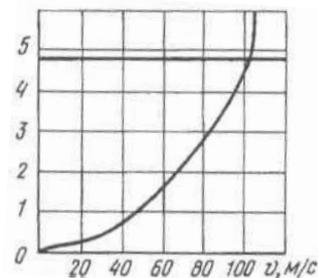
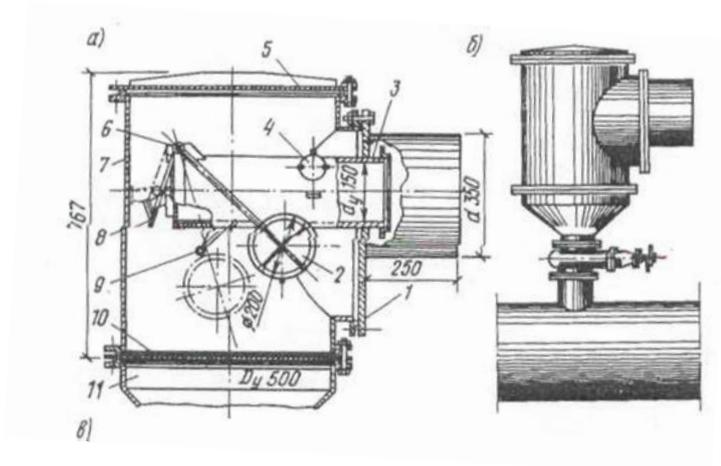
Вантузы подразделяются на шаровые, рычажные и мембранные. В шаровых вантузах (рис. 4.7) при отсутствии воздуха в трубопроводе вода поднимает и прижимает полиэтиленовый шар к отверстию втулки. При скоплении воздуха в верхней части вантуза шар опускается вместе с водой, отверстие втулки открывается, и воздух выходит наружу. Принцип действия рычажного вантуза аналогичен принципу действия шарового. Мембранные вантузы предназначены как для удаления, так и для впуска воздуха в трубопровод при образовании в нем вакуума. Вантузы выпускаются с диаметром присоединительного патрубка 50 мм и диаметром выпускного отверстия 3-8 мм. Они рассчитаны на небольшую производительность и способны выпускать воздух при давлениях ниже, чем в системах водоснабжения. Это сужает область их применения.



**Рис. 4.7. Шаровой вантуз  $D_y = 50$  мм (а) и схема установки его на водоводе  $D_y = 1000$  мм (б)**

1 - корпус; 2 - верхний фланец; 3 - отверстие; 4 - зонт-крышка; 5 - втулка; 6 - полиэтиленовый шар; 7 - нижний фланец

Для впуска и выпуска больших объемов воздуха используются автоматические клапаны для впуска и выпуска воздуха (КВВВ) конструкции ВОДГЕО (рис. 4.8). В процессе заполнения трубопровода воздух поступает в корпус КВВВ. Тарель клапана под действием веса шаровых поплавков находится в открытом положении и вытесняемый воздух выходит в атмосферу через выпускной патрубок. Удаление воздуха, поступающего в корпус КВВВ после закрытия тарели, производится рычажным вантузом. При образовании вакуума в трубопроводе клапан открывается под действием разности давлений между атмосферой и внутренней полостью трубопровода, выпуская воздух, который обеспечивает срыв вакуума в водоводе. Эти клапаны выпускаются  $D_y = 400...500$  мм.



**4.8. Клапан для впуска и выпуска воздуха (а), схема установки его на водоводе (б) зависимость потерь напора в КВВВ от скорости движения воздуха (а)**

1 - фланец; 2 - шаровые поплавки; 3 - выпускной патрубок; 4 - рычажный вентуз; 5 - крышка; 6 - ось; 7 - корпус; 8 - тарель; 9 - упор; 10 - решетчатый рассекаватель; 11 - патрубок

Клапан для впуска и заземления воздуха (КВЗВ) предназначен для автоматического впуска воздуха в водовод при образовании в нем вакуума. Он применяется для предотвращения гидравлических ударов, начинающихся с волны понижения давления для защиты тонкостенных труб от деформации в момент возникновения вакуума при переходных режимах, для впуска воздуха при опорожнении водоводов. Конструкция противовакуумного клапана ВОДГЕО, схема установки и его характеристики показаны на рис. 4.9.

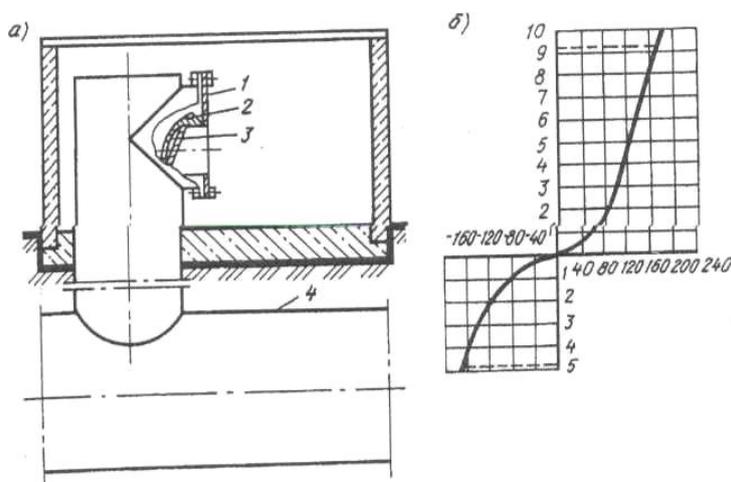


Рис. 4.9). Клапан для впуска и заземления воздуха и схема установки его на водоводе (а) и зависимость потерь напора  $H$ , м от скорости впуска воздуха  $v$ , м/с (б)

1 - монтажный фланец; 2 - ось; 3 - тарель; 4 - трубопровод

Зависимость потерь напора  $\Delta H$ , мм в КВВВ от скорости движения воздуха  $v$ , м/с, приведена на рис. 4.8, в.

Клапан для впуска и заземления воздуха (КВЗВ) предназначен для автоматического впуска воздуха в водовод при образовании в нем вакуума. Он применяется для предотвращения гидравлических ударов, начинающихся с волны понижения давления для защиты тонкостенных труб от деформации в момент возникновения вакуума при переходных режимах, для впуска воздуха при опорожнении водоводов. Конструкция противовакуумного клапана ВОДГЕО, схема установки и его характеристики показаны на рис. 4.9.

При возникновении вакуума и выравнивании давлений внутри и снаружи трубопровода тарель клапана под действием собственного веса закрывается, не допуская выхода выпущенного воздуха. Последующее сжатие этого воздуха смягчает гидравлический удар. Они выпускаются  $D_y = 50$  и  $150$  мм на максимальную подачу  $0,04-5$  м<sup>3</sup>/с воздуха. КВВВ и КВЗВ рассчитаны на давление  $1,6$  МПа. Материал клапанов - сталь, чугун. Места их установки определяют расчетами переходных процессов в трубопроводах.

Арматура водоразборная предназначена для отбора воды из системы водоснабжения. К ней относятся краны, поплавковые клапаны, уличные колонки, пожарные гидранты. Арматура первых двух видов используется в системах санитарно-технического оборудования жилых и общественных зданий при отборе воды на хозяйственно-питьевые нужды и для заполнения различных емкостей. По принципу работы запорных органов она бывает вентильного, золотникового, шайбового и клапанного типов. Ее конструкции отличаются большим разнообразием.

Отбор воды на хозяйственно-бытовые нужды может осуществляться из уличных водоразборных колонок, устанавливаемых на наружной водопроводной сети. Они обеспечивают полную герметизацию трубопроводов, транспортирующих воду, от попадания загрязнений извне. Для целей питьевого водоснабжения также служат колонки-фонтанчики, устанавливаемые в парках, садах и других местах отдыха.

Пожарные гидранты используются для целей отбора воды на пожаротушение, а также заполнения автоцистерн при поливе зеленых насаждений и мытье площадей и улиц. Пожарные гидранты бывают наземными и подземными. Наземные гидранты бесколодезного типа применяются в сельской местности и пригородной зоне, где отпадает надобность в подземных гидрантах.

Существуют конструкции гидрантов, совмещенных с водоразборной колонкой. Пожарные подземные гидранты устанавливают в водопроводных колодцах, что удорожает строительство. Конструкция устройства для отбора воды из коммунальных и промышленных водопроводов показана на рис. 4.10. В основу положена конструкция бесколодезного гидранта. Это устройство может использоваться в качестве подземного пожарного гидранта, предназначенного для подачи воды из водопровода в передвижную пожарную технику, а также в качестве контрольно-пускового узла для автоматического включения стационарных установок пожаротушения.

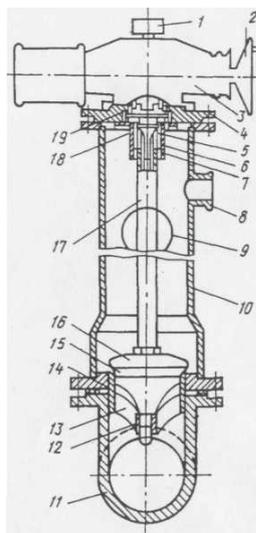


Рис. 4.10. Устройство с электроприводом для отбора воды из подземных водопроводов  
 1 - пускатель; 2 - ручной привод; 3 - редуктор; 4 - опора; 5 - направляющие пазы; 6 - шпindelь; 7 - выступы; 8, 9 - патрубки; 10 - корпус; 11- трубопровод; 12 - втулка; 13 - спицы; 14 - седло; 15 - уплотнительное кольцо; 10 - клапан; 17 - шток; 18 - втулка; 19 - вал передачи

Запорная арматура предназначена для перекрытия потока в трубопроводе. К ней относятся задвижки, дисковые поворотные затворы, вентили, краны. Задвижки по конструкции запорного органа подразделяются на параллельные и клиновые (рис. 4.11). В параллельных задвижках проход корпуса перекрывается двумя параллельными подвижно соединенными между собой дисками, которые раздвигаются одним или двумя расположенными между ними клиньями; в клиновых - одним клинообразным круглым диском, помещенным в гнезда между наклонными уплотняющими кольцами корпуса. Преимущество параллельных задвижек перед клиновыми состоит в меньшей трудоемкости обработки уплотняющих колец и их изнашиваемости, а также в меньших усилиях при открытии после длительного нахождения в помещении «закрыто». Задвижки изготовляют с выдвижным и невыдвижным шпинделями. Выдвижной шпindelь при вращении совершает поступательное движение, а невыдвижной - только вращательное. Первые имеют большую высоту и положения «открыто» на величину хода шпинделя. Задвижки бывают плоскими, овальными, круглыми соответственно на низкое, среднее и высокое давление. Они выпускаются на давление 0,25-6,4 МПа в диапазоне диаметров 50-800 мм. Корпус задвижек изготовляют из чугуна при  $p_v$  до 1 МПа и стали при больших давлениях. Зарубежными фирмами для изготовления общепромышленной арматуры широко используется ковкий чугун, который выдерживает большие нагрузки и эластичен как сталь.

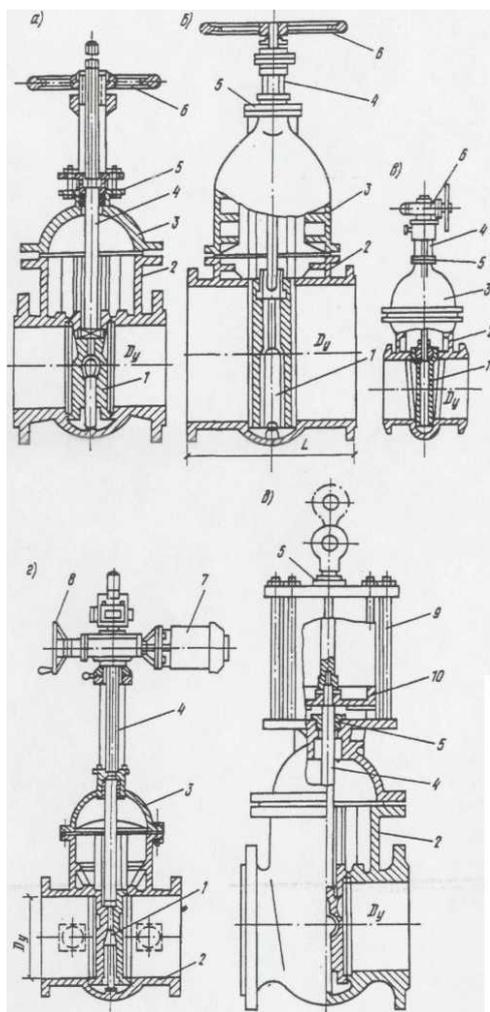


Рис. 4.11. Схемы задвижек  
*а, б* - параллельные с ручным приводом с выдвижным и неподвижным шпинделем; *в* - клиновья с ручным приводом и неподвижным шпинделем; *г, д* - параллельные с электрическим и гидравлическим приводом; 1 - запорный диск; 2 - корпус; 3 - крышка; 4 - шпиндель; 5 - сальник; 6 - штурвал; 7 - электропривод; 8 - маховик ручного привода; 9 - цилиндр; 10 - поршень

Задвижки выпускаются с ручным, электрическим и гидравлическим приводами. Первые используются при отсутствии необходимости частых перекрытий трубопроводов; вторые - при наличии потребности в систематических открытиях и закрытиях, а также автоматизации работы задвижек. При опасности последствий отключения электропитания водопроводных сооружений автоматическое отключение задвижек осуществляется гидравлическим приводом. Задвижки больших диаметров оборудуют обводными линиями, на которых устанавливают задвижки меньших диаметров для выравнивания давления до и после запорного органа с целью облегчения открытия. Соединение задвижек с трубопроводом - фланцевое. Достоинство задвижек - хорошая герметичность; недостатки - значительная масса, габаритные размеры, стоимость и неравномерное возрастание гидравлического сопротивления в процессе закрытия. Задвижки нецелесообразно использовать для регулирования подачи, так как они не рассчитаны на работу в положении частичного открытия. В современной практике отдается предпочтение задвижкам с уплотнением из эластомеров - материалов высокомолекулярных структур.

Их применение в значительной мере решают проблемы обеспечения в течение всего срока эксплуатации герметичности, коррозионной стойкости, незасоряемости, малого гидравлического сопротивления, санитарной пригодности. Современное направление совершенствования задвижек связано с созданием бесфланцевых задвижек, исключая трудности эксплуатации фланцевых соединений на болтах. Монтаж задвижек на трубопроводах в зависимости от конструкции может осуществляться по камерному и бесколодезному типу.

К многоцелевому типу относятся кольцевые задвижки. В зависимости от варианта исполнения управляющего органа кольцевая задвижка может работать в качестве

запорного устройства, обратного клапана, дросселирующего устройства, регулятора давления, сбросного устройства, регулятора уровня. Они хорошо себя зарекомендовали при создании средств защиты насосных станций и водоводов от гидравлического удара. Общий вид кольцевой задвижки с гидравлическим приводом представлен на рис. 4.12. Открытие и закрытие кольцевой задвижки осуществляется водой, транспортируемой по трубопроводу, на котором эта задвижка установлена. Если давление трубопровода передать в пространство *A*, а пространство *B* соединить с атмосферой, то задвижка откроется. Задвижка закроется, если давление из трубопровода передать в пространство *B*, а пространство *A* сообщить с атмосферой. Недостатками этих задвижек являются сложность изготовления и высокая стоимость.

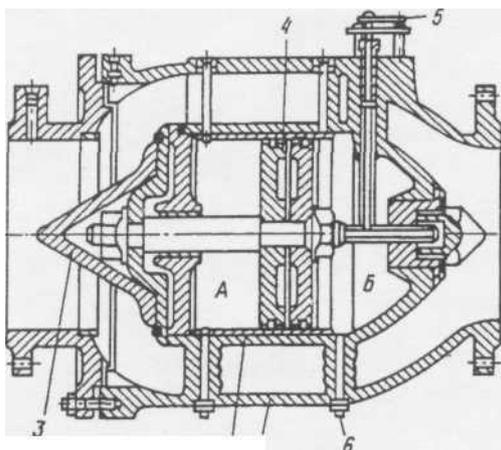


Рис. 4.12. Кольцевая задвижка  
 1 - корпус; 2 - гидроцилиндр; 3 - запорный клапан; 4 - поршень; 5 - указатель положения клапана; 6 - сливные пробки

Дисковые поворотные затворы (ДПЗ) имеют ряд преимуществ перед задвижками: меньшая масса, габариты и стоимость, высокие показатели надежности, более плавное изменение гидравлического сопротивления при закрытии, возможность работы затворов некоторых конструкций в промежуточном положении. Их недостатки - более высокое гидравлическое сопротивление и неудобства, которые могут возникнуть при прочистке трубопровода. В ДПЗ проход корпуса перекрывается диском, находящимся в потоке, путем поворота на  $90^\circ$  относительно оси. По конструкции и расположению уплотнений ДПЗ можно разделить на имеющие: 1) эластичное уплотнение на диске и 2) эластичную рубашку в корпусе. Первые обеспечивают одностороннюю герметизацию при направлении потока жидкости со стороны вала; вторые - двустороннюю герметизацию. Последние имеют более высокие показатели надежности. Они лучше в гидравлическом, гидродинамическом и кавитационном отношениях. ДПЗ имеют конструкцию с соосным, эксцентричным и двухэксцентричным расположением вала относительно диска. Затворы с уплотнением на диске выполняют с эксцентричным и двухэксцентричным расположением вала. В мировой практике существует множество различных конструкций ДПЗ, выпускаемых в диапазоне  $60-2800$  мм на  $p_y = 0,25...1,2$  МПа. На рис. 4.13 приведен дисковый поворотный затвор с уплотнением на диске, находящийся в закрытом положении на условное давление  $p_y = 1$  МПа.

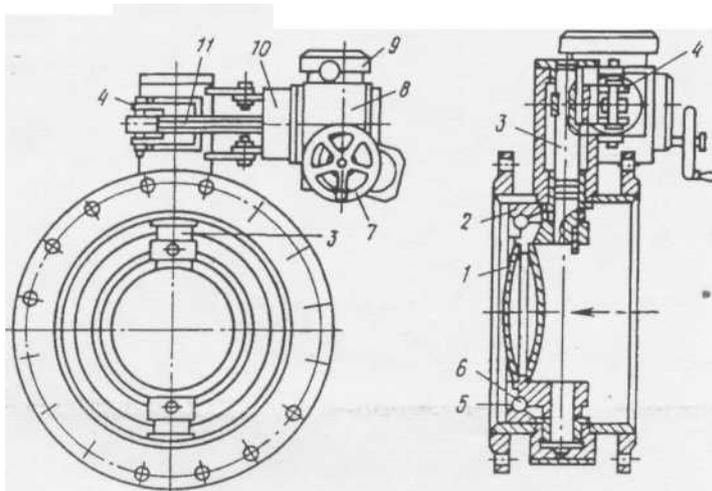


Рис. 4.13. Дискový поворотный затвор  
 1 - диск; 2 - седло; 3 - вал; 4 - рычаг; 5 - прижимное кольцо; 6 - резиновое кольцо; 7 - ручной штурвал; 8 - электропривод; 9 - концевые выключатели; 10 - бугельный узел; 11 - шпindel

Общим для всех конструкций ДПЗ является широкое использование синтетических материалов и никеля с целью создания герметичности затвора и обеспечения хороших гидравлических, кавитационных и противокоррозионных свойств.

В качестве материала корпуса применяются стали различных марок и чугун. Для защиты от коррозии, вызываемой действием воды и земли, корпус покрывают смолой или осуществляют эмалирование, электростатическое нанесение пластмассы.

ДПЗ оборудуются механическим, электрическим или гидравлическим приводом. Приводом может обеспечиваться либо постоянный крутящий момент, либо программированный - соответствующий требуемому гидравлическому режиму. Наиболее благоприятным режимом закрытия является программированный - быстрый в начальной стадии и замедленный в конце. Это обеспечивает равномерное изменение гидравлического сопротивления ДПЗ, а, следовательно, уменьшает опасность повышения давления сверх допустимого.

В качестве запорной арматуры на трубопроводах небольших диаметров могут использоваться краны вентильного и золотникового типов, применяемые в санитарно-технических системах. Однако они имеют большое гидравлическое сопротивление и при быстром закрытии могут вызывать гидравлический удар.

Арматура запорно-предохранительная предназначена для отключения трубопроводов при возникновении обратного тока воды. К ней относятся клапаны обратные, выпускаемые различных конструкций на условное давление  $p = 0,25 \dots 4,0$  МПа с регулируемым (рис. 4.14) и нерегулируемым закрытием (рис. 4.15). Первые выпускаются в диапазоне диаметров 200-1000 мм. Они предназначены для безударного отключения трубопроводов и для установки на автоматизированных насосных станциях, предусматривающих пуск и остановку агрегатов на открытую запорную арматуру. Под действием потока воды диск с рычагом поворачивается вокруг вала на  $85^\circ$  и клапан открывается. При выключении насосного агрегата закрытие клапана на первых поворотах на  $57- 63^\circ$  происходит быстро, а при последующих поворотах на  $22- 28^\circ$  - замедленно. Торможение диска осуществляется демпфером, в котором масло под давлением от поршня протекает через дроссельные отверстия из одной полости в другую. Эти клапаны широко используются в устройствах защиты от гидравлических ударов. Клапаны обратные с односторонней подвеской, закрытие которых нерегулируемо, выпускаются в диапазоне диаметров 50-150 мм. Их месторасположение зависит от компоновки оборудования насосных станций.

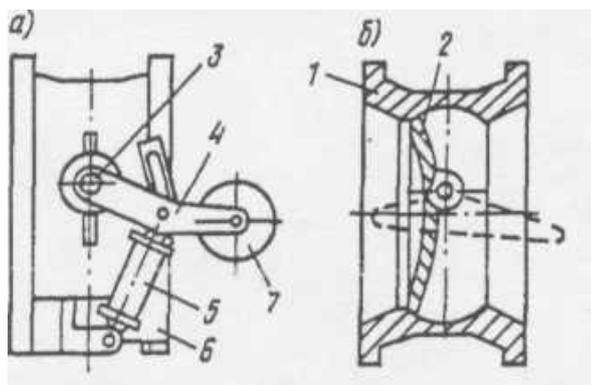


Рис. 4.14. Клапан обратный с регулируемым закрытием  
*а* - общий вид; *б* - разрез;  
 1- корпус; 2 - диск; 3 - вал; 4 - рычаг диска; 5 - гидроцилиндр-демпфер; 6 - кронштейн; 7 - противовес

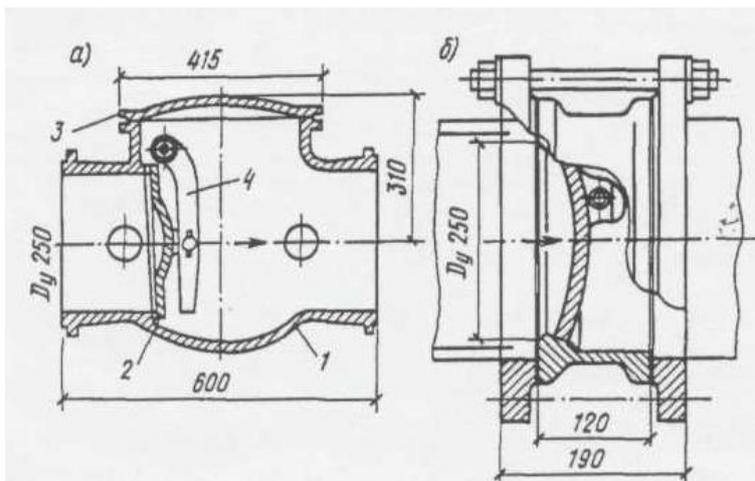


Рис. 4.15. Клапан обратный поворотный с нерегулируемым закрытием  
*а* - «захлопка»; *б* - безударный;  
 1- корпус; 2 - тарель клапана; 3 - крышка корпуса; 4 - рычаг

При установке клапанов обратных по длине водовода в качестве противоударной защиты их месторасположение определяют расчетами переходных процессов.

Арматура предохранительная - устройства для автоматического ограничения параметров давления и расхода потока. Наибольшее распространение находит арматура, ограничивающая давление в трубопроводах при переходных процессах в системах водоподачи. К ней относятся воздушно-гидравлические колпаки, водонапорные колонны и сбросные устройства.

Воздушно-гидравлические колпаки - стальные сосуды, установленные на трубопроводе и заполненные в верхней части воздухом примерно на 2/3 объема при статическом давлении. При гидравлическом ударе, сопровождающемся повышением давления, часть воды из трубопровода втекает в колпак и сжимает находящийся там воздух, давление снижается вследствие амортизирующих свойств воздуха.

При понижении давления в процессе удара воздух в колпаке расширяется, и часть воды из колпака вытекает в трубопровод, заполняет разрывы сплошности потока, не допуская в трубах образования вакуума и последующего повышения давления. К достоинствам воздушно-гидравлических колпаков относятся простота устройства, отсутствие сброса воды из трубопровода, высокая степень гашения гидравлических ударов; к недостаткам - быстрое уменьшение в них запаса воздуха в результате растворения его в воде, громоздкость. Они обычно изготавливаются стандартных объемов.

Вместо колпаков для гашения гидравлических ударов в ряде случаев могут использоваться водонапорные колонны, имеющие открытую поверхность. Их высота превышает рабочий напор в трубопроводе в месте установки. При возрастании давления уровень воды в колонке повышается, и гидравлический удар затухает. Они находят применение в системах промышленного водоснабжения и орошения.

К сбросной арматуре относятся специальные клапаны и устройства различных конструкций. Они делятся на две группы: 1) срабатывающие при гидравлических ударах,

начинающихся с волны повышения давления, и 2) срабатывающих при ударах, начинающихся с волны понижения давления. К первой группе относятся предохранительные разрывные мембраны, предохранительные пружинные клапаны и устройства: ко второй - гасители гидравлических ударов УкрВОДГЕО.

Предохранительные разрывные мембраны - это диски, изготовленные из стали, чугуна, титана и других материалов, разрушающиеся при давлении воды, превышающем расчетное; при этом часть жидкости сбрасывается и давление в трубопроводе падает.

Клапаны пружинные предохранительные (рис. 4.16) устанавливают в местах, где существует опасность повышения давления. При давлении в водоводе, превышающем допустимое, клапан срабатывает. Поскольку они инерционны, т.е. открытие происходит с некоторым запаздыванием, то их целесообразно применять в сочетании с другими средствами защиты (например, с клапанами для впуска и заземления воздуха). Промышленность выпускает клапаны диаметром 25-200 мм. Они устанавливаются на трубопроводах диаметрами до 800 мм.

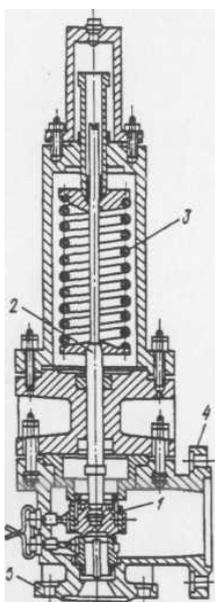


Рис. 4.16. Клапан пружинный предохранительный.  
1 - клапан; 2 - шток; 3 - пружина; 4 - сбросный патрубок; 5 - соединительный фланец

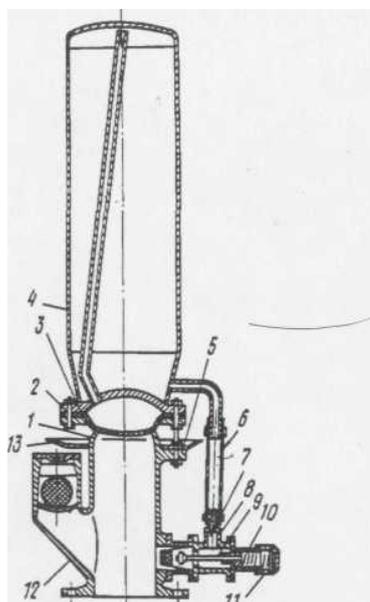


Рис.4.17 Клапан защитный гидравлический  
1- корпус; 2 - крышка; 3 - эластичная диафрагма; 4 - воздушный баллон; 5 - шпильки; 6 - трубка; 7 - отсечное устройство; 8 - корпус отсечного устройства; 9 - клапан отсечной; 10 - пружина; 11 - тарировочная гайка; 12 - вантуз; 13 - отражательная тарелка

Клапан защитный гидравлический КЗГ-120 (рис. 4.17) специально предназначен для защиты трубопроводов оросительных систем от гидравлического удара и недопустимого статического повышения давления. Избыточное давление снижается вследствие выброса части воды при гидравлическом ударе из трубопровода и разбрызгивания ее радиусом 12-15 м вокруг клапана в виде дождя. Поэтому устанавливать его в здании насосной станции недопустимо. Он устанавливается на стояке поливочного трубопровода после задвижки  $D = 100$  мм у неподвижной опоры при рабочем давлении не выше 1,2 МПа и расходе воды в трубопроводе до 120 л/с. Существуют клапаны иных типов для данных условий работы системы.

Ко второй группе сбросных устройств относится гаситель гидравлических ударов конструкции УкрВОДГЕО (рис. 4.18). Его устанавливают в здании насосной станции на

патрубке после обратного клапана 8. Он состоит из цилиндра 2 с клапаном 1 и поршнем 3, гидрораспределителя 4, масляного тормоза 5, а также соединительных импульсных трубок 6 и 7. При нормальной работе поршни-распределители занимают верхнее положение, при котором цилиндр гасителя соединен с водоводом до обратного клапана с помощью трубки 6. Давление на поршень и клапан гасителя одинаково, при этом водосбросное отверстие плотно закрыто тарелью клапана, поскольку ее площадь меньше площади поршня. При гидравлическом ударе, вызванном выключением насоса, давление у насоса сначала резко снижается и поэтому обратный клапан закрывается. В цилиндре гидрораспределителя соединенном трубкой 6 с трубопроводом у насоса, давление тоже понижается. При переходе отраженной волны гидравлического удара давление перед обратным клапаном начинает возрастать. Оно действует на клапан, вследствие чего при достаточном противодействии со стороны поршня этот клапан приподнимается, часть воды сбрасывается из водовода по отводной трубе 9 и давление в трубопроводе снижается. Гасители этой конструкции рекомендуется устанавливать на трубопроводах больших диаметров. Они не реагируют на гидравлический удар, возникающий при пуске насоса, т.е. удар, начинающийся с волны повышения давления. Недостатки этого устройства заключаются в сложности конструкции и эксплуатации. Их не устанавливают в промежуточных точках водовода.

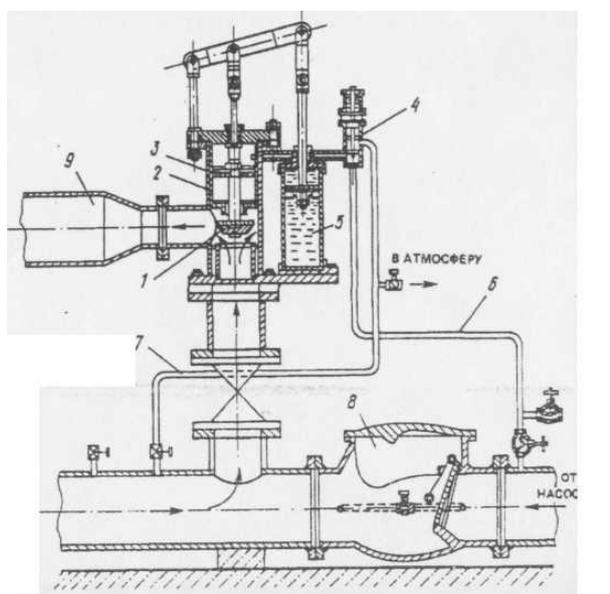


Рис. 4.18. Гаситель гидравлических ударов.

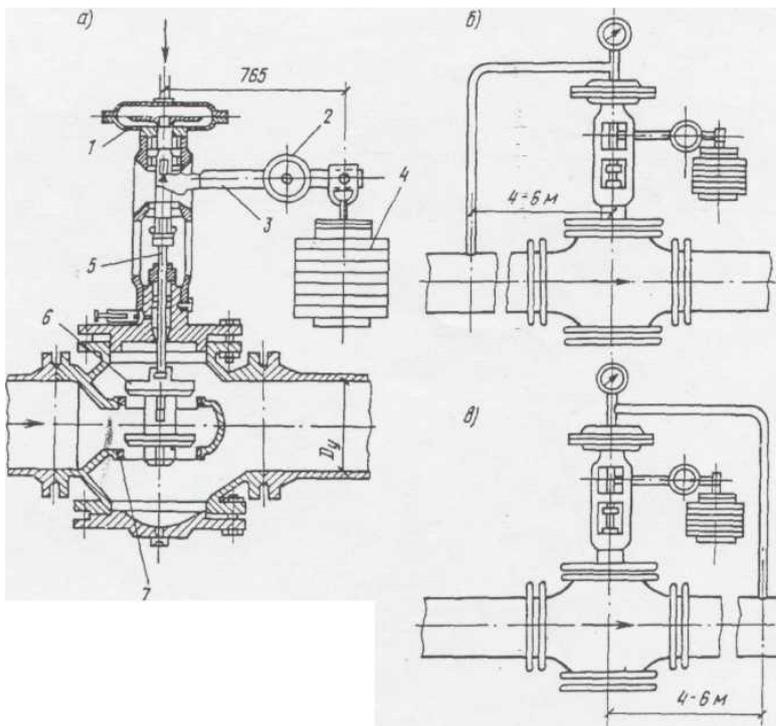


Рис. 4.19. Общий вид регулятора давления (а) и схемы его включения б - «до себя»; в - «после себя»; 1 - головка регулятора; 2 и 4 - грузы; 3 - рычаг; 5 - шток; 6 и 7 - разгруженные золотники клапана

Регулирующая арматура применяется при необходимости поддержания в напорных системах водоснабжения на требуемом уровне расхода или давления. Необходимость дросселирования возникает при ограничении подачи воды насосами, перераспределения нагрузки между совместно работающими насосами, установлении требуемого режима водовода и др. Регулирование давления необходимо в тех случаях, когда в распределительных и магистральных трубопроводах оно значительно отличается от требуемого. Давление воды можно регулировать с помощью специальных клапанов, а также регуляторов давления на базе дисковых поворотных затворов и кольцевых задвижек. Они в зависимости от конструкции могут автоматически поддерживать давление «после себя» или «до себя».

Клапаны изготовляют рычажными или пружинными фланцевыми чугунными на давление  $P_v = 1,6$  МПа диаметрами 60 - 300 мм. Конструкция клапана рычажного приведена на рис. 4.19. Разница в конструкции клапанов типа «после себя» и «до себя» заключается лишь в том, что во втором двухсекционный клапан закрывается снизу вверх (при подъеме клапана), а в первом - сверху вниз (при опускании клапана). Давление регулируется с помощью импульсной трубки, соединяющей трубопровод с диафрагмовой камерой (головкой) и противодействующей силе рычажного механизма с грузом. В клапане типа «до себя» импульсная трубка одним концом присоединена к трубопроводу до регулятора, а другим - к диафрагмовой головке. Под действием рычага с грузом клапан находится в закрытом положении. Как только начальное давление в трубопроводе превысит установленный предел, регулируемая среда через импульсную трубку действует на диафрагму головки регулятора. Последняя, преодолевая силу рычага с грузом, открывает клапан, пропуская среду до тех пор, пока в трубопроводе до регулятора не установится заданное давление. В клапане типа «после себя» импульсная трубка одним концом присоединена к трубопроводу за регулятором, а другим - к диафрагмовой головке. Возможность использования указанных клапанов ограничена из-за их инерционности в моменты резкого изменения давления. Это может приводить к значительному повышению давления в трубопроводе.

Регуляторы давления на базе дисковых поворотных затворов с уплотнением в корпусе с программированным закрытием, как правило, вызывают повышение давления не более чем на 0,2 МПа сверх рабочего.

Дисковый поворотный затвор оборудуется гидроприводом, управляющим устройством с электрическим реле и регулирующим клапаном, который настраивается на поддержание требуемого давления за или перед затвором. Повышение или понижение давления к контролируемой точке трубопровода по сравнению с требуемым передается в регулирующий орган, который заставляет работать гидропривод в направлении открытия или закрытия затвора с целью поддержания давления в заданном диапазоне. Регулятор давления  $D = 150...300$  мм рассчитан на поддержание требуемого давления за затвором в диапазоне 0,3-1,2 МПа. Вместо дискового поворотного затвора может использоваться кольцевая задвижка.

## Глава 12. СООРУЖЕНИЯ НА ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ И ВОДОВОДАХ

Нормальная работа систем подачи и распределения воды может быть обеспечена, если созданы условия для беспрепятственного доступа к основным ее узлам. Такими узлами являются места установки арматуры и фасонных частей с фланцевыми соединениями. В этих местах устраивают водопроводные колодцы и камеры.

Для определения габаритов водопроводных колодцев и их числа необходимо знать диаметр труб, размеры фасонных частей, задвижек, затворов, пожарных гидрантов и т.д., а также места их установки. Поэтому при проектировании после определения диаметров и выбора материала труб производят детализировку всех узлов сети. Правильное конструирование узлов и рациональное использование существующего сортамента арматуры и фасонных частей позволяют снизить строительную стоимость сети и уменьшить размеры колодцев и камер. Прежде всего намечают места установки гидрантов и различной арматуры, а затем осуществляют подбор необходимых фасонных частей для монтажа отдельных узлов.

При определении размеров колодцев минимальные расстояния до внутренних поверхностей колодцев следует выбирать, руководствуясь требованиями СНиП. Колодцы шириной до 2,5 м, как правило, устраивают круглыми, свыше 2,5 м - прямоугольными. На рис. 4.20 показан круглый в плане колодец из сборного железобетона, предназначенный для основных узлов трубопроводов диаметром 100-600 мм. Колодец состоит из основания, рабочей камеры и горловины, которая заканчивается чугунным люком с крышкой.

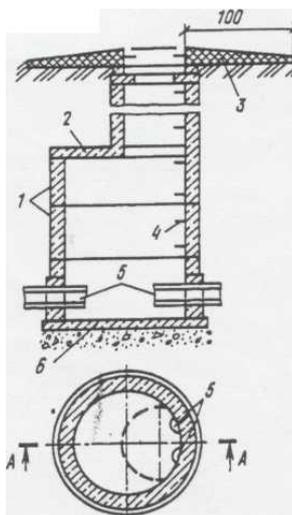


Рис. 4.20. Водопроводный колодец  
1 - кольцо из железобетона; 2 - плита перекрытия; 3 - отростка; 4 - скобы; 5 - трубы водопроводной сети; 6 - днище

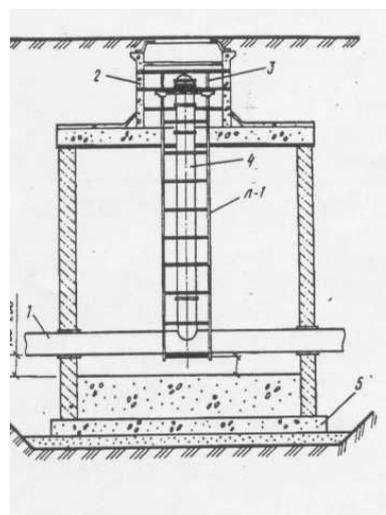


Рис. 4.21. Камера из сборного железобетона  
1 - водонапорная линия; 2 - горловина камеры; 3 - лестница; 4 - пожарный гидрант; 5 - железобетонное днище

На рис. 4.21 показана камера из сборного железобетона (разработанная институтом Мосинжпроект), устраиваемая на водоводах и водопроводных магистралях.

Высота рабочей части колодцев должна быть не менее 1,5 м. Для спуска в колодец на его горловине и стенках надлежит устанавливать рифленые стальные или чугунные скобы; допускается применение переносных металлических лестниц. Вокруг люков и колодцев, размещаемых на застроенных территориях без дорожных покрытий, следует предусматривать отростки шириной 0,5 м с уклоном от люков.

На проезжей части крышки люков должны быть на одном уровне с ее поверхностью. При заделке труб в стенках колодцев необходимо обеспечивать плотность соединений, водонепроницаемость в мокрых грунтах, а также возможность осадки стенок.

При прокладке значительных и сложных узлов трубопроводов больших диаметров для размещения коммуникаций устанавливают камеру переключений. При размещении задвижек в камерах предусматривается возможность управления ими с поверхности земли через небольшие люки с помощью специальных устройств.

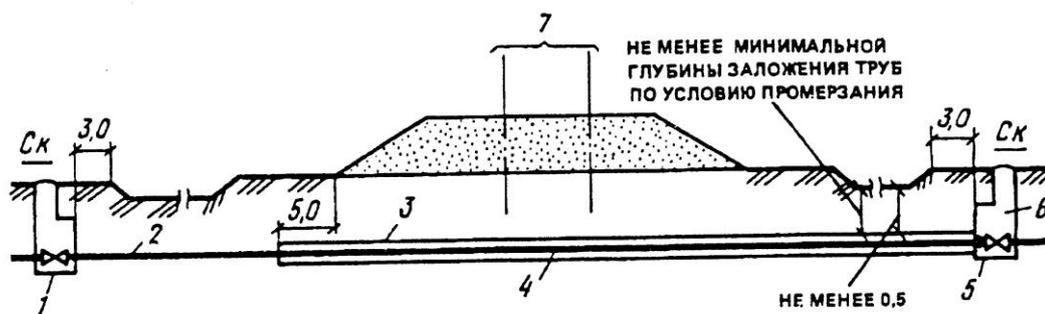
При использовании для водоводов железобетонных напорных труб с целью уменьшения габаритов камер участка водовода, непосредственно примыкающие к камере, выполняют из стальных труб. При наличии подземных вод днище и стенки колодцев и камер гидроизолируют битумом или цементным раствором. Воду из камер удаляют с помощью насосов, используя для этого приямки. При возможности сброса вод из камер в существующий водоток или дренаж следует предусматривать отвод вод из приямков по чугунным трубам в водосточный или дренажный колодец.

Под действием внутренних сил давления воды в напорных водопроводных трубах возникают растягивающие напряжения, которые не могут быть восприняты стыками труб. Они появляются в местах поворота линий, на ответвлениях и тупиковых участках и на узлах сети. Для исключения смещения и повреждения трубопроводов в водопроводных колодцах и камерах или в грунте устраивают упоры в виде бетонных или кирпичных массивов.

Переход водопроводной линии под железной или автомобильной дорогой достаточно ответственное сооружение, так как разрыв или повреждение их может привести к созданию аварийной ситуации. Эти переходы осуществляют, как правило, в специальных кожухах (футлярах). Кожух перехода служит для предохранения рабочего трубопровода от нагрузок, возникающих от подвижного состава, и для защиты его от воздействия агрессивных грунтов и блуждающих токов. Футляр выполняется из стальных труб.

Переходы должны обеспечивать безопасное движение транспорта в период производства работ по прокладке трубопроводов, предохранение земляного полотна и покрытия, дорог от размыва при возможной аварии на трубопроводах, а также предохранение трубопроводов перехода от разрушения. Переходы должны устраиваться на прямолинейных участках трубопроводов с пересечением полотна железной или автомобильной дороги под прямым углом. Переходы обычно располагают под полотном железной дороги в местах с минимальным числом путей, как правило, вне мест расположения стрелочных переводов и съездов, не ближе 10 м от опор контактной сети и фундаментов искусственных сооружений. Типовые проекты переходов водопроводных линий под железнодорожными путями разработаны институтом Мосгипротранс (рис. 4.22).

Конструкцией перехода предусматривается возможность наблюдения за его работой, отключения и опорожнения его.



**Рис. 4.22. Переход водопроводной линии под железнодорожными путями**

1 - водопроводный колодец; 2 - ремонтный участок; 3 - кожух; 4 - рабочая труба; 5 - выпуск; 6 - задвижка; 7 - железнодорожное полотно

Общая длина перехода складывается из длины кожуха и длины ремонтного участка. Кожух принимается такой длины, чтобы концы его были выведены на расстояние не менее 5 м от подошвы откоса насыпи и 3 м от бровки откоса выемки. Длина ремонтного участка принимается не менее 10 м.

На трубопроводе с обеих сторон перехода устраивают колодец с запорной арматурой, установленной в целях отключения и опорожнения переходов. Диаметр рабочей трубы перехода принимают, как правило, равным диаметру рабочего трубопровода; диаметр кожуха определяют в зависимости от диаметра и материала рабочей трубы и от способа производства работ в соответствии со СНиП 2.04.02-84. Рабочий напорный трубопровод, укладываемый в кожухе, принимается из стальных труб, так как при их укладке обеспечивается целостность стыков при затаскивании труб в кожух.

Устройство переходов под железнодорожными и автомобильными дорогами может производиться бестраншейным или открытым способом. Схемы переходов под автомобильными дорогами аналогичны схемам переходов под железнодорожными.

Переход водопроводных труб через реки может быть осуществлен по мосту, а также по дну реки. При переходе по дну реки водопроводные трубы укладывают в виде дюкера. Число линий труб дюкера должно быть не менее двух, при этом при выключении одной из линий по остальным должна обеспечиваться подача 100 % расчетного расхода воды. Дюкеры укладывают из стальных труб повышенной прочности с усиленной антикоррозионной защитой. Глубина укладки подводной части трубопровода (до верха трубы) должна быть ниже дна водоема не менее чем на 0,5 м, а в пределах форватера на судоходных водотоках - не менее чем на 1 м.

Расстояние между линиями дюкера в свету принимается не менее 1,5 м. По обе стороны дюкера устраивают специальные колодцы с установкой в них с помощью задвижек необходимых переключений. Дюкеры собирают и сваривают на поверхности. Основными способами укладки трубопроводов под водой являются: методом свободного погружения; с плавучих и стационарных опор; опускание со льда; с плавучих средств при постепенном наращивании плетей; протаскивание плетей трубопровода по дну подводной траншеи.

Целесообразность использования того или иного способа определяют на основе технико-экономического сравнения вариантов исходя из местных условий.

### **Глава 13. ЕМКОСТИ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Для регулирования режима работы системы водоснабжения, создания противопожарных и аварийных запасов воды, хранения расходов на технологические

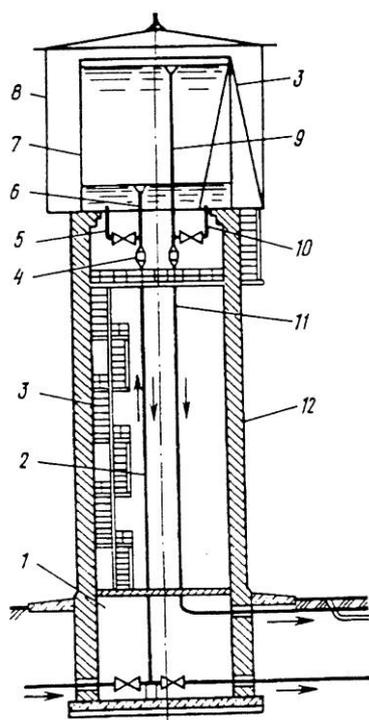
нужды производств и на собственные нужды водоочистных комплексов применяют емкости. Правильность выбора места расположения, режима работы и объемов регулирующих емкостей позволяет снизить их стоимость и повысить степень надежности системы водоснабжения. Это достигается равномерной нагрузкой водоводов и магистралей, обеспечением работы основных насосных станций практически в постоянном режиме при оптимальных значениях КПД насосных агрегатов. Требуемые пара метры регулирующих емкостей определяют путем анализа работы системы подачи и распределения воды при различных режимах водопотребления и технико-экономического сравнения различных вариантов.

В зависимости от способа подачи воды емкости могут быть напорными (активными) и безнапорными (пассивными). В первом случае вода поступает к потребителю под требуемым напором; во втором - для ее подачи требуется установка водоподъемного оборудования.

Регулирующие емкости бывают следующих типов: водонапорные башни и колонны; резервуары; гидропневматические установки. Выбор типа емкости в каждом конкретном случае должен производиться на основе сравнения вариантов с учетом стоимости строительства, эксплуатационных расходов и расходов на оплату электроэнергии, а также надежности работы системы и эстетических аспектов. Например, стоимость единицы объема водонапорных башен выше стоимости единицы объема подземных и наземных безнапорных резервуаров, однако при нарушении электропитания подача воды потребителям от башен прекращается не сразу.

Рациональным способом создания значительного запаса воды является устройство закрытых резервуаров, расположенных на топографических отметках местности, обеспечивающих требуемый напор в сети.

Водонапорные башни устраивают в случае необходимости создания запасов напорной воды на территории площадки, не имеющей достаточно высоких геодезических отметок. Водонапорная башня (рис. 4.23) состоит из резервуара (бака), в котором содержится требуемый объем воды, и поддерживающей его конструкции. Резервуары водонапорных башен, как правило, устраивают круглой формы в плане. Предпочтительно, чтобы отношение высоты бака башни к ее диаметру было небольшим. В этом случае исключаются значительные колебания напоров в системе при различных режимах и обеспечиваются более благоприятные условия работы насосов.



**Рис. 4.23. Схема водонапорной башни**

1 - фундамент и подвальное помещение; 2 - подающе-отводящая труба; 3 - лестницы; 4 - сальниковые компрессоры; 5 - труба на противопожарные нужды; 6 - труба для забора воды из бака на хозяйственные нужды; 7 - бак; 8 - шатер; 9, 10 и 11 - трубы переливная, грязевая и сбросная; 12 - ствол

Резервуары водонапорных башен бывают железобетонными и стальными. Наиболее широкое распространение получили железобетонные резервуары, защита которых от коррозии проще и долговечнее защиты стальных. Стальные резервуары характеризуются меньшей массой, индустриальностью изготовления и монтажа, полной герметичностью. Они нашли достаточно широкое применение в зарубежных странах.

Резервуары могут иметь плоское или вогнутое днище. Придание вогнутым днищам полусферической, эллипсоидальной и радиально-конической форм позволяет увеличивать диаметр резервуара (при одном и том же объеме) по сравнению с диаметром резервуара с плоским днищем. Благодаря этому колебания напора могут быть сокращены до минимума. Однако резервуары с вогнутыми днищами сложнее в изготовлении. В нашей стране наиболее широко применяют резервуары с плоским и полусферическим днищами.

При наличии опасности замерзания воды в резервуаре вокруг него устраивают шатер в зависимости от конструкции водонапорной башни, выполненный из железобетона, кирпича или дерева. Расстояние между стенками резервуара и шатра принимают исходя из условий эксплуатации. Для предотвращения замерзания возможно применение электрообогрева. В башнях большой вместимости при наличии обмена воды с относительно высокой температурой шатры могут отсутствовать даже в суровых климатических условиях. Бесшатровые металлические башни бывают как с теплоизоляцией, так и без нее.

Сверху резервуар башни перекрывается. Перекрытие (крыша) обеспечивает его жесткость и служит для защиты от температурных колебаний и загрязнений. Поддерживающие конструкции водонапорных башен выполняют из железобетона, металла и кирпича в виде сплошной стенки или колони, имеющих различное архитектурное оформление. Наибольшее распространение получили конструкции из железобетона. Внутреннее пространство, образуемое поддерживающими конструкциями, может использоваться для технических и общественных нужд, но при условии исключения какого-либо воздействия на качество воды, находящейся в резервуаре.

Башню оборудуют подводяще-отводящей трубой, диаметр которой определяется максимальным расходом подаваемой или отводимой из резервуара башни воды при скорости ее движения не более 1 - 1,2 м/с. Иногда предусматривают две трубы - отдельно подводящую и отводящую. Для автоматического сброса поступающей воды в бак при его переполнении устраивают переливную трубу, оборудованную приемной воронкой. Кроме того, резервуар оборудуют грязевой трубой, предназначенной для опорожнения его при ремонте и осмотре. Эта труба идет от нижней точки резервуара и через задвижку подключается к сбросной трубе. На грязевой трубе воронка не устраивается. Воду из водонапорных башен хозяйственно-питьевого водопровода сбрасывают в водосточную сеть или в открытую канавку с устройством разрыва струи. В конце трубопровода, оборудованном решеткой, устраивается обратный клапан. Для производственных систем водоснабжения сброс из резервуаров башен возможен в систему канализации, но также с разрывом струи. При жесткой заделке трубы в днище резервуара на стояках трубопроводов устраивают компенсаторы.

Противопожарный запас воды из бака может забираться самостоятельным трубопроводом, оборудованным затвором, открываемым по команде с диспетчерского пункта.

Резервуар оборудуется сигнальным устройством для автоматической передачи показаний уровней воды в нем. В качестве этих устройств используют поплавковые, контактные и манометрические датчики уровней. При необходимости отключения башни при пожаре она оборудуется автоматическими устройствами, обеспечивающими дистанционное отключение при пуске пожарных насосов.

Строительство башен небольшой вместимости осуществляется по типовым проектам. Строительство водонапорных башен больших объемов в пределах городской

застройки, предусматривающее органичное вписание этих сооружений в городской пейзаж с использованием их архитектурно-планировочных решений в целях благоустройства городской среды, а также утилитарных целях, в России весьма ограничено.

На объектах, имеющих несколько сетей, работающих при различных напорах, возможно устройство водонапорных башен с двумя и более резервуарами, расположенными на различной высоте. Такая башня суммарным объемом в  $6000 \text{ м}^3$  (Венгрии) показана на рис. 4.24.

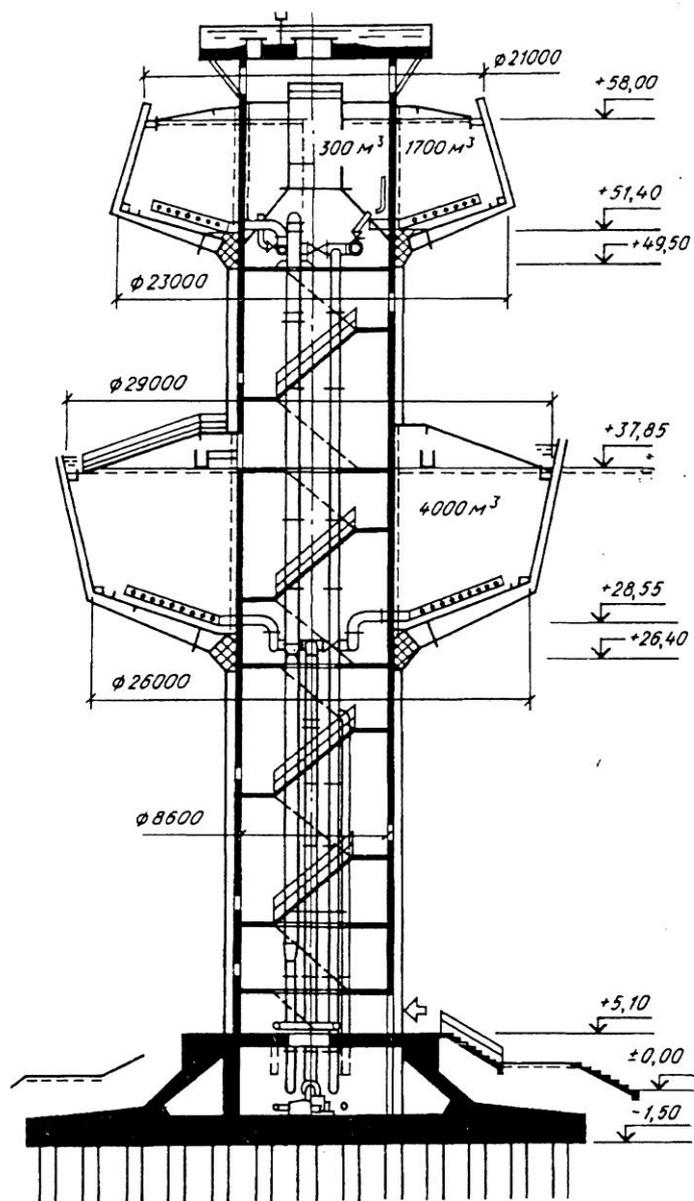


Рис. 4.24. Водонапорная башня с двумя резервуарами

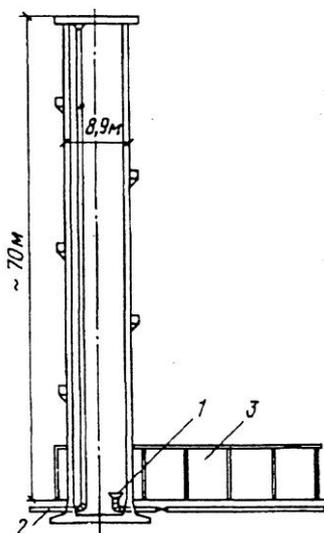
**Водонапорные колонны** находят применение в системах промышленного водоснабжения. Они дешевле водонапорных башен, проще в изготовлении и эксплуатации. Они могут использоваться как средство борьбы с гидравлическими ударами в трубопроводах и выполнять роль промежуточного резервуара между последовательно работающими насосными станциями.

Водонапорная колонка представляет собой стальной или железобетонный цилиндр с плоским дном, опирающимся на фундамент. Она заполняется на всю высоту.

Полезным объемом водонапорной колонны служит только часть полного ее объема, обеспечивающая подачу воды потребителю под требуемым напором.

Остальная часть объема рассматривается как аварийный запас, который может использоваться при включении специальных насосных агрегатов или без них, если в системе допускается снижение свободных напоров. Целесообразность применения водонапорных колонн для металлургических печей объясняется тем, что во время аварии подача воды в холодильники допускается со сниженным напором, обеспечивающим только проток воды через них. Для этого достаточно иметь напор на изливе около 2 м.

В большинстве случаев водонапорные колонны устраивают из стали. В стальных колоннах легче устранять утечки. Однако без достаточной защиты от коррозии они быстро разрушаются. Конструкция стальной колонны вместимостью  $1000 \text{ м}^3$  на высоте 50 м и вместимостью  $2600 \text{ м}^3$  на высоте от 9 до 50 м, разработанная ЦНИИЭП инженерного оборудования, приведена на рис. 4.25. Рядом с колонной предусмотрена насосная станция, позволяющая подавать воду в количестве  $2700 \text{ м}^3/\text{ч}$  с напором 58 м при сработке уровня воды в ней ниже допустимого.



**Рис. 4.25. Схема водонапорной колонны, совмещенной с насосной станцией подкачки**

1, 2 - трубопроводы подводяще-отводящий и переливной; 3 - насосная станция

Железобетонные колонны имеют преимущества в архитектурном оформлении по сравнению с колоннами других типов. Они дешевле в эксплуатации, но имеют большую массу.

Водонапорные колонны, как и башни, оборудуются системой трубопроводов и арматуры. Недостатком колонн является возможность застоя воды в них, что может приводить к ухудшению качества воды.

**Резервуары**, как было сказано, бывают активными (напорными) и пассивными (безнапорными). Активные резервуары устраивают на возвышенных отметках. Они выполняют ту же роль, что и водонапорные башни. Из пассивных резервуаров вода к потребителю подается с помощью водоподъемных установок. Эти резервуары обычно используются как регулирующие емкости на станциях очистки воды, а также в черте города или промышленного предприятия для хранения противопожарного либо аварийного запаса воды. В современных условиях в основном применяют резервуары из железобетона. Они бывают различных конструкций, круглой и прямоугольной форм и выполняются различными способами строительства. В некоторых странах находят применение стальные резервуары. Однако из-за большой металлоемкости, трудности защиты от коррозии и необходимости устройства термоизоляции они не нашли широкого применения.

В зависимости от заглубления резервуары подразделяются на подземные и полуподземные. Они бывают объемом от нескольких сот до десятков тысяч кубических кубометров и выполняются по типовым проектам.

На территории, снабжаемой водой из резервуаров одного назначения, их должно быть не менее двух. Объем резервуаров следует назначать таким образом, чтобы при выключении одного из них в остальных сохранялся противопожарный и аварийный запас в размере не менее 50 %. Если в резервуарах не находится противопожарный и аварийный запас, то возможно устройство одного резервуара.

Резервуары оборудуются подводными и отводящими трубопроводами, переливными и спускными устройствами, системой вентиляции, люками для прохода обслуживающего персонала и транспортирования оборудования, контрольно-измерительной аппаратурой. В целях предотвращения застаивания воды и изменения ее качества в резервуарах хозяйственно-питьевого назначения должен быть обмен пожарного и аварийного объемов в течение 2 сут.

Компоновка оборудования и трубопроводов резервуаров зависит от их назначения. Схема оборудования напорного резервуара, содержащего кроме питьевого противопожарный запас воды, показана на рис. 4.26. В напорном резервуаре 1 для лучшей циркуляции воды, обеспечивающей ее обмен, подающий 2 и отводящий 9 трубопроводы располагаются в противоположных частях резервуара. Подающий трубопровод оборудован поплавковым 3, а отводящий обратным приемным 5 клапанами. Трубы для подачи и забора воды в камере переключений 12 через задвижку 7 присоединяются к подающе-отводящим трубопроводам 14, которые присоединены к распределительной сети.

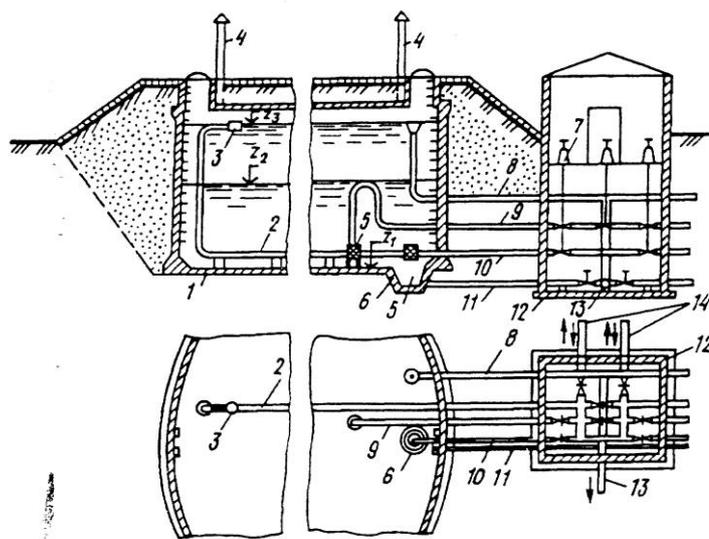


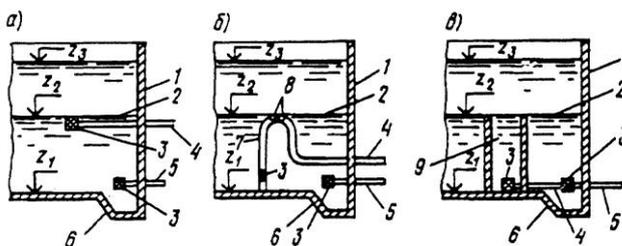
Рис. 4.26. Схема оборудования водонапорного резервуара

Забор воды на противопожарные нужды осуществляется трубопроводом 10 с обратным приемным клапаном на конце. Переполнение резервуара исключается благодаря устройству переливной трубы 8, присоединенной к сбросной трубе 13. Воздухообмен в резервуаре обеспечивается вентиляционными трубами 4. Для опорожнения резервуара при ремонте и его очистки от образующегося осадка приемок 6 соединен с грязевой трубой 11, отводящей воду в канализацию.

Гарантировать неприкосновенность противопожарного запаса в напорных резервуарах можно различными способами. Первый способ предусматривает отбор хозяйственно-питьевых и противопожарных расходов с разных отметок (рис. 4.27,а). При втором способе (рис. 4.27,б) на хозяйственно-питьевом трубопроводе устраивается колено, в верхней части которого имеются отверстия, расположенные на отметке верха

противопожарного уровня. Колено работает как сифон, в котором происходит срыв вакуума при снижении уровня воды до указанной отметки.

Третий способ обеспечивает сохранность противопожарного запаса путем устройства колодца (рис. 4.27,в) верхнюю кромку которого устанавливают на отметке верхнего уровня. Вода на хозяйственно-питьевые нужды забирается через трубопровод, конец которого расположен внутри колодца.



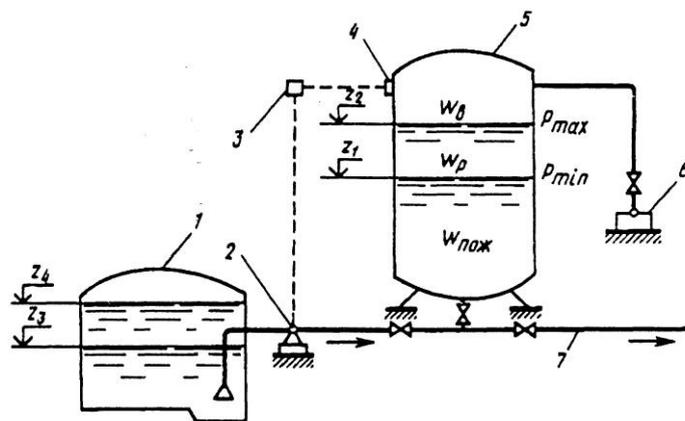
**Рис. 4.27. Схема сохранения неприкосновенного противопожарного запаса воды в водонапорном резервуаре**

*а* - размещение водонапорных труб на разных отметках; *б* - устройство сифона; *в* - устройство цилиндрического всасывающего колодца; 1 - резервуар; 2 - уровень пожарного запаса; 3 - обратный приемный клапан; 4 - труба для отбора воды на хозяйственно-питьевые нужды; 5 - то же, на противопожарные нужды; 6 - прямая; 7 - сифон; 8 - отверстия; 9 - цилиндрический колодец.

Безнапорные резервуары в отличие от напорных пополняются не от сети, а от очистных сооружений или от насосной станции. Неприкосновенность противопожарного запаса в этом случае можно обеспечить путем автоматизации работы насосной станции, забирающей воду из резервуара. При снижении уровня воды, соответствующего противопожарному запасу, на диспетчерский пункт подается сигнал.

В системах водоснабжения небольших объектов иногда находят применение **гидропневматические установки**. Они выполняют роль водонапорной башни. Требуемый напор в них создается давлением сжатого воздуха.

Эти установки бывают переменного и постоянного давления. Схема установки переменного давления показана на рис. 4.28. В часы минимального водопотребления, когда подача воды насосами 2, забирающими воду из резервуара 7, превышает водозабор, избыток воды поступает в водовоздушный бак 5. При этом повышается уровень воды и увеличивается давление воздуха вследствие его сжатия. При достижении максимального уровня в баке, соответствующего отметке  $z_2$ , реле давления 4 размыкает цепь питания катушки магнитного пускателя 3 и электродвигатель насоса отключается от питающей его электросети. С этого момента подача воды в водовод 7 осуществляется от гидропневматического бака под давлением сжатого воздуха  $p_{\max}$ . В процессе срабатывания уровня воды давление в баке снижается. При достижении уровня, соответствующего отметке  $z_1$  давление в баке снизится до  $p_{\min}$ . В этот момент реле включает электродвигатели насосов. Рабочий цикл установки повторяется. Минимальное давление  $p_{\min}$  назначается из условия обеспечения требуемого свободного напора в диктующей точке водоразбора. Во все остальные моменты, когда  $p > p_{\min}$ , свободный напор в этой точке будет выше требуемого.



**Рис. 4.28. Схема гидropневматической установки**

Регулирующий объем водовоздушного бака 5, заключенный между уровнями  $z_1$  и  $z_2$ , определяется путем совмещения графиков подачи и потребления воды. Существует схема таких установок с двумя баками, один из которых предназначен для воды, а другой для сжатого воздуха. Они соединены друг с другом трубопроводом. Эти установки рассчитаны на большую производительность.

В гидropневматических установках переменного давления насосы должны работать в широком диапазоне характеристики  $Q$ - $H$ . В процессе эксплуатации определенная часть воздуха, находящегося в баке, растворяется в воде, вытекает через неплотности. Для поддержания давления воздуха в баке установка оборудуется компрессором 6. В основе расчета установок лежит закон Бойля - Мариотта.

Установки постоянного давления позволяют с помощью регулятора давления поддерживать постоянное давление воздуха в гидropневматическом баке и тем самым обеспечивать постоянство расхода и давления у потребителя. Эти установки несколько сложнее описанных выше. Они могут применяться в системах пожаротушения и промышленного водоснабжения, если изменение напора приводит к недопустимым колебаниям расходов воды.

## **Глава 14. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В НАПОРНЫХ СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

При работе любой напорной системы водоподдачи, в том числе и водоснабжения, ее параметры фактически непрерывно изменяются, поэтому деление процессов на стационарные и переходные условно.

При режимах работы напорных систем, принимаемых стационарными, в действительности происходят изменения их параметров, но они относительно невелики и их можно практически не учитывать. Поэтому принимается, что переходной процесс - это переход от одного условно стационарного режима к другому, при этом, как правило, следует учитывать лишь переходные процессы, параметры которых выходят за их пределы при стационарных режимах работы напорных систем водоподдачи.

В случаях, когда переходные процессы приводят к значительным увеличениям давления в напорных системах, считается, что они сопровождаются гидравлическими ударами. Протекание переходных процессов в напорных системах водоподдачи в значительной степени зависит от причин их вызывающих.

Каждая напорная система включает в себя: источник питания или несколько источников питания (насосная станция или резервуар, расположенный в повышенном месте), напорный трубопровод или сеть напорных трубопроводов; водопотребители (водовыпускные сооружения, водоразборные устройства). Таким образом, переходные

процессы в напорных системах могут возникать при изменении режима работы любого из перечисленных элементов.

Практически это может происходить при отключении и пуске насосных агрегатов на насосной станции или их регулировании; при изменении степени открытия трубопроводной арматуры у водопитателей, на напорных трубопроводах, у водопотребителей; при повреждении водопитателей, трубопроводов и водопотребителей, приводящих к утечкам воды из напорной системы.

Первой причиной, вызывающей переходные процессы в напорных системах, может быть названо изменение степени открытия запорной трубопроводной арматуры, в качестве которой наиболее часто используются шиберные задвижки.

Следует отметить, что впервые случаи возникновения гидравлических переходных процессов (гидравлических ударов) были обнаружены Н.Е. Жуковским в 1899 г. на Алексеевской водокачке Московского водопровода. Увеличение гидравлического сопротивления задвижек при их закрытии приводит к уменьшению скорости движения воды и соответствующему возрастанию давления в трубопроводе до задвижки.

В связи с тем, что гидравлическое сопротивление задвижки изменяется в начале закрытия незначительно, а в конце очень резко, и таким же образом уменьшается скорость движения воды, то это может привести к возникновению гидравлических ударов.

Лучшие гидравлические характеристики, чем задвижки, имеют дисковые затворы, сопротивление которых при закрытии изменяется более равномерно.

В соответствии с формулой, полученной Н.Е. Жуковским, максимальное повышение напора при закрытии задвижки может составить  $\Delta H = av_0/g$  ( $v_0$  - начальная скорость движения воды). Для стальных труб значение скорости распространения ударных волн  $a$  может быть принято равной  $\approx 1000$  м/с, поэтому  $\Delta H \approx 100v_0$ , т.е. повышение напора может быть весьма существенным. Однако такое повышение давления будет лишь в том случае, когда время закрытия задвижки  $t_2$  не превышает удвоенного времени распространения волн по длине  $l_T$  трубопровода  $t_3 < 2 l_T/a$ . При выполнении этого условия гидравлический удар называется прямым.

В большинстве случаев нет необходимости осуществлять закрытие запорной арматуры за время, меньшее  $2 l_T/a$ ; время закрытия следует принимать значительно большим, поскольку в отдельных случаях и при  $t_3$ , несколько превышающем  $2 l_T/a$ , повышение напора может быть существенным.

Уменьшение давления при гидравлических переходных процессах, вызываемых закрытием запорной арматуры, можно достичь не только увеличением времени ее закрытия, но и использованием равномерного закрытия, т.е. закрытия запорного устройства с уменьшающейся во времени скорости. Практически осуществить непрерывное уменьшение скорости закрытия достаточно сложно, поэтому используют закрытие с несколькими значениями скорости закрытия (две, три). Таким образом, режим закрытия запорной арматуры почти всегда может быть назначен таким, чтобы ощутимого повышения давления при этом не происходило. Этот режим закрытия принимается на основании результатов расчетов переходных процессов (см. ниже).

В настоящее время наиболее частой и практически неустранимой причиной возникновения переходных процессов в напорных системах водоподачи является аварийное отключение электродвигателей насосных агрегатов. После отключения насосных агрегатов их частота вращения начинает уменьшаться; в связи с этим уменьшаются также подача и напор насоса. С уменьшением напора насоса будет снижаться и давление в начале напорного трубопровода, которое в виде волн пониженного давления будет распространяться по трубопроводу (трубопроводам). Через определенный промежуток времени, зависящий от геодезической высоты подъема воды, длины трубопровода (длин трубопроводов) и скоростей распространения ударных волн, подача воды насосом, уменьшится до нуля.

В дальнейшем протекание переходного процесса будет во многом зависеть от того, установлены ли на напорных линиях насосов или в начале напорных трубопроводов обратные клапаны, исключающие возможность движения воды в обратном направлении, или они отсутствуют. В первом случае (рис. 4.29) при изменении направления движения воды в начале напорного трубопровода произойдет закрытие обратных клапанов, что вызовет уменьшение скорости движения воды до нуля и соответствующее повышение давления в трубопроводе (гидравлический удар). После этого переходные процессы будут протекать изолированно в насосной станции (уменьшение частоты вращения насосных агрегатов до нуля) и в трубопроводе (трубопроводах), в которых ударные волны будут распространяться с постепенным затуханием колебаний давления и скорости движения воды.

Во втором случае вода после изменения направления двигаться через насос в обратном направлении. Какое-то ротор насосного агрегата еще будет вращаться в прямом направлении, а затем остановится и под влиянием обратного потока начнет вращаться в противоположную сторону с постепенно увеличивающейся частотой вращения; напор насоса при этом будет также повышаться. По мере увеличения расхода воды через насос будут также увеличиваться потери напора, что несколько снизит скорость потока воды. Следует отметить, что при использовании для подачи воды центробежных насосов увеличение их частоты вращения приводит к повышению их гидравлического сопротивления, вследствие чего еще больше будет снижаться скорость потока воды. Наибольшее повышение напора насоса (см. рис. 4.29) приблизительно соответствует максимальной реверсивной частоте вращения (частоте вращения в обратном направлении). В этих случаях повышение напора значительно меньше, чем при отсутствии сброса воды через насосы.

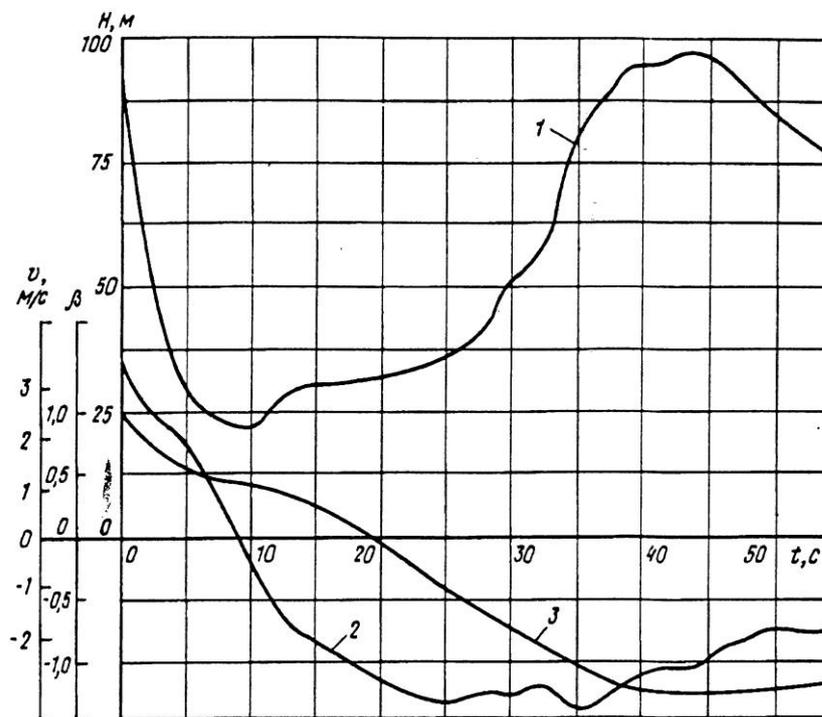


Рис. 4.29. График изменения напора насоса 1, скорости движения воды в начале трубопровода 2 и относительной частоты вращения ротора 3 в случае отключения центробежного насоса при открытой запорной арматуре на напорной линии

Переходные процессы, вызываемые отключениями насосов, начинаются с распространения по трубопроводам волн понижения давления. Уменьшение давления в трубопроводах ограничено предельным значением вакуума в них, соответствующим давлению насыщенных паров воды, зависящему от ее температуры. При снижении давления в каком-либо месте трубопровода до предельного значения вакуума дальнейшего уменьшения давления происходить не будет, поэтому скорость движения

колонны воды на участке трубопровода до этого места станет меньше скорости движения ее после него. Образовавшееся пространство между колоннами воды будет заполняться парами воды, а также выделившимися из нее газами, т.е. произойдет образование кавитационного разрыва сплошности потока воды в трубопроводе. Максимальное расстояние между разошедшимися колоннами воды будет в тот момент, когда разность скоростей движения колонн воды станет равной нулю.

При изменении направления движения в трубопроводе скорость колонны воды до места образования разрыва сплошности потока будет меньше скорости ее за этим местом, поэтому расстояние колоннами будет уменьшаться. В момент уменьшения этого расстояния до нуля произойдет соударение колонн воды с резким и весьма значительным повышением давления, которое может быть больше, чем при отсутствии разрыва сплошности потока.

Л.Ф. Мошниным была получена формула, определяющая предельное значение напора в трубопроводах в условиях образования разрывов сплошности потока

$$H_{\max} = av_0/g + 3H_{\text{ст}}$$

где  $H_{\text{ст}}$  - статический напор.

При выводе этой формулы не учитывались потери напора в трубопроводах и инерция насосных агрегатов, поэтому в большинстве случаев напор, определенный по ней, значительно превышает фактический.

Переходные процессы при одновременном отключении всех насосов будут происходить так, как это было описано выше при условии идентичности характеристик всех параллельных работающих насосных агрегатов. Если характеристики насосных агрегатов различны, то при одновременном отключении изменение их параметров будет происходить по-разному.

Обычно насосы с меньшей подачей менее инерционны и останавливаются быстрее, поэтому в определенный момент после их отключения подача воды ими прекратится, а насосы более инерционные еще будут подавать воду. Для предотвращения обратного движения воды через насосы на их напорных линиях в этом случае устанавливают обратные клапаны.

Переходные процессы при отключении одного из параллельно работающих насосов практически возникают при автоматической работе насосных станций или при неисправности одного из насосных агрегатов.

Плановые отключения и пуски насосных агрегатов неавтоматически работающих насосных станций осуществляется, как правило, при закрытой запорной арматуре на напорных линиях насосов.

Предварительное, до отключения насоса, закрытие запорной арматуры в значительной степени осложняет систему автоматической работы насосной станции, в связи с этим запорная арматура используется в этих насосных станциях лишь как ремонтная и при работе всегда находится в открытом положении.

При отключении одного из нескольких параллельно соединенных насосов изменение направления движения воды в его напорной линии происходит весьма быстро, поскольку остальные насосы продолжают работать. При установке на напорной линии отключаемого насоса обратного клапана закрытие его диска вызывает в этих случаях гидравлический удар. При отсутствии обратного клапана на напорной линии отключаемого насоса вода, подаваемая неотключенными насосами, начнет двигаться через него; при этом реверсивная частота вращения и повышения давления также будет больше, поскольку напор, развиваемый этими насосами, будет больше, чем при аварийном отключении.

При пуске центробежных насосов переходные процессы возникают во всей напорной системе водоподачи при открытой запорной арматуре на их напорных линиях. В

процессе пуска момент, развиваемый двигателем, должен быть больше момента, потребляемого насосом; положительная разность этих моментов обеспечивает увеличение частоты вращения ротора насосного агрегата.

Переходные процессы, возникающие при повреждениях в напорной системе, приводящих к утечкам воды из нее, по характеру аналогичны процессам, вызываемым быстрым открытием запорной арматуры.

Переходные процессы в напорных системах водоподдачи могут быть подразделены на гидравлические, механические и электрические. Гидравлические процессы связаны с колебаниями давления и скоростей движения воды и распространением воли изменения этих параметров по трубопроводам напорных систем при неустановившемся движении воды в них; механические - возникают при изменении частоты вращения роторов насосных агрегатов или степени открытия трубопроводной арматуры; электрические - происходят при изменениях в работе электродвигателей, используемых для привода насосов.

Для описания неустановившегося движения воды в напорных трубопроводах с достаточной степенью точности могут быть использованы следующие дифференциальные уравнения в частных производных:

движения

$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \lambda \frac{|v|v}{2d} = 0 \quad (4.1)$$

неразрывности

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{d^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (4.2)$$

где  $H$  и  $v$  - неизвестные напор и скорость движения воды;  
 $x$  - координата;  
 $t$  - время;  
 $g$  - ускорение свободного падения;  
 $a$  - скорость распространения ударных волн;  
 $d$  - диаметр трубопровода;  
 $\lambda$  - коэффициент сопротивления труб на трение.

Уравнение (4.1) определяет равенство сил, приложенных к единице объема жидкости в направлении оси трубопровода; уравнение неразрывности (4.2) выражает закон сохранения массы жидкости.

Для описания механических переходных процессов при изменении частоты вращения роторов насосных агрегатов применяется следующее выражение:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_\delta - M_n$$

где  $d\omega/dt$  - угловое ускорение ротора ( $\omega$  - угловая скорость);  
 $I$  - момент инерции вращающихся масс насосного агрегата;  
 $M_\delta$  - момент, развиваемый электродвигателем;  
 $M_n$  - момент, потребляемый насосом (момент сопротивления механизма).

Аналогичным уравнением описываются механические переходные процессы, связанные с изменением степени открытия запорно-предохранительной арматуры (обратных клапанов).

Для описания электрических переходных процессов при изменении частоты вращения асинхронного электродвигателя может быть использовано следующее выражение:

$$M_{\partial} = \frac{2M_{кр}}{S_{кр} / S + S / S_{кр}},$$

где  $M_{кр}$  - критический (максимальный) момент электродвигателя;  
 $S$  - скольжение ( $S = (n_c - n_a)/n_c$ , здесь  $n_c$  и  $n_a$  - частота вращения электродвигателя соответственно синхронного и асинхронного);  
 $S_{кр}$  - критическое скольжение, соответствующее  $M_{кр}$ .

Для решения уравнений (4.1) и (4.2), описывающих неустановившееся движение воды в трубопроводах, должны быть заданы начальные условия, определяющие напор  $H$  и скорость  $v$  до возникновения переходного процесса, и граничные (краевые) условия, определяющие изменение функций и их производных на границах трубопроводов.

Задание начальных условий особых сложностей не представляет, поскольку они являются значениями напоров и скоростей движения воды для стационарного режима, предшествующего переходному процессу.

Задание граничных условий во многих случаях является весьма сложной задачей, в особенности для насосных станций. В связи с нелинейностью системы уравнений (4.1) и (4.2) ее решение практически может быть получено только численным методом.

Для решения задач, связанных с переходными процессами в напорных системах водоподачи, К.П. Вишнеvский использовал численный метод характеристик. Этот же метод для решения аналогичных задач был использован Б.Ф. Лямаевым. За рубежом наиболее известны работы, выполненные в этом направлении В. Стритером и Д. Фоксом.

Для решения численными методами по осям  $x$  и  $t$  принимается сетка. Решение по методике автора осуществляется с использованием прямоугольной сетки. Трубопроводы схемы напорной системы разбиваются на участки, длины которых  $\Delta x$  пропорциональны значениям скоростей распространения ударных волн  $a$ . Расчет осуществляется для моментов времени, отличающихся на  $\Delta t = \Delta x/a$ , начиная с  $t = 0$ , принимаемого за начало переходного процесса. Неизвестные значения напоров и скоростей движения воды в трубопроводах определяются в сечениях, примыкающих к расчетным точкам (точкам разбивки трубопроводов на участки).

Методикой учитываются все основные факторы, влияющие на переходные процессы: конфигурация напорной системы водоподачи, длины, диаметры и материал трубопроводов, их профили, скорости распространения ударных волн в трубопроводах, отборы воды в узлах системы, кавитационные и некавитационные разрывы сплошности потока в трубопроводах, характеристики насосов, двигателей и трубопроводной арматуры (запорной, предохранительной, специальной противоударной), инерция насосных агрегатов.

В соответствии с разработанной методикой расчета составлены алгоритмы для различных напорных систем, реализованные в программах для ЭВМ.

Исходные данные для расчета задаются почти в таком же виде, в котором они используются при проектировании напорных систем водоподачи. Вычисления начальных значений напоров и скоростей движения воды, а также разбивка трубопроводов на участки осуществляются при расчете на ЭВМ автоматически.

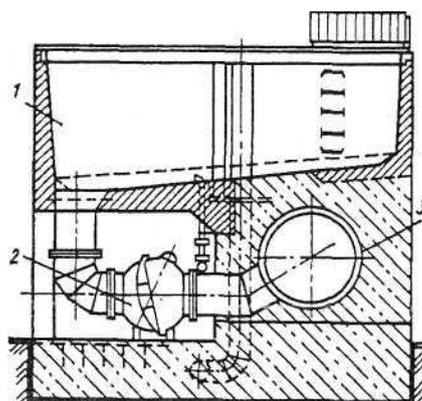
На основании результатов расчетов принимаются необходимые средства защиты от недопустимых колебаний давлений в напорных системах при переходных процессах. Эти средства условно можно разделить на две группы: 1) уменьшающие скорости движения воды в трубопроводах и 2) предназначенные для сброса воды из них.

К средствам первой группы относится, прежде всего, выпуск воздуха в места образования разрывов сплошности потока в трубопроводах с его последующим сжатием (защемлением). Установленные на трубопроводе аэрационные клапаны (клапаны для выпуска и защемления воздуха КВЗВ, см. рис. 4.9) при уменьшении давления ниже атмосферного открываются и через них входит воздух, а при повышении давления они закрываются, воздух в трубопроводе сжимается и давление тем самым уменьшается. Таким образом, установкой КВЗВ достигается как уменьшение давления, так и его увеличение. Однако это средство эффективно лишь при относительно небольших статических напорах в месте установки КВЗВ (до 20 м).

При больших статических напорах эффективным может быть выпуск в трубопровод воды, предотвращающий образование разрывов сплошности потока. Для этой цели используются специальные резервуары или водонапорные колонны. Резервуар 1 соединен с трубопроводом 3 линией с обратным клапаном 2 (рис. 4.30). При нормальном давлении в трубопроводе обратный клапан закрыт и, таким образом, резервуар отсоединен от трубопровода. При уменьшении давления в месте присоединения к трубопроводу резервуара ниже значения, соответствующего уровню воды в нем, обратный клапан открывается, и вода поступает в трубопровод, предотвращая образование разрыва сплошности потока.

Для напорных трубопроводов насосных станций II подъема систем водоснабжения это средство применять не следует по санитарным соображениям, так как вода в резервуаре находится постоянно.

Еще более эффективными являются водонапорные колонны, которые постоянно соединены с трубопроводами, однако в связи с их значительной высотой они достаточно дороги.



**Рис. 4.30. Резервуар для впуска воды и трубопровод**

При значительных статических напорах эффективным средством защиты от недопустимого повышения-давления является установка по длине трубопроводов дополнительных обратных клапанов, разделяющих их на отдельные части. При нормальном режиме работы обратные клапаны открыты. При изменении направления движения воды они закрываются и разделяют трубопровод по высоте на несколько частей, в пределах каждой из которых статический напор будет относительно невелик. Установку обратных клапанов обычно целесообразно сочетать с выпуском и защемлением воздуха.

Колебания давления в трубопроводах диаметром до 700 мм при переходных процессах можно уменьшить с помощью водовоздушных резервуаров (ВВР), называемых также водовоздушными баками или котлами. Обычно их присоединяют к началу напорных трубопроводов. При нормальном давлении в трубопроводах резервуары приблизительно на 1/3 заполнены сжатым воздухом. При снижении давления объем воздуха увеличивается, и часть воды выходит из резервуара в трубопровод, а при увеличении - уменьшается, и вода поступает в резервуар.

К средствам второй группы относятся различные предохранительные сбросные устройства; при этом воду можно сбрасывать и непосредственно через насосы. Сброс воды через насосы является наиболее простым и дешевым средством защиты, не только не требующим дополнительных затрат, но и удешевляющим оборудование, поскольку при этом не устанавливаются обратные клапаны. Недостатком этого средства является реверсивное вращение роторов насосных агрегатов, вызываемое обратным движением воды через насосы. В отдельных случаях частота реверсивного вращения роторов агрегатов может превысить допустимую как для насоса, так и для двигателя. Кроме того, при возрастании частоты вращения, как уже было указано выше, увеличивается гидравлическое сопротивление насоса, что приводит к повышению давления в напорных трубопроводах, правда, не такому значительному, как без сброса воды.

Для расчета переходных процессов при сбросе воды через насосы и реверсивном вращении роторов насосных агрегатов необходимо использовать четырехквadrантные (полные) характеристики насосов, учитывающие все возможные режимы их работы.

Для ограничения количества сбрасываемой воды на напорных линиях насосов можно устанавливать обратные клапаны, оборудованные обводными линиями, диаметр которых составляет  $1/3 - 1/5$  диаметра клапана.

Более эффективной является установка специальных обратных клапанов с регулируемым закрытием. В соответствии с результатами расчетов переходных процессов режим закрытия этих обратных клапанов принимается таким, чтобы, с одной стороны, снижалось давление в напорных трубопроводах, а с другой, не возрастала (значительно) частота реверсивного вращения ротора насосного агрегата. Особенно успешно обратные клапаны с регулируемым закрытием могут быть использованы на насосных станциях, работающих автоматически.

Большинство сбросных предохранительных устройств открываются при давлениях  $P_{ср.}$ , несколько превышающих максимальное рабочее  $P_{max}$ , что, безусловно, является их недостатком. Кроме того, все они в какой-то мере инерционны, т.е. их открытие происходит с некоторым запаздыванием после увеличения давления до значения  $P_{ср.}$

Принципиально отличается от этих устройств гаситель гидравлических ударов УкрВОДГЕО. Он открывается до повышения давления в трубопроводе после закрытия обратного клапана, когда давление за ним несколько превысит давление перед ним.

Недостатком всех сбросных устройств является также необходимость их достаточно частого регулирования. В связи с этим прибегать к их использованию следует лишь тогда, когда другие средства не могут быть использованы.

## **РАЗДЕЛ 5. ВОДОЗАБОРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ**

### **Глава 15. ВОДОЗАБОРЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

#### **15.1. УСЛОВИЯ ЗАЛЕГАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД. ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ**

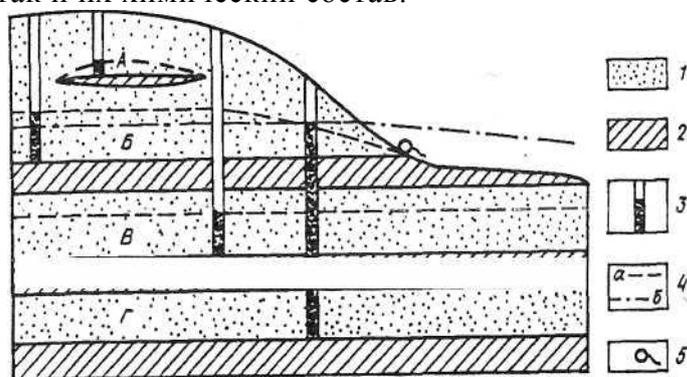
Изучением подземных вод занимается наука гидрогеология. Отметим лишь важнейшие гидрогеологические показатели и условия залегания подземных вод, определяющие использование их водозаборами для водоснабжения.

По условиям залегания (рис .5.1) различают два основных типа подземных вод - безнапорные и напорные. Горизонты безнапорных вод не имеют сплошного непроницаемого покрытия. В таких горизонтах устанавливается свободный уровень воды, глубина которого соответствует поверхности водоносных пород.

Воды первого от поверхности сплошного водоносного горизонта называются грунтовыми. Линзообразные скопления воды на водоупорах или слабопроницаемых

слоях, имеющие локальное распространение, образуют верховодку, которая расположена над грунтовыми водами.

Грунтовые воды - это, как правило, воды безнапорные, хотя на отдельных участках могут приобретать местный напор; залегают они обычно на небольшой глубине и поэтому подвергаются воздействию гидрометеорологических факторов. В зависимости от сезона, количества осадков и температуры изменяются как уровень грунтовых вод, так и их химический состав.



**Рис. 5.1. Схема условий залегания подземных вод**

*А* - верховодка; *Б* - грунтовые воды; *В* - безнапорные межпластовые воды; *Г* - напорные воды; *1* - проницаемые породы; *2* - водоупорные породы; *3* - буровая скважина; *4* - уровень воды (*а* - свободный, *б* - пьезометрический); *5* - источник

Питание грунтовых вод происходит посредством инфильтрации атмосферных осадков и речных вод, а в некоторых случаях за счет поступления напорных вод из нижележащих горизонтов. Вследствие неглубокого залегания и отсутствия водоупорных покрытий грунтовые воды могут легко подвергаться загрязнению. Условия залегания этих вод очень разнообразны.

Напорные воды заключены между водонепроницаемыми слоями. В буровой скважине, вскрывшей напорный водоносный горизонт, вода поднимается выше кровли этого горизонта. Если напорный (пьезометрический) уровень расположен над поверхностью земли, то скважина фонтанирует. Поэтому для получения самоизливающей воды скважины необходимо бурить на участках с пониженным рельефом.

Проницаемый пласт, ограниченный двумя водоупорами, может не быть заполнен водой. При этом образуются полунапорные или безнапорные межпластовые воды. Напорные воды зачастую называют артезианскими, независимо от того, изливаются эти воды на поверхность или нет.

Водоносный горизонт является напорным, если он имеет область питания, расположенную на более высоких отметках, чем водоупорная кровля этого горизонта.

При откачке воды из скважины вокруг нее образуется депрессионная воронка. В безнапорных водах эта воронка отражает понижение уровня воды вокруг скважины, осушение части водоносного горизонта. В напорном горизонте образуется депрессия пьезометрической поверхности - снижение давления в определенной зоне вокруг скважины.

Артезианские воды залегают обычно на более или менее значительной глубине. От поверхности они изолированы водоупорными слоями и поэтому менее подвержены загрязнению, чем грунтовые воды. Оценивая возможность использования подземных вод, определяют их естественные и эксплуатационные запасы. Под естественными запасами подземных вод подразумевается количество подземных вод, находящихся в водоносных породах, не нарушенных эксплуатацией водозаборных сооружений; под эксплуатационными - их расход, который может быть получен на месторождении с помощью рациональных в технико-экономическом отношении водозаборных сооружений при заданном режиме эксплуатации и при качестве воды, удовлетворяющем требованиям потребителей в течение расчетного срока водопотребления. Они составляют часть естественных запасов.

Эксплуатационные запасы подземных вод при проектировании водозаборных сооружений подсчитывают по результатам проведенных на месторождении- детальных гидрогеологических работ. При эксплуатации водоносного горизонта нарушается естественный режим и баланс подземных вод, вследствие чего в области отбора воды возникает зона пониженного давления, и таким образом создаются благоприятные условия для вовлечения в данный эксплуатируемый водоносный горизонт дополнительных ресурсов: переток воды из смежных водоносных пластов, разделенных слабопроницаемыми слоями, инфильтрация атмосферных осадков, фильтрация из поверхностных водотоков и водоемов, искусственное регулирование режима подземных вод и др. В зависимости от степени разведанности эксплуатационных запасов, сложности гидрогеологических и гидрохимических условий однородность фильтрационных свойств водовмещающих пород устанавливают категорию подземных вод.

## **15.2. ТИПЫ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД. УСЛОВИЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ**

Выбор типа и схемы размещения водозаборных сооружений производят исходя из геологических, гидрогеологических и санитарных условий района, а также технико-экономических соображений. Водозаборы подземных вод строят как из отдельных сооружений (каптажных) для получения подземных вод, так и из их системы (водозаборов). Одно каптажное сооружение также можно назвать водозабором.

Водозаборные скважины и шахтные колодцы широко применяются при эксплуатации как безнапорных, так и напорных подземных вод. Шахтные колодцы используют чаще при небольших объемах потребления и глубине залегания подземных вод до 20- 30 м. Эффективное использование водозаборных скважин возможно при глубине подошвы водоносного слоя более 8-10 м и при минимальной его мощности 1-2 м. Эффективность их использования возрастает с глубиной залегания вод; при этажном залегании водоносных горизонтов, когда один или несколько из них являются источниками водоснабжения, скважины становятся незаменимыми.

Горизонтальные водозаборы могут применяться при неглубоком залегании водоносного пласта небольшой мощности. Зачастую их использование позволяет добиться более высокого эффекта в заборе воды, чем использование вертикальных водозаборов. Горизонтальные водозаборы в виде дренажных труб и галерей, применяемые для захвата грунтовых вод, укладывают в вырытые каналы и располагают на глубине не более 5-8 м. Горизонтальные лучевые водозаборы пробуривают из центральной шахты - камеры и чаще применяют для захвата грунтовых вод, а в последнее время - и для захвата напорных вод на глубине 20-30 м. Горизонтальные водозаборы в виде штолен и кяризов устраивают при глубинах залегания воды до 20 м, а иногда и больше. Кяризы представляют собой древний способ каптажа подземных вод. В настоящее время они не сооружаются, но ранее выполненные эксплуатируются и ремонтируются (Закавказье и юг Средней Азии). Каптажные сооружения предназначены для приема воды из восходящих и нисходящих источников (ключей, родников). В зависимости от условий выхода на поверхность земли из водоносного горизонта каптажи могут иметь различную конструкцию: в виде дренажных труб со сборным колодцем и камерой, одной каптажной камеры, а иногда в виде шахты с отводной трубой. Такие сооружения на территории России встречаются сравнительно редко.

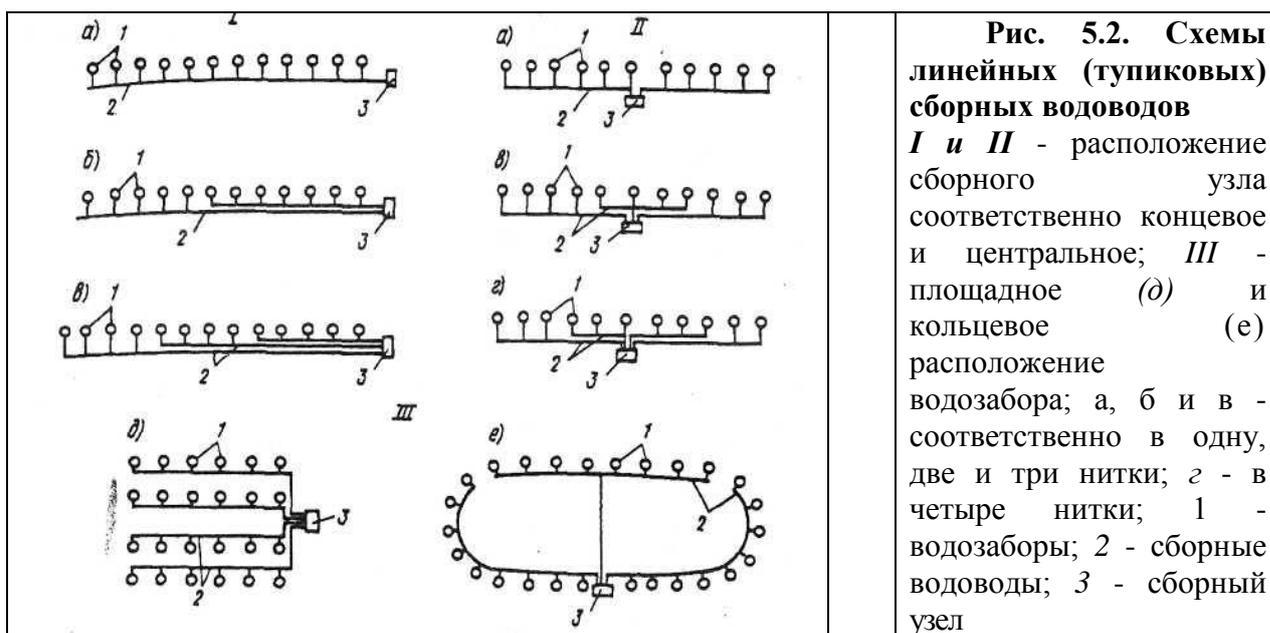
## **15.3. ЗАБОР ПОДЗЕМНЫХ ВОД С ПОМОЩЬЮ БУРОВЫХ СКВАЖИН**

Забор подземных вод с помощью буровых скважин является наиболее распространенным способом в практике водоснабжения, так как отличается универсальностью

и техническим совершенством. Он используется в широком диапазоне глубин залегания подземных вод.

Вода из водозаборов по сборным водоводам транспортируется до резервуаров либо до магистральных водоводов или до внутриплощадочных сетей потребителя. Водоводы могут также объединяться с внутриплощадочной сетью водопровода; по гидравлическому режиму они могут быть напорными, самотечными и самотечно-напорными.

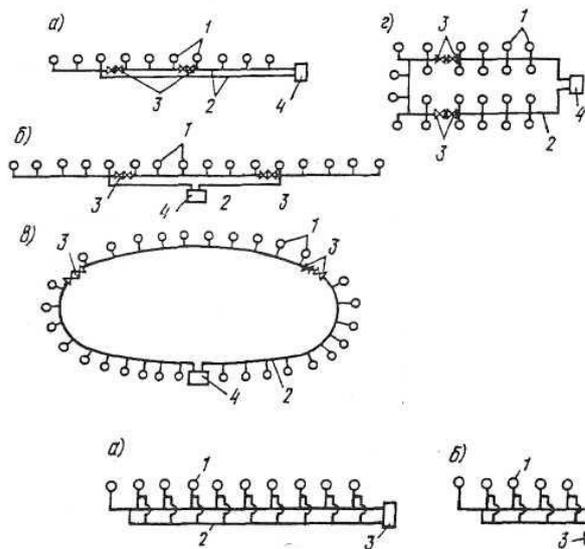
В схемах сифонного водозабора используются водоводы особого вида - сифонные сборные. Схемы сборных водоводов в плане весьма разнообразны (линейные (тупиковые), кольцевые и парные), так как зависят от размещения водозаборов, сборных резервуаров, категории надежности подачи воды и т.п. Наиболее распространены линейные схемы водоводов, которые проектируются в одну или несколько ниток (рис. 5.2). Возможны кольцевые (рис. 5.3) и парные схемы (рис. 5.4) расположения сборных водоводов.



Выбор схемы производят на основании технико-экономического сравнения вариантов.

При большой длине сборных водоводов и большом числе скважин иногда целесообразно подключать водоводы к нескольким сборным резервуарам (в зависимости от места расположения потребителей воды по отношению к створу водозабора).

Схема транспортирования воды зависит от способа ее получения. Наибольшее распространение получили напорные сборные водоводы, что вызвано использованием скважинных систем, оборудованных погружными насосами. Самотечные системы сборных водоводов применяются при заборе воды из каптажей, самоизливающихся скважин, а также из скважин, оборудованных насосными установками или эрлифтами. Преимущество этих систем заключается в возможности использования безнапорных труб. При подаче воды из водосборных сооружений в самотечную сеть работа каждой насосной станции не зависит от работы других и может быть отрегулирована без учета их взаимодействия.



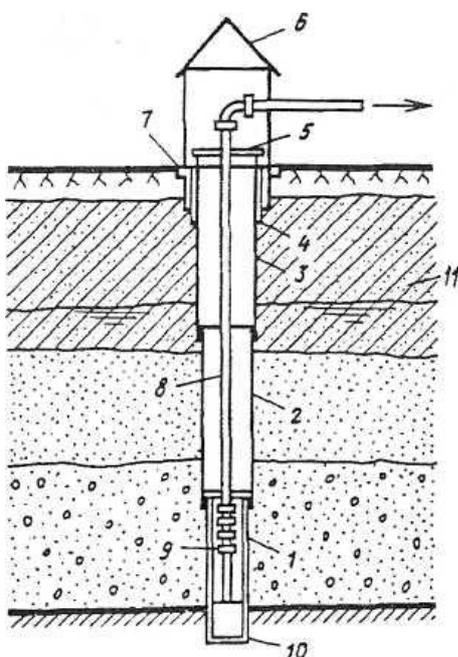
**Рис. 5.3. Схемы кольцевых сборных водоводов**

*а и б* - расположение сборного узла соответственно концевое и центральное; кольцевое (*в*) и площадное (*г*) расположение водозабора; / - водозаборы; 2 - сборные водоводы; 3 - задвижки; 4 - сборный узел

**Рис. 5.4. Схемы парных сборных водоводов**

*а и б* - расположение сборного узла соответственно кольцевое и центральное; / - водозаборы; 2 - сборные водоводы; 3 - сборный узел

Водозаборная скважина в соответствии с требованиями бурения и геологии (рис. 5.5) имеет телескопическую конструкцию. Самая нижняя часть скважины служит отстойником. Над отстойником находится водоприемная часть скважины - фильтр, через который вода из водоносного пласта попадает в ее рабочую зону. Выше водоприемной части скважины располагаются колонны эксплуатационных и обсадных труб, которые, с одной стороны, удерживают стенки скважины от обрушения, а с другой - служат для размещения в них водоподъемных труб и насосов. Над эксплуатационной колонной находится кондуктор, который задает направление проходящей через него трубы при бурении. Вокруг кондуктора устраивается цементный или глиняный замок, защищающий водоносный горизонт от загрязнений, попадающих с поверхности через затрубное пространство обсадных труб. Верхняя часть скважин называется устьем или оголовком. Оголовок в зависимости от заглубления может располагаться как в павильоне, так и в колодце, где находится механическое и электрическое оборудование.



**Рис. 5.5. Водозаборная скважина**

1 - фильтр скважины; 2 - эксплуатационная колонна; 3 - колонна обсадных труб; 4 - кондуктор; 5 - устье скважины (оголовок); 6 - павильон; 7 - цементный или глиняный замок; 8 - насосные (водоподъемные) трубы; 9 - насос с погружным электродвигателем; 10 - отстойник; // - статический уровень воды

Организация буровых скважин зависит от вида водоносных горизонтов, глубины их залегания, вида пробуриваемых пород, их агрессивности, диаметра скважины и способа бурения. В практике сооружения скважин на воду получили распространение следующие способы бурения: вращательный с прямой промывкой, вращательный с обратной промывкой, вращательный с продувкой воздухом, ударно-канатный, реактивно-турбинный и комбинированный.

Ударно-канатный способ применяют при бурении скважин на глубину до 150 м в рыхлых и скальных породах и начальном диаметре скважины более 500 мм. Стенки скважин крепят трубами непрерывно по мере углубления забоя.

Вращательное бурение по характеру углубления подразделяется на бурение кольцевыми и сплошными забоями. Бурение кольцевым забоем называется колонковым, сплошным - роторным. Колонковый способ применяется в скальных породах при диаметре скважин до 150-200 мм при глубине бурения до 150 м. Для бурения скважин больших диаметров и глубиной более 500-1000 м рекомендуется реактивно-турбинный способ. Комбинированный способ (ударно-канатный и роторный) используется для бурения скважин глубиной более 150 м при безнапорных и слабонапорных водоносных горизонтах, представленных рыхлыми отложениями. Способ промывки зависит от вида проходимых грунтов. В качестве промывных растворов используются вода и глинистые растворы.

При выборе способа бурения учитываются не только технологичность метода и скорость проходки, но и обеспечение условий, гарантирующих минимальную деформацию пород в призабойной зоне.

Скважина должна обеспечивать долговечность и защищенность эксплуатационного водоносного горизонта от проникновения загрязнений с поверхности земли и притока воды из вышележащих водоносных горизонтов. Простейшая схема конструкции буровой приведена на рис. 5.6. Скважина крепится обсадными трубами 1. Труба опускается до верха границы залегания водоносных пород б. В обсадную трубу опускается труба меньшего диаметра 2, которая заглубляется в подстилающий водонепроницаемый слой. Затем в трубу 2 при помощи штанги со специальным замком 4 опускается фильтр 3, после чего труба 2 удаляется, зазор 5 между стенками фильтровой и обсадной труб герметизируется. При большой глубине скважины (в зависимости от способа бурения) достичь требуемой отметки обсадной трубой одного диаметра не удастся. В этом случае в обсадную трубу диаметром  $d_1$  (рис. 5.7, а),

достигшую глубины  $h_1$  опускается другая труба меньшего диаметра  $d_2$ , которая заглубляется на глубину  $h_2$ . Заглубление трубы определяют исходя из сопротивления пород ее продвижению и технологических соображений. Путь, пройденный колонной обсадных труб одного диаметра, называется выходом колонны. Дальнейшее углубление скважины достигается с помощью обсадных труб меньшего диаметра  $d$  и т.д. Разница между диаметрами предыдущей и последующей колонн обсадных труб должна быть не менее 50 мм. Выход колонны зависит от гранулометрического состава породы и способа бурения. При ударно-канатном способе он составляет 30-50 м и лишь для устойчивых пород может достичь 70-100 м. При роторном бурении выход увеличивается до 300-500 м, что значительно упрощает конструкцию скважины, сокращает расход труб и ускоряет процесс бурения.

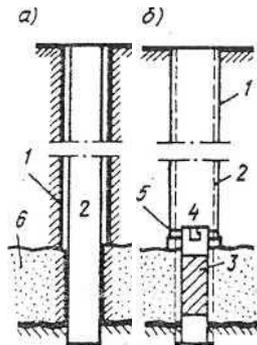


Рис. 5.6. Схема буровой скважины при малых глубинах а - до установки фильтра: б - после его установки

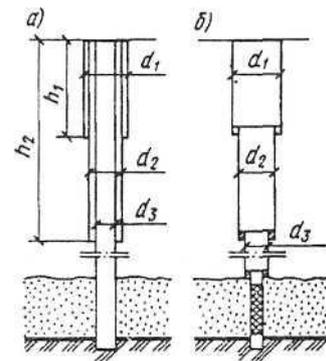


Рис. 5.7. Схема буровой скважины при больших глубинах

При телескопическом устройстве скважины с целью экономии обсадных труб производится обрезка внутренних колонн труб (см. рис. 5.7,б). Верхний обрез обсадной трубы, остающейся в скважине, должен находиться выше башмака предыдущей колонны не менее чем на 3 м. Кольцевой зазор между оставшейся частью колонны вырезанных труб и предыдущей колонной обсадных труб цементируют либо заделывают, устраивая сальник.

При прохождении скважиной двух водоносных горизонтов верхний, который не эксплуатируется, необходимо перекрыть глухой колонной, при этом она должна быть заглублена в водоупор. Конструкции скважин отличаются большим разнообразием.

Для крепления скважин применяют обсадные стальные муфтовые и электросварные трубы, для скважин глубиной до 250 м - иногда асбестоцементные трубы высокой марки.

Для подъема воды из скважин используют водоподъемное оборудование различных типов. Насосные установки типа ЭЦВ применяют для оборудования скважин глубиной 10-700 м и более. Они могут работать в искривленных скважинах при разнообразных гидрогеологических условиях. Насосные установки с трансмиссионным валом применяют для скважин глубиной до 120 м, они могут работать только в вертикальных скважинах. Воду при расчетном динамическом уровне не более 5-6 м от поверхности земли можно забирать горизонтальными насосами. Для подъема воды из скважин используют эрлифты, позволяющие поднимать воду из искривленных скважин, а также воду, содержащую механические примеси в количествах, превышающих пределы, установленные для насосов других типов.

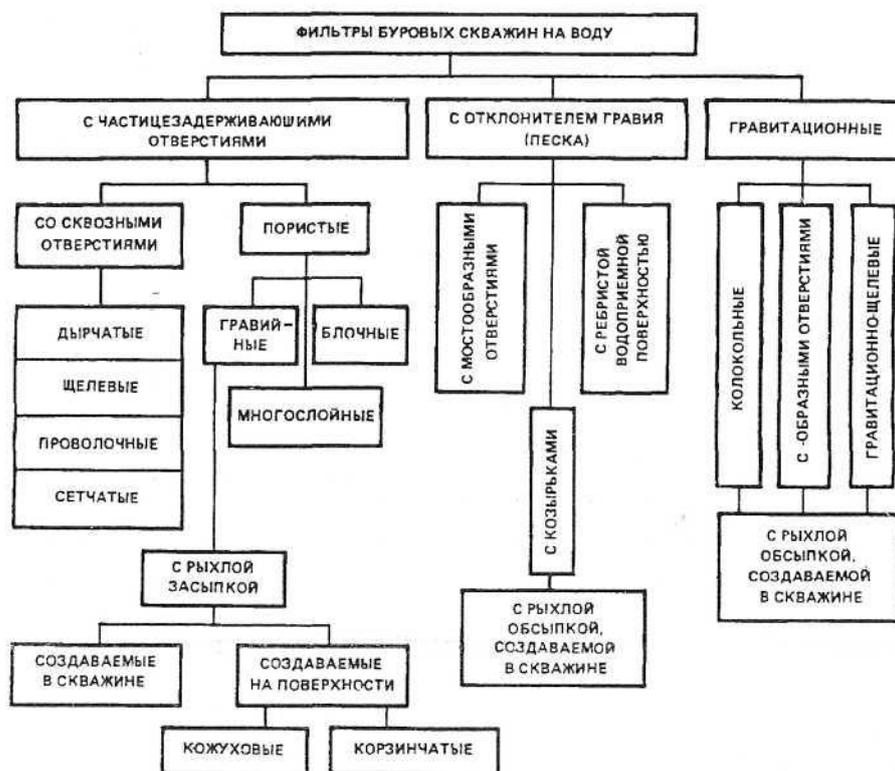
Над устьем водозаборных скважин строят павильоны для размещения оголовка скважины, электродвигателя, горизонтального центробежного насоса, приборов пусковой и контрольно-измерительной аппаратуры и приборов автоматики. Кроме того,

в них располагают части напорного трубопровода, оборудованного затворами, обратным клапаном, вантузом, пробоотборным краном. Каждую скважину оборудуют расходомером.

Павильоны над скважинами могут быть подземного и наземного типа. Подземные павильоны строят обычно в сухих грунтах. Для сокращения строительных объемов их выполняют двухкамерными и виде водопроводных колодцев.

Если водозаборные скважины располагаются в местах, затапливаемых паводковыми водами пойменных рек, то павильон строят на подсыпке или под защитой дамб обвалования высотой, превышающей максимальный паводковый горизонт. Фильтры во многом определяют надежность работы водозаборного сооружения, так как должны обеспечивать свободный доступ воды в скважину, устойчивую работу скважин в течение длительного времени, защищать от пескования при минимальных гидравлических потерях, а в случае кольматажа его поверхности допускать возможность проведения восстановительных мероприятий. Кроме того, они должны обладать устойчивостью против химической и электрохимической коррозии.

Основные потери напора в фильтре приходятся на водоприемную поверхность (каркас) и гравийную обсыпку (водовмещающую породу). Фильтры можно классифицировать так, как показано на рис. 5.8.



**Рис. 5.8. Классификация фильтров водозаборных скважин**

Фильтр состоит из рабочей (водоприемной) части, надфильтровых труб и отстойника. Длина надфильтровых труб зависит от конструкции скважины. Если фильтр располагается на колонне, то надфильтровых трубы являются ее продолжением. При меньшем диаметре надфильтровых трубы входят внутрь эксплуатационной колонны не менее чем на 3 м при глубине скважины до 50 м и не менее чем на 5 м при большей глубине. В зазор, образовавшийся между ними, устанавливается сальник из резины, пеньки, цемента и др. При определенных условиях роль сальника выполняет слой гравия, засыпанного между эксплуатационной колонной и фильтром. Высота отстойников в фильтрах, как правило, принимается равной 0,5-2 м.

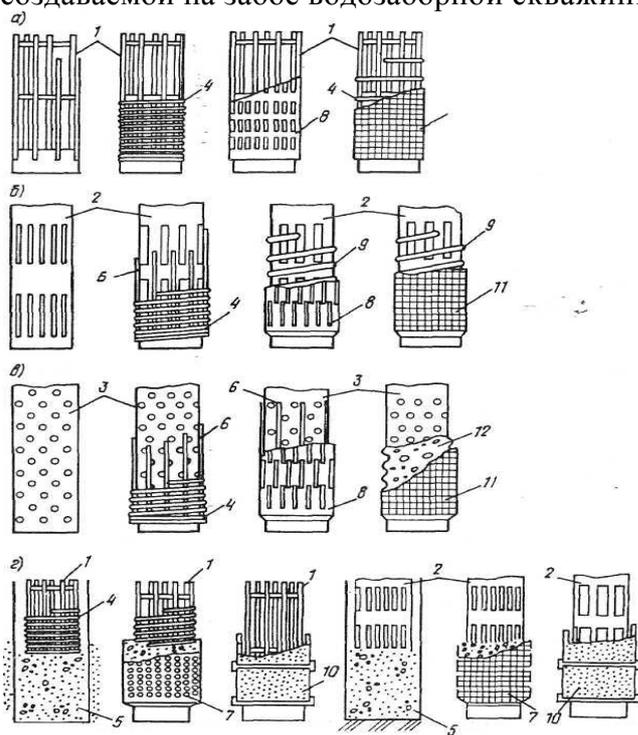
Наибольшее распространение нашли частицезадерживающие фильтры, которые включают фильтры-каркасы и фильтры с дополнительной водоприемной поверхностью. В этих конструкциях эффект предотвращения пескования достигается подбором размера отверстия в корпусе фильтра относительно размера частиц водоносных пород или гравийной обсыпки.

Фильтры с отклонителем гравия характеризуются наличием таких элементов водоприемной поверхности, при которых исключается прямое наложение водоносных пород или гравийных частиц на фильтр.

В гравитационных фильтрах устраивают широкие водоприемные отверстия, в которых грунт удерживается от выноса под действием силы тяжести.

Основными элементами фильтра являются опорный каркас и водоприемная поверхность. Каркас обеспечивает необходимую механическую прочность и служит поддерживающей конструкцией для фильтрующей поверхности. СНиП «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» рекомендует следующие типы каркасов: стержневые, трубчатые с круглой и щелевой перфорацией, штампованные из стального листа. В качестве фильтрующей поверхности применяют проволочную обмотку, штампованный лист, штампованный лист с одно- или двухслойной песчано-гравийной обсыпкой, сетки квадратного и галунного плетения. При заборе небольших количеств воды МОГУТ применяться фильтры из пористого бетона (так называемые пористые).

Конструкции фильтров приведены на рис. 5.9. Все охарактеризованные в классификации фильтры можно применять с контуром рыхлой гравийной обсыпки, создаваемой на забое водозаборной скважины.



**Рис. 5.9. Основные схемы конструкций фильтров водозаборных скважин**

а, б и в - на основе стержневых каркасов, трубчатых каркасов со щелевой перфорацией и трубчатых каркасов с круглой перфорацией; 1 - стержневой каркас на опорных кольцах; 2 - щелевой трубчатый каркас; 3 - трубчатый каркас с круглой перфорацией; 4 - проволочная обмотка из нержавеющей стали; 5 - рыхлая обсыпка; 6 - опорные проволочные стержни под проволочную обмотку и лист; 7 - гравийная обсыпка в кожухе; 8 - лист, штампованный из нержавеющей стали; 9 - опорная проволочная спираль; 10 - гравийный блок; 11 - сетка из нержавеющей стали или латуни; 12 - сетка подкладная, синтетическая

Применение фильтров на стержневых каркасах позволяет снизить расход металла. Они обладают хорошими гидравлическими свойствами и обеспечивают эффективную работу скважин при длительной эксплуатации в водах неустойчивого химического состава, когда возникает опасность зарастания железистыми и карбонатными отложениями. Они рекомендуются к применению в скважинах глубиной до 200 м. При больших глубинах скважин предпочтение отдают фильтрам из стальных труб. Фильтры щелевые, штампованные из листа, с антикоррозионной защитой могут устанавливаться в скважинах глубиной до 100 м.

Для мелких и пылеватых водоносных песков рекомендуются многослойные проволочные и стеклопластиковые фильтры.

Фильтры, рассчитанные на длительный срок эксплуатации, должны иметь фильтрующую поверхность, не подверженную коррозионному разрушению. Степень химической коррозии фильтров зависит от содержания в воде веществ, обуславливающих растворение металлов:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Для антикоррозионной защиты в отечественной и зарубежной практике применяют следующие синтетические покрытия: полиэтиленовые, наносимые напылением; эмалевые; этиленовые; резиновые, полиамидные и другие более стойкие по сравнению с металлическими покрытиями, наносимыми гальваническим способом.

Для обеспечения длительной и устойчивой эксплуатации скважины применение сеток и проволочных обмоток из нелегированной стали нецелесообразно. Наиболее эффективными фильтрами в этом отношении являются фильтры с песчаногравийной обсыпкой. Кроме того, можно использовать фильтры из нержавеющей стали, пластмассы и других стойких и обладающих достаточной прочностью материалов. Если водоносный пласт состоит из устойчивых скальных или полускальных пород, то скважины зачастую устраивают без фильтров.

Диаметр фильтров определяют исходя из дебита скважины, параметров водоподъемного оборудования и скорости движения воды в водоподъемных трубах, которая принимается не более 1,5- 2.0 м/с.

Минимальный диаметр фильтра принимают равным 100- 150 мм с учетом возможности проведения ремонта. Фильтр устанавливают на расстоянии не менее 0.5 - 1 м от кровли и подошвы пласта.

При наличии нескольких водоносных горизонтов фильтры устанавливают в каждом горизонте и соединяют их трубами, перекрывающими отдельные водоупоры и слабопроницаемые грунты.

Длина фильтра зависит от дебита скважины, изменения водопроницаемости пород и гидрохимических условий.

В безнапорных водоносных пластах длину фильтра определяют с учетом понижения динамического уровня в скважине. В этом случае за мощность пласта  $m$  принимают величину  $h_e - S_0/2$ , где  $h_e$  - первоначальная мощность безнапорного пласта;  $S_0$  - проектное понижение уровня воды в скважине. Размеры отверстий фильтров без устройства гравийной обсыпки зависят от однородности и крупности зерен частиц водоносного пласта (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Тип фильтра	Рекомендуемые размеры отверстий фильтров в породах	
	однородных $k_n \leq 2$	неоднородных $k_n > 2$
С круглой перфорацией	$2,5-3d_{50}$	$3-4d_{50}$
Сетчатый	$1,5-2d_{50}$	$2-2,5d_{50}$
С щелевой перфорацией	$1,24-1d_{50}$	$1,5-2d_{50}$
Проволочный	$1,25d_{50}$	$1,5d_{50}$

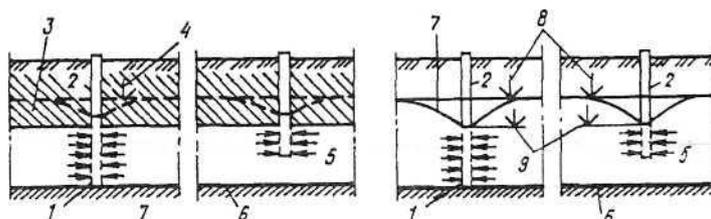
В табл. 5.1  $k_n = d_{60}/d_{10}$ , где  $d_{10}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$  - размеры частиц, меньше которых в водоносном пласте содержится соответственно 10; 50 и 60 %. Меньшие значения  $k_n$  относятся к мелкозернистым породам, большие - к крупнозернистым.

Скважность трубчатых фильтров (отношение суммарной площади всех щелей к поверхности всего фильтра) с круглой или щелевой перфорацией 20-25 % для фильтров с проволочной обмоткой или из штампованного листа не должна превышать 30- 60 %.

В гравийных фильтрах в качестве обсыпки применяют песок, гравий и песчано-гравийную смесь. Размер проходных отверстий фильтра принимают равным среднему диаметру частиц слоя обсыпки, примыкающего к его стенкам. Подбор механического состава обсыпки производят из соотношения  $D/d_{50} = 8-12$ , где  $D_{50}$  - диаметр частиц, меньше которого в обсыпке содержится 50 %. Толщину каждого слоя обсыпки гравийных фильтров принимают не менее 30 мм, если фильтры собирают на поверхности, и не менее 50 мм, если их создают в забое скважины. При устройстве двух- и трехслойных гравийных фильтров подбор механического состава материала обсыпок производится из соотношения  $D_2/D_1 = 4-6$ , где  $D_1$ , и  $D_2$  - средние диаметры частиц материала соседних слоев обсыпки. Выбирая гравийный материал фильтров, необходимо выдерживать отношение: для блочных из пористого бетона или пористой керамики  $D_{cp}/d_{50} = 10-16$ ; для клеевых  $D_{cp}/d_{50} = 8-12$ , где  $D_{cp}$  - средний диаметр частиц гравия в блоке фильтра. Для исключения заражения подземных вод материал, применяемый для обсыпки фильтров, должен обеззараживаться.

## 15.4. РАСЧЕТ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН

Водозаборные скважины используют для забора как напорных, так и безнапорных подземных вод (рис. 5.10). Различают скважины двух типов: совершенные и несовершенные. Под совершенной понимается такая скважина, которая вскрывает водоносный горизонт до подстилающего водоупорного пласта. Если скважина заканчивается в толще водоносного пласта, то она называется несовершенной. Несовершенства вскрытия бывают двух видов: по степени вскрытия горизонта, которая зависит от соотношения длины фильтра и мощности пласта, и по характеру вскрытия, который зависит от устанавливаемых в пласте конструкций фильтров.



**Рис. 5.10. Типы скважин**

1 - фильтр; 2 - колодец; 3 - водонепроницаемый пласт (кровля); 4 - напорная плоскость; 5 - водоносный пласт; 6 - водоупор; 7 - депрессионная кривая; 8 - статический уровень воды; 9 - уровень воды при откачке

Основная задача проектирования состоит в выборе рационального типа и схемы скважинной системы, т.е. определении оптимального числа скважин, расстояний между ними, их взаимного расположения на местности, конструкций фильтра, диаметров и трассировки трубопроводов, характеристик насосного оборудования с учетом возможного понижения уровня воды в скважинах. Указанные задачи решают на основе гидрогеологических расчетов по определению дебита скважин и понижения уровня воды в процессе эксплуатации, оценке взаимного влияния отдельных скважин при совместной их работе.

Одновременно с решением этих вопросов уточняют схемы расположения водозаборных скважин, их число и тип. При проведении гидрогеологических расчетов в качестве исходной величины принимают дебит, соответствующий заданному водопотреблению, или максимальный дебит, который может быть получен. В обоих случаях расчетами устанавливают размеры водозаборных сооружений (глубину, диаметр), число, расположение и дебит скважин при заданной длительности эксплуатации и максимально допустимых понижениях уровня воды. На основании вариантных гидрогеологических расчетов рассматриваемых схем выбирают оптимальную. Во всех вариантах расчетные понижения уровня сопоставляют с допустимыми. При понижении расчетного уровня больше допустимого дебит скважин не может быть обеспечен. В этом случае необходимо увеличить число скважин или распределить их на небольшой площади. При понижении уровня меньше допустимого дебит скважин может быть увеличен. Если увеличения дебита не требуется, то число скважин должно быть сокращено или уменьшено расстояние между ними. Варьировать можно и схему прокладки водоводов.

Гидрогеологические расчеты водозаборных сооружений проводят на основе законов фильтрации. Рассмотрим общие расчетные зависимости для определения расхода воды водозаборного сооружения. Дебит скважин в водоносных пластах может быть найден по следующим зависимостям:

напорных

$$Q = 2 \Pi km S_{дон}/R; \quad (5.1.)$$

безнапорных

$$Q = 2 \Pi k S_{\text{дон}}(2h_e - S_{\text{дон}})/R \quad (5.2.)$$

- где  $km$  - водопроницаемость эксплуатируемого пласта (здесь  $k$  - коэффициент фильтрации;  $m$  - мощность пласта);  
 $S_{\text{дон}}$  - максимальное допустимое понижение уровня подземных вод;  
 $h_e$  - естественная мощность грунтового потока;  
 $R = R_0 + \beta\zeta$  - фильтрационное сопротивление, зависящее от гидрогеологических условий и типа водозаборного сооружения (здесь  $R_0$  - гидравлическое сопротивление  $R$  в точке расположения скважины;  
 $\zeta$  - дополнительное сопротивление, учитывающее фильтрационное несовершенство скважины;  
 $\beta = Q_o/Q$  - отношение расхода рассматриваемой скважины  $Q_o$  к общему расходу водозабора  $Q$ ).

Величины  $R$ ,  $R_0$  и  $\zeta$  могут быть определены только при той или иной степени детализации гидрогеологической обстановки.

При построении расчетных схем исходят из того, что водоносный пласт (система, комплекс водоносных пластов) как в естественных условиях, так и в условиях эксплуатации водозаборов представляет собой единую физическую область, имеющую определенные внешние границы.

Определению этих условий посвящены фундаментальные работы Ф.М. Бочевера и Н.Н. Веригина. Условия включают в себя геологическое строение, структуру и свойства водоносных пластов, а также источники пополнения запасов подземных вод. Выбор той или иной схемы осуществляют на основании гидрогеологических данных, полученных в результате изысканий, или по аналогу близрасположенных скважин. В соответствии со схемой используют ту или иную расчетную зависимость для вычисления сопротивлений.

В табл. 5.2 приведены некоторые расчетные зависимости для определения гидравлических сопротивлений при работе водозаборов различного типа вблизи совершенных рек в условиях установившейся фильтрации. К совершенным относятся реки значительной ширины без илистого или кольматированного материала, препятствующего фильтрации речных вод в водоносный пласт.

Артезианские бассейны характеризуются этажным строением водяных пластов. Хорошо проницаемые водоносные отложения чередуются с водоупорными и слабопроницаемыми слоями. Для этих бассейнов рассматриваются следующие расчетные схемы: изолированные неограниченные по площади водоносные горизонты и слоистые водоносные горизонты в разрезе. Изолированные неограниченные пласты характеризуются отсутствием внешних источников питания подземных вод. В процессе работы водозаборных сооружений уровень подземных вод непрерывно снижается. Эксплуатация таких водозаборов сопровождается образованием воронок депрессии, которые захватывают обширные площади. В этих условиях следует учитывать возможное влияние проектируемого водозабора на существующие водозаборные сооружения.

Основные расчетные зависимости для определения гидравлических сопротивлений  $R_0$  при работе водозаборов в изолированных неограниченных пластах приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.2

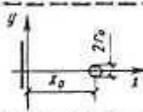
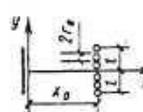
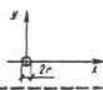
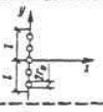
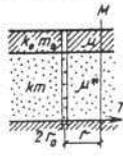
Тип водозабора	Схема пласта	Сопротивление
Скважина		$R_0 = \ln \frac{2x_0}{n}$
Линейный ряд		$R_0 = \pi \frac{x_0}{l} + \frac{1}{n} \ln \frac{1}{\pi r_0 n}$

Таблица 5.3

Тип водозабора	Схема водозабора	Сопротивление
Скважина		$R_0 = \ln \frac{r_{вл}}{r_0}$
Линейный ряд		$R_0 = \ln \frac{2,7r_{вл}}{l} + \frac{1}{n} \ln \frac{l}{\pi r_0 n}$
Кольцевая система		$R_0 = \ln \frac{r_{вл}}{R_н} + \frac{1}{n} \ln \frac{R_н}{\pi r_0}$

Эти зависимости включают условный радиус влияния скважины  $r_e = 1,5\sqrt{at}$ , где  $a = km/m$  - коэффициент пьезопроводности пласта, характеризующий скорость перераспределения напора подземных вод при неустановившемся движении (здесь  $k$  - коэффициент фильтрации, определенный опытным путем;  $m$  - мощность пласта;  $\mu$  - коэффициент водоотдачи напорного пласта;  $t$  - продолжительность понижения подземных вод). Для напорных слабоминерализованных вод, заключенных в хорошо водопроницаемых плотных скальных и полускальных породах,  $a$  обычно составляет  $10^4 - 10^6$  м<sup>2</sup>/сут; в слабопроницаемых мелкозернистых (рыхлых) породах -  $10^3 - 10^5$  м<sup>2</sup>/сут. Наиболее надежно коэффициент пьезопроводности определяется по данным откачек и эксплуатации скважины. В слоистых водоносных пластах запасы подземных вод формируются под влиянием перетекания подземных вод в эксплуатируемый горизонт из соседних питающих пластов через слабопроницаемые отдельные слои в кровле или подошве горизонта. Режим работы этих водозаборов в общем случае неустановившийся. Однако при больших запасах воды в питающих пластах и интенсивном перетекании воды в эксплуатируемый пласт понижение уровней на водозаборе может стабилизироваться. Расчетная зависимость для определения гидравлического сопротивления  $K_0$  в двухслойных пластах приведена в табл. 5.4. Она относится к случаю, когда верхний слой имеет весьма слабую проницаемость ( $k_0 \ll k$ ) содержит воды, имеющие свободную поверхность, и обладает значительной водоотдачей ( $\mu \gg \mu^*$ ). Нижний эксплуатируемый пласт сложен хорошо проницаемыми породами. Эта схема характерна для артезианских водоносных пластов, залегающих на небольшой глубине. Аналогичные зависимости существуют и для других условий залегания подземных вод.

Таблица 5.4

Схема двухслойного пласта	Сопротивление	Примечание
	$R_0 = \ln \frac{r_{\text{вл}}}{r_0}$	$\frac{r^2}{4at} < 0,1; \cdot$ $\frac{k_0 r}{m_0 \mu} > 3 \div 5;$ $r_{\text{вл}} = 1,5\sqrt{a^* r};$ $a^* = \frac{km}{\mu + \mu^*}$

При расчете водозаборов, как указывалось ранее, необходимо, учитывать дополнительное фильтрационное сопротивление  $\xi$  обусловленное степенью вскрытия скважиной водоносного пласта. Численные значения коэффициента  $\xi$  зависят от параметров  $m/r_0$  и  $l_\phi/m$ , где  $m$  - мощность водоносного горизонта;  $r_0$  - радиус скважины;  $l_\phi$  - длина фильтра. Для безнапорных вод  $m \approx h_e - S_0/2$ ,  $l_\phi = I_{\phi,н} - S_0/2$ , здесь  $h_e$  - первоначальная мощность безнапорного потока;  $S_0$  - понижение уровня воды в скважине;  $I_{\phi,н}$  - общая длина незатопленного фильтра. Численные значения сопротивления  $\xi$  приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

$l_\phi/m$	$\xi$ при $m/r_0$							
	3	10	30	100	200	500	1000	2000
0,05	1,2	6,3	17,8	40	47	63	74,5	84,5
0,1	1	5,2	12,2	21,8	27,4	35,1	40,9	46,8
0,3	0,65	2,4	4,6	7,2	8,8	10,9	12,4	14,1
0,5	0,33	1,1	2,1	3,2	3,9	4,8	5,5	6,2
0,7	0,12	0,44	0,84	1,3	1,6	2	2,3	2,6
0,9	0,01	0,06	0,15	0,27	0,34	0,43	0,5	0,58

Допустимое понижение уровня воды в скважине  $S_{\text{дон}}$ , входящее в формулы (5.1) и (5.2), определяется по данным опытных откачек. Приближенно допустимое понижение уровня воды можно определить следующим образом: безнапорных

$$S_{\text{дон}} \approx (0,5 \div 0,7)h_e - \Delta h_e - \Delta h_\phi;$$

напорных

$$S_{\text{дон}} \approx H_e - [(0,3 \div 0,5)m + \Delta H_{\text{нас}} + \Delta H_\phi],$$

где  $h_e$  и  $H_e$  - соответственно первоначальная глубина воды до водоупора (в безнапорных горизонтах) и напор над подошвой горизонта (в напорных пластах);

$\Delta h_{\text{нас}}$  и  $\Delta H_{\text{нас}}$  - максимальная глубина погружения насосов (нижней его кромки под динамический уровень в скважине);

$\Delta h_\phi$  и  $\Delta H_\phi$  - потери напора на входе в скважину;  $m$  – мощность напорного пласта.

## 15.5. КОМПЛЕКСНЫЕ РАСЧЕТЫ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Водозаборные скважины, объединенные между собой сборными водоводами, представляют единую гидравлическую систему. При эксплуатации таких систем четко прослеживается взаимосвязь между изменением дебита скважин (и водозабора в целом) при изменении гидродинамического режима подземных вод, а также гидравлических параметров отдельных сооружений. Поэтому уже на стадии разработки проекта следует оценивать работоспособность системы. Такая оценка производится на основе комплексных расчетов водозаборов подземных вод.

Основной задачей комплексного расчета водозаборов подземных вод является определение истинных значений расходов скважин и понижений в них уровня воды, а также расходов и потерь напора в сборных водоводах и параметров работы водоподъемного оборудования. Поэтому такие расчеты следует проводить при различных расчетных режимах и на различные периоды эксплуатации водозаборов (т.е. с учетом сезонных колебаний уровней и сработай запасов подземных вод, кольматажа и выхода скважин из строя, отключения отдельных линий сборных водоводов и т.п.) и на основе этого намечать сроки проведения мероприятий, направленных на поддержание стабильной работы системы.

Исходным материалом для выполнения расчетов водозаборов являются: а) гидрогеологическая расчетная схема расположения водозаборных и инфильтрационных сооружений; б) расчетная схема сбора воды от скважин; в) высотная схема подачи воды потребителю.

**Графо-аналитические методы гидравлического расчета режимов работы одиночных скважин.** При отборе воды из скважины (рис. 5.11) напор насоса  $H$  затрачивается на преодоление геометрической высоты подъема воды  $z$ , понижения уровня  $S$  и потерь напора в водоводе  $\Delta h_g$  от скважины до точки подачи воды. В этом случае насос, установленный в скважине, развивает напор, равный:

$$H = (\nabla_p - \nabla_{ст.гор}) + S + \Delta h_g \quad (5.3)$$

где  $H$  - полная высота подъема воды из скважины;  
 $\nabla_p$  - отметка уровня воды в резервуаре;  
 $\nabla_{ст.гор}$  - отметка статического уровня грунтовых вод;  
-  
 $S$  - понижение уровня в скважине;  
 $\Delta h_g$  - потери напора в водоводе от скважины до резервуара, включая потери напора в водоподъемных трубах.

Разность отметок  $(\nabla_p - \nabla_{ст.гор})$  - это геометрическая высота подъема воды из скважины. Если эти отметки не изменяются, то

$$(\nabla_p - \nabla_{ст.гор}) = const = z.$$

С другой стороны, насос развивает напор в соответствии с его рабочей характеристикой  $Q-H$ , которая в диапазоне оптимальных значений КПД может быть аппроксимирована уравнением вида:

$$H = A - BQ^2, \quad (5.4)$$

где  $A$  и  $B$  - параметры характеристики  $Q-H$  насоса.

Рис. 5.11. Схема  
подачи воды от скважины  
1 - фильтр; 2 - насос.

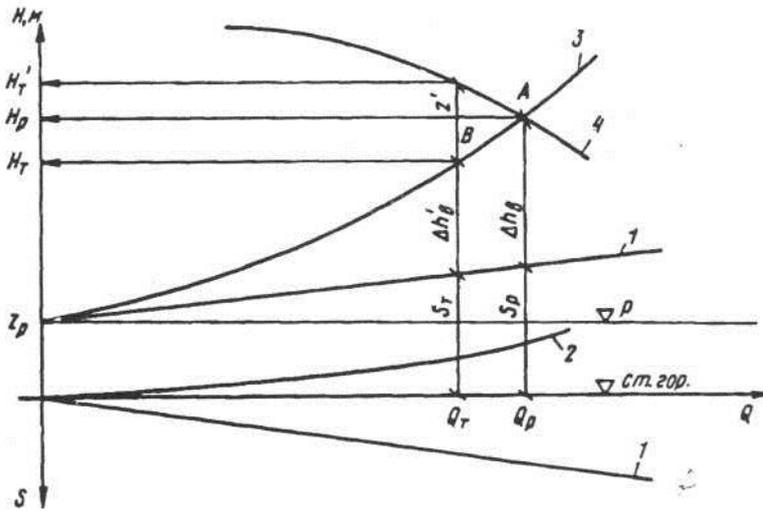
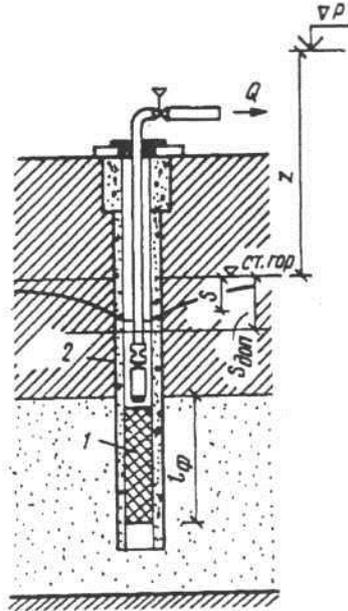


Рис. 5.12.  
Графоаналитический  
метод расчета системы  
«скважина-насос-  
водовод-резервуар»

Подстановка выражения (5.4) в формулу (5.3) и учет зависимости  $S = f(Q)$  и  $\Delta h_g = f(Q)$  дает выражение

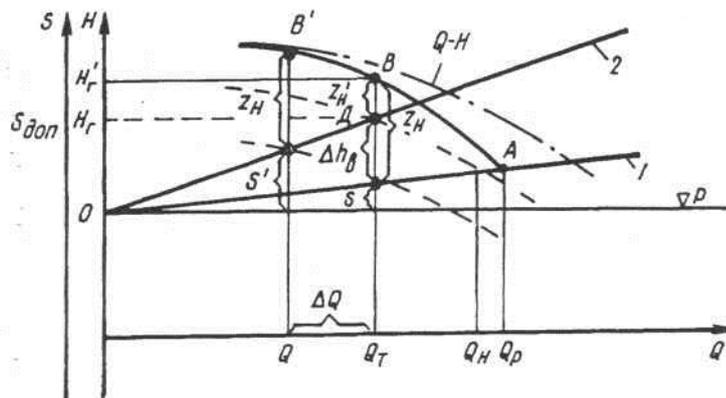
$$z + \frac{Q}{2\pi km} (R + \xi) + l_\phi A_\phi Q^2 = A - BQ^2, \quad (5.5)$$

- где
- $k$  - коэффициент фильтрации;
  - $m$  - мощность водовмещающих пород ( $km$  - коэффициент водопроницаемости пород);
  - $R$  - фильтрационное сопротивление пласта;
  - $\xi$  - фильтрационное сопротивление фильтра скважины;
  - $l_\phi$  - длина водоподъемной трубы от насоса до точки подсоединения скважин к резервуару;
  - $A_\phi$  - удельное сопротивление водовода.

Применительно к одиночным скважинам уравнение (5.5) может быть решено графически. Для этого координаты  $Q - H$  следует расположить таким образом, чтобы точка

$H = 0$  находилась на отметке  $\nabla_{ст.зоп.}$ . Тогда линия  $\nabla_p = const$  на графике (рис. 5.12) определит геометрическую высоту подъема воды из скважины, а линия  $I$  - характеристику скважины  $Q-S$  (характеристика скважины может быть построена как по опытным данным, так и на основе расчетов). Наконец, задаваясь гидравлическим сопротивлением, строят характеристики водовода  $Q - \Delta h_g$  (кривая 2).

При сложении характеристик  $Q-S$  и  $Q-\Delta h_d$  на линии  $\nabla_p = const$  находится совмещенная характеристика (кривая 3) скважины, водовода и резервуара, представляющая собой график зависимости полной высоты подъема воды от дебита скважины.



**Рис. 5.13. Графический метод решения задачи регулирования дебита скважины**

На графике (рис. 5.12) показана также характеристика  $Q-H$  (кривая 4) насоса, который предполагается установить в скважине. Пересечение ее с кривой 3 дает рабочую точку насоса с координатами  $Q_p$  и  $H_p$  (где  $Q_p$  - действительная подача насоса и  $H_p$  - напор, развиваемый насосом при такой подаче воды). Одновременно с этим определены также величины  $S_p$  в скважине и  $\Delta h_g$  в водоводе.

Зачастую из имеющегося сортамента не удастся подобрать насос, рабочая точка которого точно бы соответствовала требуемым значениям  $Q_m$  или  $H_m$  скважины. Поэтому на практике насосы подбирают с некоторым запасом по напору и производят регулирование их подачи. Такое регулирование, как правило, осуществляется с помощью задвижек, установленных на напорной линии; реже - изменением числа рабочих колес насоса.

В том случае, когда подача насосов регулируется установкой дросселя на напорной линии присоединения скважины к водоводу, КПД установки резко снижается и составляет

$$\eta = \eta_y [1 - (z_n / H_n)],$$

- где  $\eta_y$  - КПД установки, снятый с графика  $Q-H$  при заданном  $Q_{насоса}$ ;  
 $H_n$  - напор насоса, соответствующий подаче  $Q$  за вычетом потерь напора  $\Delta h_g$  в водоводе;  
 $z_n$  - величина дросселирования.

Поэтому такой способ регулирования из-за неэкономичности не может быть рекомендован на длительный период, особенно в том случае, когда величины  $z_n$  велики ( $z_n > \Delta H_n$ ), где  $\Delta H_n$  - напор, развиваемый одним рабочим колесом насоса.

При  $z_n > \Delta H_n$  подачу насосных установок следует регулировать изменением числа рабочих колес. Число колес, которые необходимо снять с насоса, определяется выражением  $\bar{n} = z_n / \Delta H_n$  с округлением  $n$  до ближайшего наименьшего целого значения.

В том случае, если  $z_n > \bar{n} \Delta H_n$ , то одновременно с изменением числа рабочих колес для обеспечения заданной подачи насоса устанавливается дроссель на напорной линии. Величина дросселируемого напора при этом составляет

$$z'_n = z_n - \bar{n} \Delta H_n.$$

Пусть по условию требуется обеспечить подачу воды в резервуар в количестве  $Q_T$ , при этом  $Q_T < Q_p$ . Этому расходу на совмещенном графике рис. 5.12 соответствует точка В с координатами  $Q_T$  и  $H_m$ . Фактический напор насоса при подаче воды в количестве  $H_m$  равен  $H^1_m (H^1_m > H_m)$ . Следовательно, дросселируемый напор составляет  $z'_n = H^1_m - H_m$ . На пересечении перпендикуляра, восстановленного из точки В на ось абсцисс, с линиями 1 и 3 лежат искомые значения всех переменных  $z'_n$ ,  $\Delta h'_e$  и  $S_T$  при подаче воды в количестве  $Q_m$ .

При изменении какой-либо из составляющих зависимости (5.5) происходит смещение рабочей точки насоса по характеристике  $Q-H$ . Так, например, сработка запасов подземных вод приводит к увеличению геометрической высоты подъема воды из скважин, т.е. к увеличению напора  $H$  насоса и соответственно уменьшению дебита скважины  $Q$ . Аналогичная картина наблюдается и при увеличении гидравлического сопротивления фильтра скважин, обусловленного кольматажом.

Время  $T_s$ , в течение которого не происходит нарушения условий  $S_p < S_{дон}$  или  $Q_p > Q_T$ , можно считать периодом устойчивой работы скважины. Однако на практике это время, как правило, оказывается меньше расчетного срока действия скважин.

Допустим (рис. 5.13), что характеристика скважины (линия 1) была определена на период ее сооружения, а в процессе эксплуатации скважины гидравлическое сопротивление фильтра возросло, и характеристика стала определяться линией 2. В результате этих изменений рабочая точка насоса сместится из точки В в точку В<sup>1</sup>. При этом (см. рис. 5.13) понижение уровня воды в скважине составит  $S' > S$ , а ее дебит уменьшится на величину  $\Delta Q$ . На рис. 5.13 для наглядности графического построения характеристика  $Q-H$  насоса заменена на так называемую дроссельную характеристику, полученную вычитанием из ординат  $H$  потерь напора в водоводе  $\Delta h_m$ .

Для обеспечения требуемой подачи насосной установки в количестве  $Q_T$  следует уменьшить потери напора на дросселе на величину  $(S' - S)$  и они должны составить  $z'_n = z_n - (S' - S)$ . При этом (как видно из рис. 5.13) понижение уровня воды в скважине увеличивается. Поэтому такой способ регулирования подачи может применяться лишь в течение определенного срока эксплуатации, пока понижение в скважине будет меньше, чем  $S$  (или пока величина

На рис. 5.13 точка Д соответствует условию, когда при  $Q = Q_T$ , ( $z_n > 0$ ), а  $S = S_{дон}$ . При неизменном  $z'_n$  дальнейший рост сопротивления вызовет снижение подачи установки. Вместе с тем, если уменьшить  $z'_n$  до значений, при которых подача воды от скважины составила бы  $Q_T$ , то произойдет увеличение понижения уровня воды в скважине и  $S$  превысит  $S_{дон}$ . Следовательно, характеристика скважины, представленная кривой 2, соответствует условиям, когда фильтр предельно закольматирован и дальнейшая эксплуатация установки без осуществления комплекса мероприятий по восстановлению дебита скважины невозможна.

Регенерацией фильтра скважины удается добиться уменьшения гидравлического сопротивления до значений, близких к начальному. Тогда при дросселируемом напоре  $z'_n$  подача установки составит  $Q_n > Q_T$ , а по мере роста сопротивления подача воды будет снижаться и лишь при достижении предельной закольматованности фильтра скважины окажется равной  $Q_T$ .

Введение в действие систем искусственного пополнения подземных вод (ИППВ) вызывает повышение уровня грунтовых вод, а это, в свою очередь, приводит к увеличению подачи насоса, установленного в скважине. Вместе с тем для обеспечения заданного увеличения подачи также необходимо регулировать работу насоса или производить его замену.

Допустим, что установка ИППВ введена в действие в момент времени  $t = T_s$  (когда фильтр скважины предельно закольматован) и обеспечила повышение уровня на величину  $\Delta S$ . Тогда, основываясь на гидрогеологических расчетах, можно увеличить отбор воды с доведением его до величины  $Q_r$ , равной

$$Q_r = Q + 2 \pi k m \Delta S / (R + \xi), \quad (5.6)$$

где  $R$  - фильтрационное сопротивление водоносного пласта при действии водозаборной скважины;

$\xi$  - где дополнительное сопротивление на несовершенство скважины в момент времени  $T$ .

На рис. 5.14 величина  $Q_2$  является абсциссой точки  $C$ , лежащей на пересечении характеристики скважины (линии 2) и линии  $a - b$  соответствующей  $S_{\text{доп}} + \Delta S$ , где  $\Delta S = Q_0 R_0 / 2 \pi k m$ ,  $R_0$  - фильтрационное сопротивление водоносного пласта при действии установки ИППВ;  $Q_2$  - производительность системы **ИППВ**. Тогда можно найти КПД  $\eta_r$  установки ИППВ в данных условиях:

$$\eta_r = R_0 / (R + \xi). \quad (5.7)$$

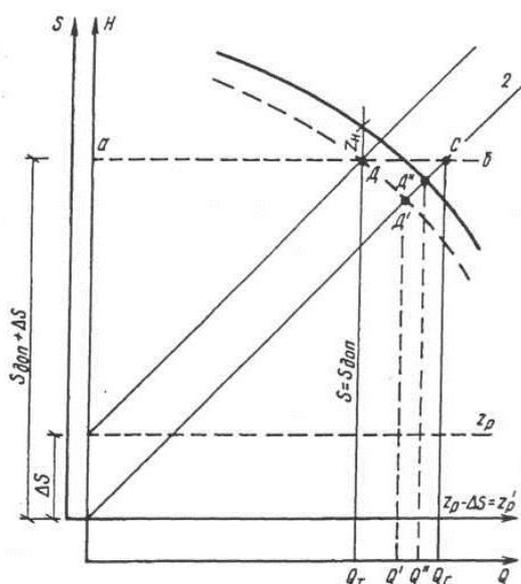


Рис. 5.14. Расчет увеличения дебита скважин при искусственном пополнении подземных вод (ИППВ)

Рассмотрим, какой же будет получен  $\eta$ , если в скважине оставить насос, подобранный без учета работы установки ИППВ (см. рис. 5.13). В этом случае для нахождения новой рабочей точки насоса необходимо от линии  $z'_p = (z_p - \Delta S)$  заново восстановить характеристику скважины до пересечения ее с дроссельной характеристикой

насоса. Эти построения показаны на рис. 5.14. Абсциссой точки  $D'$  определяется расход скважины  $Q'$  с учетом дросселирования напора насоса на величину  $(z'_p)$ , а абсциссой точки  $D''$  - расход скважины  $Q''$  при  $z_p = 0$ . Как видно из рис. 5.14, введение в действие установок ИПШВ без замены водоподъемного оборудования скважин будет всегда приводить к занижению  $\eta$ .

В артезианских бассейнах уровни подземных вод могут находиться на отметках, превышающих отметки подачи воды потребителю. Это позволяет на начальном этапе осуществлять эксплуатацию скважин в режиме самоизлива и лишь по истечении определенного времени переходить на откачку воды насосами.

При расчете таких систем определению подлежат: время, в течение которого скважина может эксплуатироваться в режиме самоизлива с заданной подачей воды потребителю, а также продолжительности периодов ее работы с теми или иными насосами. Характерный график изменения во времени напора при действии артезианской скважины в режиме самоизлива с постоянным расходом  $Q_T$  представлен на рис. 5.15.

Из рис. 5.15 видно, что в течение первых  $t_1$  лет эксплуатации напор на устье скважины находится на отметках выше поверхности земли (линия 0). Поэтому, если вода из скважины подается в резервуар, расположенный на отметке земли, то время  $t = t_1$  определяется продолжительностью работы скважины в режиме самоизлива.

Для обеспечения заданной подачи воды потребителю при  $t > t_1$  в скважине следует устанавливать насосы. Выбор марки насоса должен производиться с учетом дальнейшей сработки запасов подземных вод. Методика подбора насосных установок на различные периоды времени иллюстрируется рис. 5.15, где в координатах  $H - t(S - t)$  представлены графики изменения во времени напора подземных вод, а в координатах  $Q - H$  - дроссельные характеристики насосов с учетом потерь напора в водоподъемных трубах.

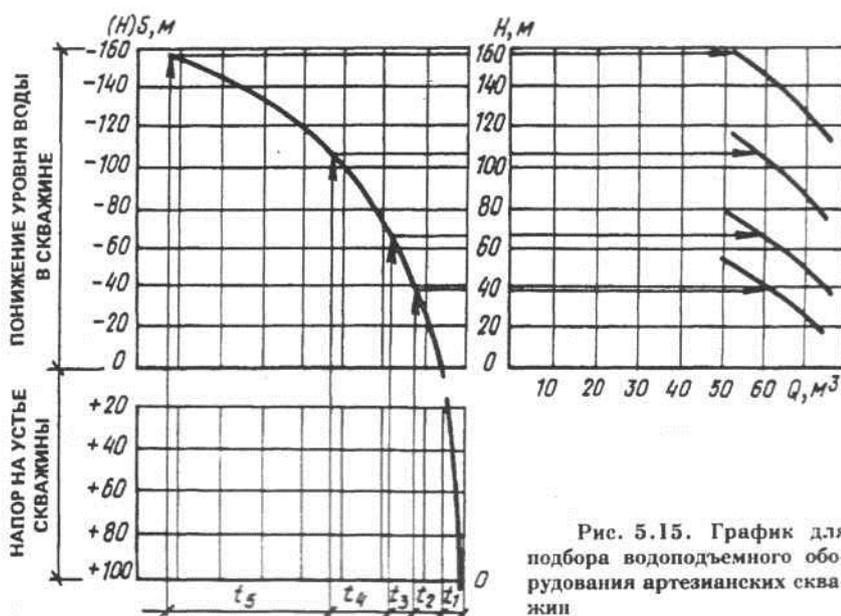


Рис. 5.15. График для подбора водоподъемного оборудования артезианских скважин

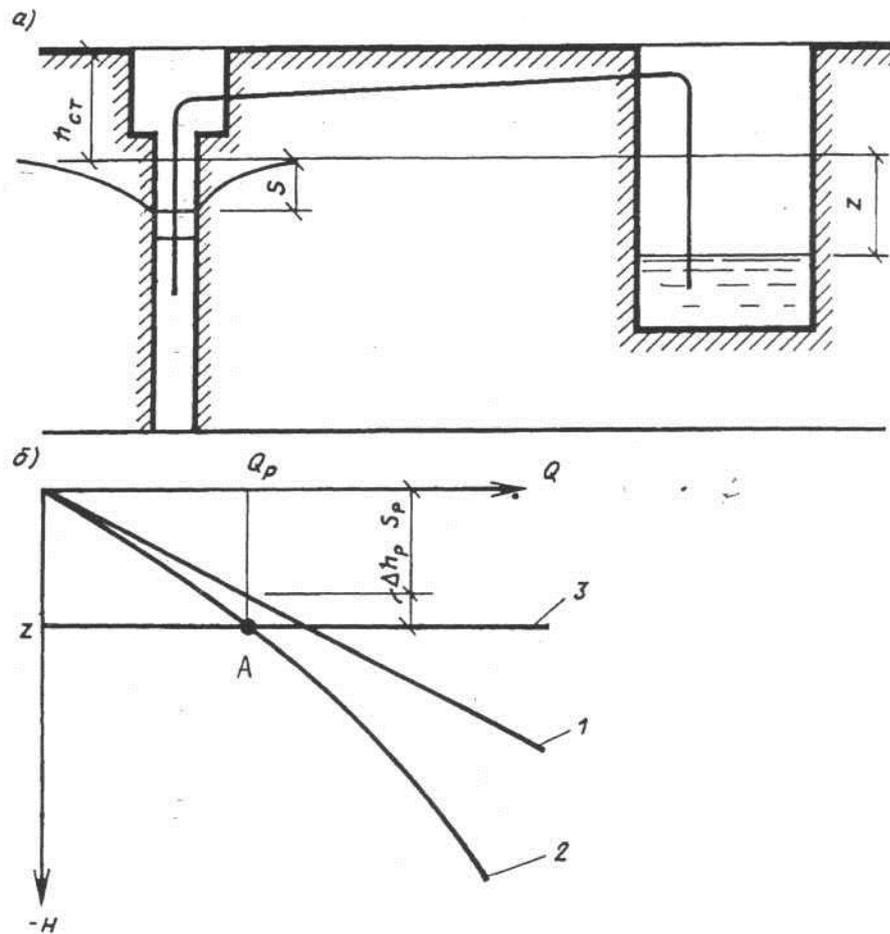


Рис. 5.16. Схемы сифонного водозабора (а) и графоаналитического расчета (б)

Аналогичным образом выполняют расчеты и при сифонном отборе воды из скважин. Например, когда имеется одиночная скважина, от которой вода по сифонному водоводу подается в сборный резервуар (рис. 5.16), графо-аналитические расчеты сводятся к выполнению следующих построений. В координатах  $Q-H$  строится характеристика скважины, т.е. зависимость  $S = f(Q)$ . На рис. 5.16 эта характеристика показана линией 1. Далее к ординатам характеристики скважины прибавляются значения  $\Delta h_g$  (где  $\Delta h_g$  - потери напора в водоводе) и проводится линия. Линия 3 отражает отметку наполнения воды в резервуаре, отсчитанную от статического горизонта. На перпендикуляре, опущенном из точки А до пересечения линий 2 и 3, лежат расчетные значения  $S_p$  и  $\Delta h_p$ , соответствующие расходу  $Q_p$ .

Для аналитических расчетов одиночных скважин необходимо составить математическую модель, которая бы описывала системы в условиях взаимосвязи отдельных элементов. Вернемся к рассмотрению схемы, представленной на рис. 5.11, и сформулируем задачу в следующем виде. Пусть нам требуется определить дебит скважины и понижение в ней уровня воды при условии, что все гидравлические параметры системы известны. Тогда приравняв напор, развиваемый насосом, полной высоте подъема воды, на основании уравнений (5.3) и (5.4) можно записать

$$A - BQ^2 = z + \Delta h_g + S \quad (5.8)$$

где  $\Delta h_g = 1_g A_g Q^2$  - где потери напора в водоподъемных трубах и в водоводе от скважины до резервуара;

$S$  - понижение уровня в скважине.

Для определения  $S$  принимаем известную формулу  $S = \left( \frac{Q}{2\pi km} \right) / R$

где  $k$  - коэффициент фильтрации пласта;  
 $m$  - мощность пласта;  
 $R$  - фильтрационное сопротивление пласта.

После подстановки значений  $\Delta h_g$  и  $S$  в формулу (5.8) и ее решения будем иметь

$$Q = \left( 1/q^2 + 4(z - A)(l_B A_B + B) - 1/q \right)^{1/2} / 2(l_B A_B + B) \quad (5.9)$$

где  $q$  - удельный дебит скважины ( $q = 2 \eta n k m / R$ ).

Таким образом, видно, что при известных параметрах системы по формуле (5.9) не сложно рассчитать дебит скважины (подачу насоса), а зная  $Q$ , далее вычислить  $\Delta h_g$  и напор насоса  $H$ .

Аналогичным образом решается задача и для схемы с сифонным отбором воды из скважины (см. рис. 5.16). Здесь можно выписать следующее уравнение:

$$h_{cm} + S = z_0 + \Delta h_g \quad (5.10)$$

где  $h_{cm}$  - мощность обводненной толщи пород или отметка статического горизонта;  
 $z_0$  - глубина уровня воды в резервуаре.

Находим

$$Q = \frac{\sqrt{1/q + 4l_g A_g (z_0 - h_{cm})} - 1/q}{2l_g A_g} \quad (5.11)$$

Зная  $Q$ , можно определить  $S$ ,  $\Delta h_g$  и при этом рассчитать, какой вакуум потребуется создать в системе.

Расчет систем подачи воды от скважин. Подбор и регулирование режимов работы водоподъемного оборудования. На рис. 5.17 показана простейшая схема водозабора в виде линейного ряда скважин, работающих на один сборный водовод. Напор, требуемый для подачи воды в количестве  $Q_n$  из любой  $n$ -й скважины на заданную отметку составляет

$$H_n = z + S_n + \Delta H_n,$$

где  $S_n$  - понижение уровня воды в любой  $n$ -й скважине, определяемое с учетом действия остальных скважин;  
 $\Delta H_n$  - потери напора в водоводе от  $n$ -й скважины до точки сбора воды.

Потери напора

$$\Delta H_n = l \sum_{i=1}^{n-1} A_i \left( \sum_{j=1}^N Q_j - \sum_{j=1}^{n-1} Q_j \right)^2 + L_0 A_0 \left( \sum_{j=1}^N Q_j \right)^2, \quad (5.12)$$

- где
- $l$  - где расстояние между скважинами;
  - $A_i$  - удельное сопротивление водовода на участках между скважинами;
  - $L_0$  - расстояние от первой скважины до резервуара;
  - $A_0$  - удельное сопротивление водовода на этом участке;
  - $Q_j$  - расходы, подаваемые скважинами.

В скважинах могут быть установлены насосы разных марок. Поэтому исходная система уравнений для расчета  $N$  неизвестных величин  $Q_n$  принимает вид:

$$B_n Q_n + S_n + \Delta H_n - (A_n - z) = \Delta H_n \quad (5.13)$$

для  $n = 1, 2, 3, \dots, N$

Решение нелинейной системы уравнений (5.13) отыскивается методом последовательных приближений. В качестве первого приближения можно принять  $Q_n = Q/N$  (где  $Q$  - проектная мощность водозабора) и, подставив эти значения в уравнение, найти значения  $\Delta h_n$  (где  $\Delta h_n$  - невязки потерь напора по каждому из  $N$  уравнений, возникающие из-за того, что принятые значения  $Q_n$  не удовлетворяют системе уравнений).

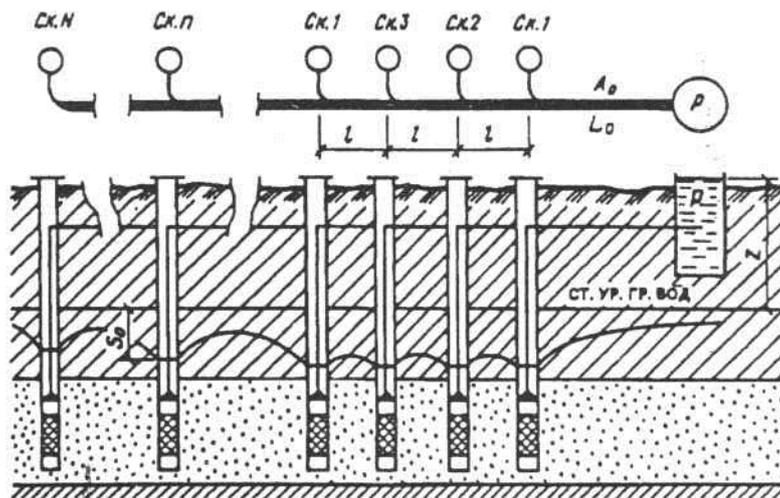


Рис. 5.17. Схема подсоединения скважин линейного ряда к сборному водоводу

Если условие

$$|\Delta h_n| \leq \xi \quad (5.14)$$

где  $\xi$  - заданная точность решения, не выполняется, то значение  $Q_n$  следует изменить на значение  $\Delta Q_n$ .

Поправочный расход  $\Delta Q_n$  для каждого  $n$ -го уравнения может быть приближенно рассчитан по формуле

$$\Delta Q_n = 0.5 \Delta h_n / \left\{ B_n Q_n + l \sum_{i=1}^{n-1} A_i \left( \sum_{j=1}^N Q_j - \sum_{j=1}^{n-1} Q_j \right) + L_0 A_0 \left( \sum_{j=1}^N Q_j \right)^2 + \frac{R + \xi_n}{2\pi km} \right\}$$

и приниматься со знаком (+) или (-), соответствующим знаку невязки  $\Delta h_n$ .

Система уравнений (5.13) считается разрешенной, когда в процессе последовательных приближений найдены такие значения  $Q_n$ , при которых выполняется условие (5.14). После этого вычисляется  $S_n$  по формуле

$$S_n = \frac{Q_n}{2\pi k m} (R_{n\Pi} + \zeta_{n\Pi}) + \sum_{j=1}^n \frac{\nabla Q_j}{2\pi k m} R_{jn} \quad (5.16)$$

где индекс  $\nabla$  указывает на то, что из суммы исключен член  $j = n$ ;  
 $R_{n\Pi}$  - гидравлическое сопротивление скважины, в которой определяется понижение уровня;  
 $R_{j\Pi}$  - гидравлическое сопротивление скважины, воздействующее на рассматриваемую.

Помимо этого определяют напоры насосов

$$H_n = z + S_n + \Delta H_n \quad (5.17)$$

а также расчетные значения расходов и потерь напора в линиях сети.

Найденные в результате проверочного расчета значения  $Q_j$  и  $S_j$  могут не удовлетворить ограничениям вида:

$$\sum_{j=1}^N Q_j \geq Q; S_j \leq S_{дон}; Q_{\min} \leq Q_j \leq Q_{\max} \quad (5.18)$$

где  $Q_{\min}$   $Q_{\max}$  - расходы соответственно минимальный и максимальный установленных в скважинах насосов.

В этом случае необходимо либо заменить насосы в скважинах, где не выполняется второе или третье условие (5.18), либо отрегулировать их работу на требуемый режим эксплуатации. Для этого расчеты водозаборов проводят в следующем порядке. Вначале выполняют гидрогеологические расчеты водозаборных сооружений. При этом в зависимости от того, какая ставится задача (обеспечить максимальную или заданную мощность водозабора), такие расчеты проводят:

а) при действии водозаборных скважин в режиме  $S_j = S_{дон}$

б) при действии водозаборных скважин в режиме  $Q_j = const$  и соблюдении условия

$$\sum_{j=1}^N Q_j = Q_{дон}.$$

в) при комбинированном использовании условий а и б, когда требуется по ряду скважин обеспечить выполнение условий  $S_j = S_{дон}$ , а по остальным  $Q_j = const$ .

В результате гидрогеологических расчетов определяют величины  $Q_j$  в скважинах, действующих в режиме, и в режиме  $S_j = S_{дон}$ , и в режиме  $Q_j = const$ .

По завершении гидрогеологических расчетов проводят гидравлический расчет системы сбора воды от скважин, в результате которого устанавливают расходы и потери напора в линиях сети, а также свободные напоры в точках присоединения скважин к сборным водоводам.

По известным значениям понижений уровня воды в скважинах и напорам рассчитывают требуемые напоры и подбирают насосы (а при необходимости и регулируют их на заданную подачу воды из каждой скважины).

При выполнении расчетов в такой последовательности производительность водоподъемного оборудования будет в точности соответствовать намеченному режиму работы скважин. При решении подобных задач следует ориентироваться на использование ЭВМ.

**Пример расчета.** Водозабор размещается в пойме реки и представлен шестью водозаборными скважинами (см. рис. 5.17) и инфильтрационным бассейном. Скважины отбирают подземные воды из однородных песков четвертичного возраста. Мощность обводненной толщи песков составляет  $m = 20$  м. В основании водоносного горизонта залегают глины, служащие водоупором. Сверху пласт перекрыт песчано-суглинистым слоем мощностью 2,5-3 м. коэффициент фильтрации пород водоносного горизонта  $k = 20$  м/сут.

Подземные воды залегают на глубине 2 м от поверхности земли. По своему химическому составу они относятся к гидрокарбонатно-кальциевому типу с повышенным содержанием железа до 0,5-1 мг/л и являются склонными к осадкообразованию.

Скважины располагаются вдоль берега реки на расстоянии 25 м от уреза воды в реке. Расстояние между скважинами в ряду также равно 25 м. Все скважины имеют одинаковую конструкцию; радиус бурения  $r_0 = 0,4$  м; радиус фильтра  $r_c = 0,2$  м; длина фильтра  $l = 20$  м, коэффициент фильтрации\* пород при забойной зоне  $k_\phi = 4,069$  м/сут.

Инфильтрационный бассейн размещается в центре водозабора на расстоянии 40 м от уреза воды в реке. Длина инфильтрационного бассейна составляет 125 м, а мощность принята равной  $Q_0 = 0,052$  м<sup>3</sup>/с. Предусмотрено, что вода от скважин должна подаваться в резервуар, расположенный за пределами водозабора. Расчетная отметка наполнения воды в резервуаре находится на 70 м выше статического горизонта.

Рассматриваемая система водоснабжения должна обеспечить подачу воды потребителю  $Q$  не менее 100 м<sup>3</sup>/ч (2400 м<sup>3</sup>/сут), при этом понижения уровня воды в скважинах не должны в течение расчетного срока ее эксплуатации превысить заданной величины  $S_{дон} = 5$  м.

Требуется на основе комплексных расчетов проанализировать режим эксплуатации водозабора с учетом возможного коьматажа скважин (определить период устойчивой их работы, т.е. время  $T_s$ ) и осуществить подбор водоподъемного оборудования с его регулировкой на заданную подачу воды.

Соппротивление  $\xi_\kappa$ , обусловленное коьматажом водозаборных скважин, рассчитывается по формуле

$$\xi_\kappa(t) = \left[ \frac{k}{k(t)} - 1 \right] \ln \frac{r_c}{r_0} \quad (5.19)$$

$$k(t) = k_\phi \left[ 1 - \frac{N_0}{n_0} (1 - e^{-C_0 \gamma t}) \right]^3 \quad (5.20)$$

где  $N_0/n_0$  - безразмерный параметр ( $N_0$  - предельная емкость фильтра и  $n_0$  - его начальная пористость);

$C_0 \gamma$  - параметр, характеризующий интенсивность коьматажа скважин ( $C_0$  - концентрация в откачиваемой воде коьматирующих соединений и  $\gamma$  - константа скорости выпадения коьматанта из воды и осаждения его на фильтре скважин).

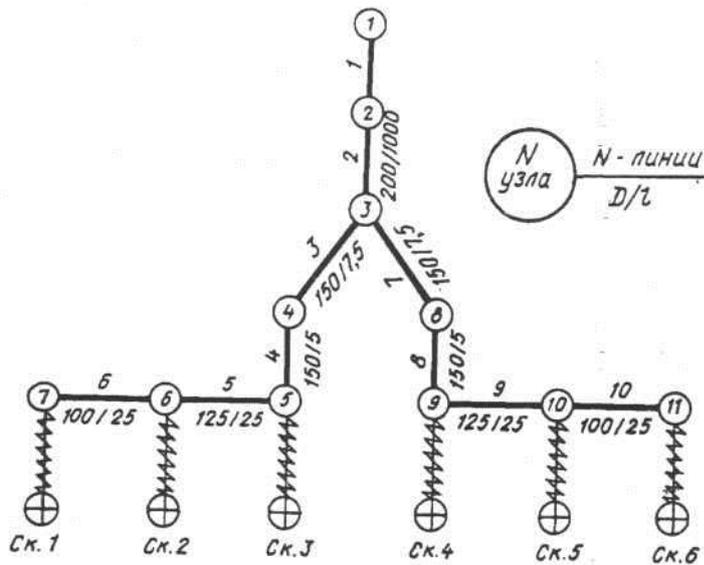


Рис. 5.18. Расчетная схема сбора и подачи воды от скважин

Для выявления закономерностей изменения дебита отдельных скважин и водозабора в целом гидрогеологические расчеты следует проводить с заданием на скважинах условия  $S_j = S_{дон}$ . В этом случае найденные значения  $Q_j$  скважин соответствуют их максимальной мощности. При выполнении таких расчетов с учетом роста  $\xi_k$  дебит снижается и может оказаться, что к некоторому моменту времени он станет равным или даже меньшим, чем требуемый  $Q_s$ . Расчетная схема приведена на рис. 5.18.

Для определения периода устойчивой работы скважин гидрогеологические расчеты должны проводиться на различные моменты времени с определением на каждом шаге по времени значений  $Q_s$  скважин и проверкой выполнения условия  $\sum Q_j \geq Q$ . Результаты таких расчетов по скважинам 1(6), 2(5) и 3(4) представлены на рис. 5.19. Там же приведены графики изменения  $\xi_k(t)$  и  $\sum Q_j(t)$ . Расчеты выполнялись при условии  $S_j = 5 м, (N_0/n_0) = 1$  и  $C_0 \gamma_j = 6,0368 \text{ мес}^{-1}$ .

Из рис. 5.19 видно, что период устойчивой работы системы скважин  $T_s$  составляет 18 мес. При  $t > T_s$  суммарная подача воды от скважин оказывается меньше требуемой ( $Q = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) и, следовательно, производительность водозабора не обеспечивается.

Следующим этапом комплексных расчетов является проведение гидравлических расчетов системы сбора воды от скважин и выбор соответствующего водоподъемного оборудования. Такие расчеты следует проводить с использованием в качестве исходных данных вычисленных значений  $Q_j$  и  $S_j$  по скважинам на момент времени  $t = T_s$ .

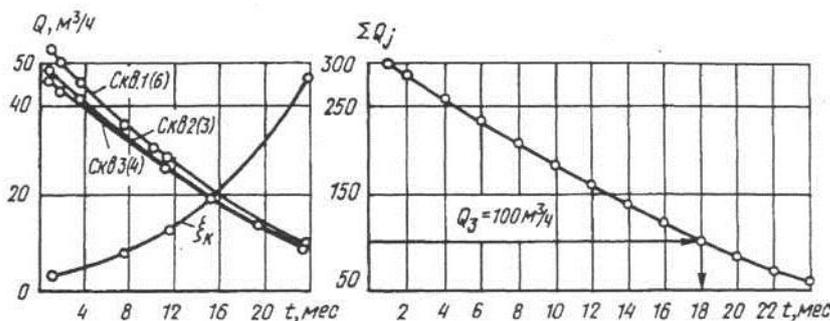


Рис. 5.19. Расчетные графики изменения во времени  $\xi_k; Q_j(t), Q_s(t)$  действия скважин в режиме  $S_j = const$

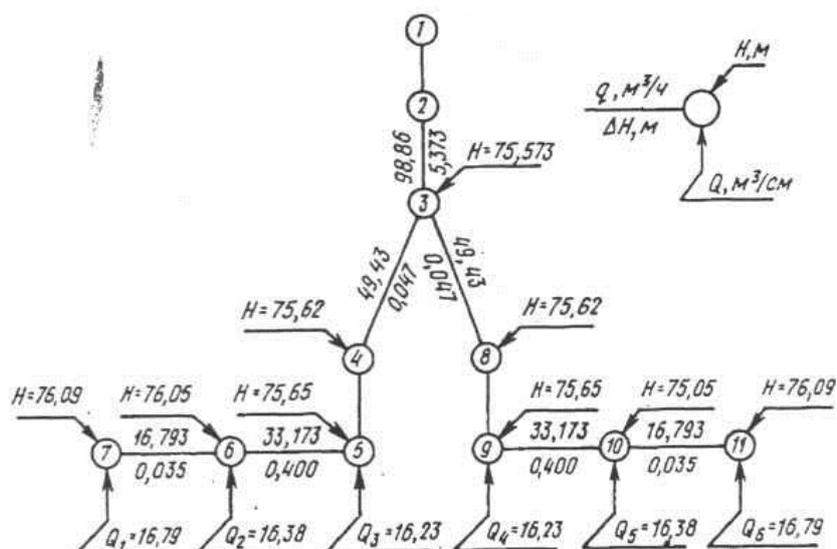


Рис. 5.20. Результаты гидравлического расчета сборных водоводов на момент времени  $t = T_8$

Результаты гидравлических расчетов сборных водоводов представлены на рис. 5.20, а данные по выбранному водоподъемному оборудованию сведены в табл. 5.6 при  $H = 5$  м и марке насоса 1ЭЦВ8-25-100.

Теперь необходимо проанализировать, насколько правильно подобраны погружные скважинные насосы и установлена степень их регулирования (т.е. в состоянии ли эти насосы обеспечить стабильную работу водозабора в течение времени  $T_5$ ). Для этого следует выполнить поверочные расчеты системы сбора и подачи воды от скважин.

Результаты поверочных расчетов при использовании данных табл. 5.6 представлены на рис. 5.21, из которого видно, что вначале дебит скважин (и их суммарная подача) несколько выше требуемого, а понижения уровней меньше, чем  $S_{дон}$ . С ростом  $f(t)$  дебит скважин  $Q_j$  снижается, а  $S_j$  возрастает и к моменту времени  $t = T_s$  во всех скважинах оказываются равными  $S_{дон}$  и  $\sum Q_j = Q_s$ .

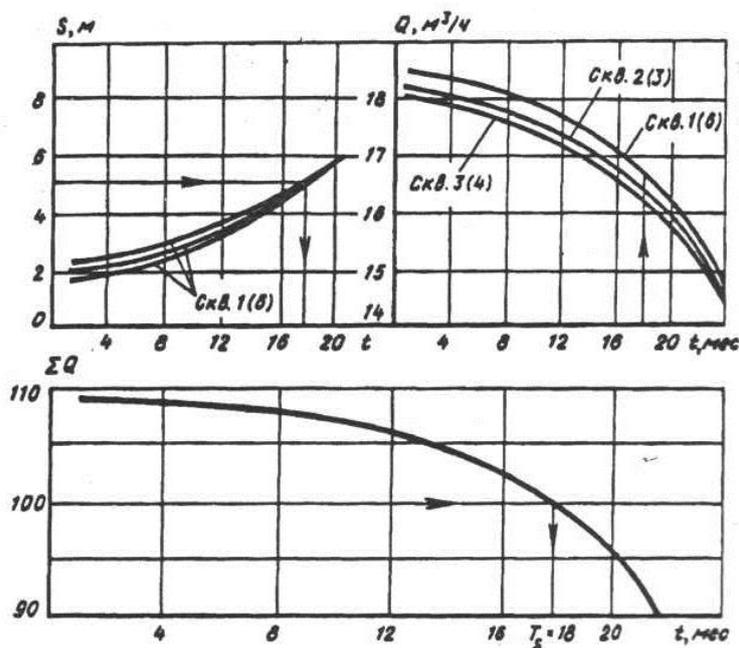


Рис. 5.21. Изменения расчётных значений  $S_j(t), Q_j(t)$  при насосной эксплуатации скважин

Таблица 5.6

№ скважины	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	Полная высота подъёма воды $H, \text{ м}$	Напор, м	
			насоса	дросселируемый
1	16,79	81,09	110,81	29,72
2	16,38	81,06	111,22	30,16
3	16,23	80,66	111,34	30,68
4	16,23	80,66	111,34	30,68
5	16,38	81,06	111,22	30,16
6	16,79	81,09	110,81	29,72

## 15.6. ШАХТНЫЕ КОЛОДЦЫ

Шахтные колодцы (рис. 5.22) представляют собой вертикальную выработку, поперечное сечение которой имеет большие размеры по сравнению со скважинами. Применение шахтных колодцев ограничено эксплуатацией водоносных горизонтов, залегающих на небольших глубинах - обычно 20-30 м.

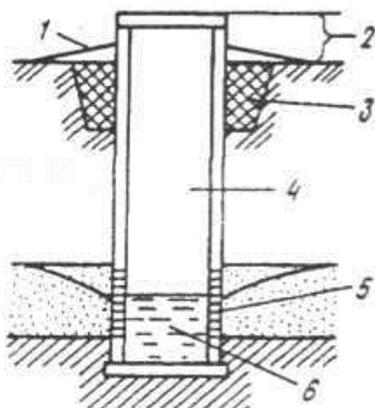
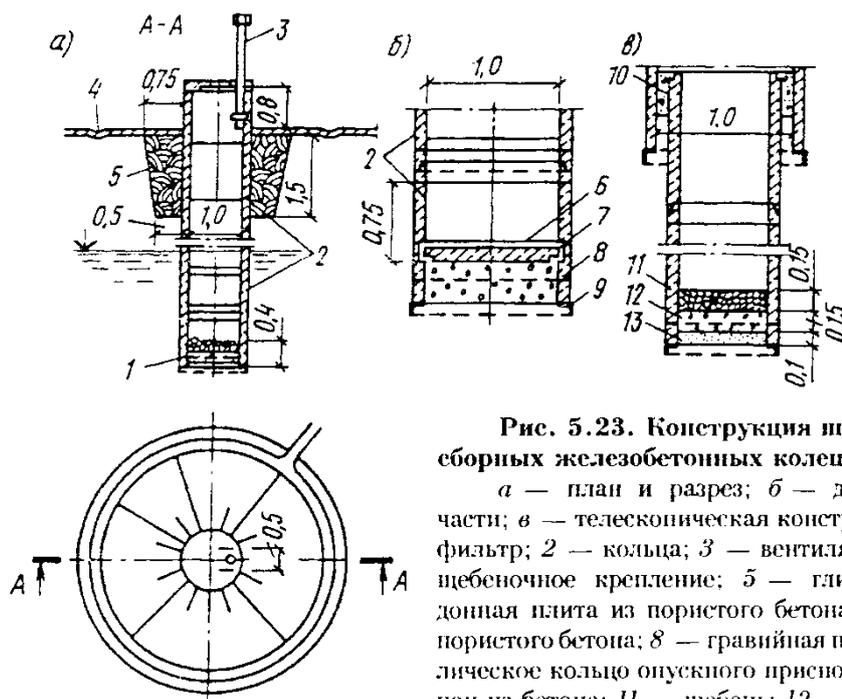


Рис. 5.22. Схема шахтного колодца  
1 - отмостка; 2 - оголовок; 3 - замок; 4 - ствол шахты; 5 - водопроводная часть; 6 - зумпф

Колодцы используются для забора воды из безнапорных или малонапорных водоносных пластов в системах водоснабжения небольших промышленных предприятий и населенных пунктов. Они состоят из следующих конструктивных элементов: оголовка, ствола, водоподъемной части и водосборной части - зумпфа. Оголовок служит для защиты колодца от попадания в него загрязненных вод и поэтому должен возвышаться над поверхностью не менее чем на 0,8 м. Сверху он перекрывается крышкой, а вокруг колодца устраивают глиняный замок на глубину 1,5 м и отмостку для отвода воды.

По условиям забора воды из водоносного пласта колодцы подразделяют на работающие дном, работающие стенками и работающие одновременно дном и стенками. Способ приема воды, а также вид и состав пород водоносного пласта определяют то или иное устройство водопроницаемой фильтрующей поверхности колодца. Дно колодца при приеме воды через него оборудуют гравийным фильтром или плитой из пористого бетона. В стенках колодца при приеме воды через них должны быть устроены специальные окна, заполненные гравийным фильтром или пористым бетоном. Зумпф предусматривается при необходимости создания в колодце некоторого запаса воды.

По виду материала шахтные колодцы бывают деревянными, из каменной и кирпичной кладки, а также бетонными и железобетонными. Последние лучше всех других соответствуют санитарным требованиям и более долговечны, поэтому в практике водоснабжения в настоящее время применяются в основном колодцы из железобетонных колец.



**Рис. 5.23. Конструкция шахтного колодца из сборных железобетонных колец**

*а* — план и разрез; *б* — деталь водоприемной части; *в* — телескопическая конструкция колодца; 1 — фильтр; 2 — кольца; 3 — вентиляционная труба; 4 — щебеночное крепление; 5 — глиняный замок; 6 — донная плита из пористого бетона; 7 — вкладыши из пористого бетона; 8 — гравийная подсыпка; 9 — металлическое кольцо опускного приспособления; 10 — тампон из бетона; 11 — щебень; 12 — гравий; 13 — песок

В типовых проектах для глубин 10-30 м предусмотрены железобетонные кольца внутренним диаметром 1 м при толщине стенок 8 см (рис. 5.23,а). В устойчивых грунтах стыки колец в стволе заделывают цементом, а в песчаниках применяют конструкции стыков, работающие на разрыв.

Водоприемную часть выполняют в виде кольца из пористого бетона, армированного сеткой. В нижней части колодца укладывают трехслойный обратный фильтр (рис. 5.23,б). Обратный фильтр выполняют из нескольких слоев песка и гравия толщиной по 0,1- 0,15 м каждый и общей толщиной 0,4-0,6 м с укладкой в нижнюю часть фильтра мелких фракций, а в верхнюю - крупных.

Механический состав фильтра и соотношения зерен смежных слоев фильтра принимают по рекомендациям для фильтров водозаборных скважин.

При вскрытии песчаных и плавунных грунтов крепление колодца производят кольцами 0,65 м. В этом случае в несовершенных колодцах данный фильтр устраивают в виде бетонной армированной плиты, укладываемой на щебеночно-гравийную обсыпку толщиной 0,3 м (рис. 5.23в).

Совершенные колодцы глубиной 20 и 30 м имеют видоизмененную конструкцию, включающую устройство зумпфа из железобетонных колец. Шахтные колодцы обычно строят опускным способом.

Для подъема воды из колодцев применяют центробежные насосы с вертикальным или горизонтальным валом. При устройстве нескольких колодцев, объединенных одной всасывающей линией, возможно применение сифонов.

При определении дебита шахтных колодцев пользуются общими формулами (5.1) и (5.2), применяемыми для расчета водозаборных скважин. Отличия, определяемые схемой поступления воды в колодец, видом водоносного грунта и т.д., учитываются при определении гидравлического сопротивления  $R = R_0 + \zeta$

При работе шахтных колодцев, располагаемых в долинах рек, величина  $R_0$  (гидравлическое сопротивление  $R$  в точке расположения колодца) определяется выражением

$$R_0 = \ln \frac{3,3x_0}{R_k},$$

где  $x_0$  - расстояние от уреза воды до центра колодца;  $R_k$  - радиус колодца. Для неограниченных по площади водоносных горизонтов

$$R_0 = \ln \frac{1,65r_{\text{вл}}}{R_k}.$$

Так же, как и при расчете скважин, необходимо учитывать дополнительное фильтрационное сопротивление, обусловленное неполнотой вскрытия колодцем водоносного пласта  $\xi$ . Его численное значение определяется в зависимости от параметров  $m/r_0$  и  $l_{\text{ф}}/m$ , где  $m$  - мощность водоносного пласта;  $r_0$  - радиус колодца;  $l_{\text{ф}}$  - вскрытая колодцем мощность водоносного пласта.

Суммарная площадь фильтрующей поверхности должна быть достаточной для пропуска расчетного расхода. Она определяется по скорости, не допускающей заиливание колодца вымытыми частицами породы.

## 15.7. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ВОДОЗАБОРЫ

Горизонтальные водозаборы представляют собой водосборную траншею или водосборную галерею, оборудованную для приема воды из водоносного пласта и отвода воды в место расположения водозаборных устройств. Они позволяют эксплуатировать маломощные водоносные пласты. Горизонтальные водозаборы особенно эффективны при расположении вблизи рек, озер и водохранилищ. Они появились значительно раньше вертикальных водозаборов в странах с засушливым климатом.

Горизонтальные водозаборы устраивают при глубине залегания водоносных пород до 8 м, при большей глубине их устраивают бестраншейным способом. В скальных породах горизонтальные водозаборы выполняют на любой глубине в виде водосборных штолен.

Современные горизонтальные водозаборы, как правило, представляют собой водосборную траншею или водосборную галерею, оборудованную соответствующими отверстиями с песчано-гравийным фильтром для приема воды. Гранулометрический состав отдельных слоев обратного фильтра определяется расчетом. Вода к месту расположения водозаборных устройств отводится по лоткам, расположенным в нижней части. Для осмотра, вентиляции и ремонта в процессе эксплуатации водозабор оборудуется смотровыми колодцами.

Водосборные колодцы, куда поступает собранная вода, оснащаются насосными установками. В них производят замер дебита, отбор проб, осаждают взвешенные частицы.

Если водоносный пласт питается из реки, то горизонтальный водозабор располагают параллельно урезу воды в ней. При заборе подземных вод со склона долины его располагают вдоль ее тальвега, а при движении воды вдоль оврагов - поперек оврага. Устройство горизонтального подруслового водозабора позволяет организовать забор больших количеств воды.

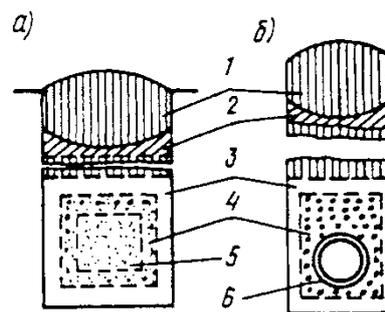
Вид устройств для захвата воды зависит от гидрогеологических и инженерных условий. Простейшим типом горизонтального водозабора является открытый дренажный канал - водосборник. Он применяется для промышленного водоснабжения и строится в виде открытой траншейной выработки, откосы которой оборудованы песчано-гравийным фильтром.

При заборе небольших количеств воды для мелких потребителей и временного водоснабжения, а также при глубине залегания подземных вод 2-3 м от поверхности земли применяют траншейные водозаборы. Каменно-щебеночный водозабор (рис. 5.24,а) выполняют в траншее, укладывая фильтрующие материалы, размер которых увеличивается к середине траншей. Соотношение диаметров частиц смежных слоев

обсыпки и частиц верхнего слоя подбирают так, как и для обсыпки фильтров скважинных водозаборов.

**Рис. 5.24. Траншейные водозаборы**

1 — обратная засыпка траншеи местным грунтом; 2 — глина; 3 — крупные пески; 4 — гравий; 5 — рваный камень; 6 — дренажная труба



Сверху обсыпку покрывают слоем глины, а затем вынутым из траншей грунтом. Толщину каменно-щебеночной засыпки принимают равной 0,3-0,4 м вскрытой мощности водоносного слоя. Толщину каждого фильтрующего слоя принимают не менее 150 мм;

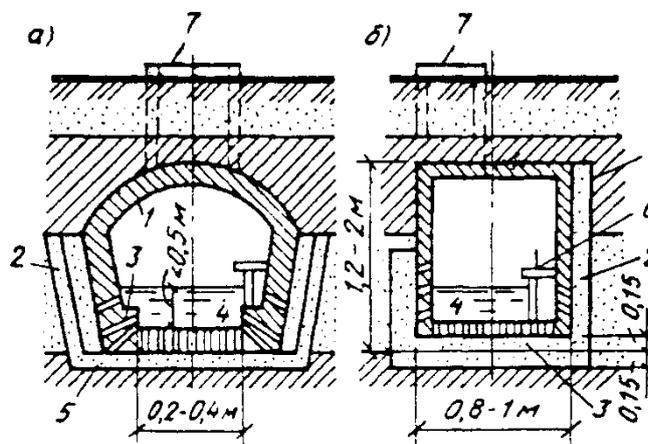
ширину назначают в пределах 0,8-1,2 м исходя из конструктивных особенностей водозабора и условий, проведения работ.

Трубчатые горизонтальные водозаборы (рис. 5.24,б) устраивают при глубине залегания подземных вод до 4-5 м. В отличие от каменно-щебеночного водозабора водоприемную часть выполняют из керамических, асбестоцементных, железобетонных, бетонных и пластмассовых труб, которые обсыпают фильтрующим материалом. В водоприемных трубах устраивают круглые или щелевидные отверстия, расширяющиеся внутрь трубы, а в трубах больших диаметров - окна-ниши. В остальном устройство водозабора аналогично устройству водозаборов предыдущего вида. При использовании труб из пористого бетона и полимербетона не нужны фильтрующие обсыпки или достаточно устройства одного ее слоя.

Водозаборные галереи (рис. 5.25) строят при глубинах залегания подземных вод до 6-8 м от поверхности при любых геологических и гидрогеологических условиях для крупных потребителей в ответственных системах водоснабжения. Галерею водозабора выполняют из сборных оваловидных или прямоугольных железобетонных звеньев, имеющих ширину 0,8-1 м и высоту 1,2-2 м с учетом возможности прохода по галерее. Лоток в нижней части при глубине не более 0,5 м и ширине 0,2-0,4 м обеспечивает сток собранной воды к месту ее сбора при скоростях, исключающих выпадение взвешенных частиц. В настоящее время разработаны водосборные галереи с водоприемными элементами из пористого бетона.

**Рис. 5.25. Водозаборная галерея оваловидной (а) и прямоугольной (б) форм**

1 — железобетонные сборные звенья галереи; 2 — песчано-гравийный обратный фильтр; 3 — водоприемные отверстия; 4 — лотковая часть галереи; 5 — песчано-гравийная подготовка основания галереи; 6 — мостик для прохода эксплуатационного персонала; 7 — смотровой (вентиляционный) колодец



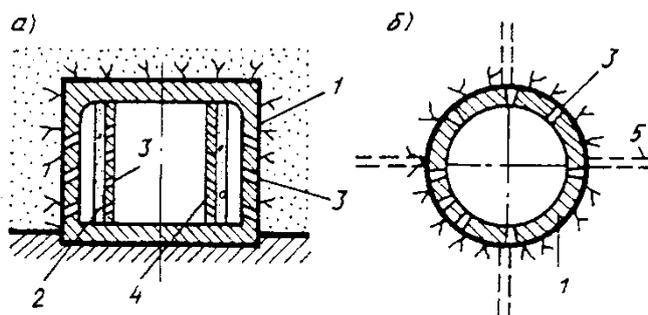


Рис. 5.26. Водосборная штольня прямоугольной формы с внутренним песчано-гравийным обратным фильтром (а) и круглой (овальной) формы с радиальными скважинами-усилителями (б)

1 — железобетонная обделка штольни; 2 — песчано-гравийный обратный фильтр; 3 — водоприемные окна; 4 — удерживающая стенка (решетка) с сеткой; 5 — шпурь или скважина с фильтром

При глубинах более 8 м возможно применение горизонтального водозабора в виде водосборной штольни прямоугольной или круглой конфигурации (рис. 5.26). В отличие от галерей штольни строят подземным (тоннельным) способом проходки. Оборудование штольни аналогично оборудованию галереи. При необходимости повышения водопритока в стенах штольни бурят радиальные шурфы или скважины с фильтром.

Оценку дебита горизонтальных водозаборов вдоль русла реки (рис. 5.27) производят по следующим зависимостям:

в напорном потоке

$$Q = 4 \pi k m S_0 / (R + \xi);$$

в безнапорном потоке

$$Q = \pi k (2h_e - S_0) S_0 / (R + \xi),$$

- где  $Q$  - расход горизонтального водозабора;  
 $k$  - коэффициент фильтрации водоносных пород;  
 $m$  - мощность напорного пласта;  
 $h_e$  - начальная глубина грунтового потока;  
 $S_0$  - понижение уровня подземных вод на водозаборе;  
 $R$  - фильтрационное сопротивление водозабора;  
 $\xi$  - показатель фильтрационного несовершенства горизонтального водозабора.

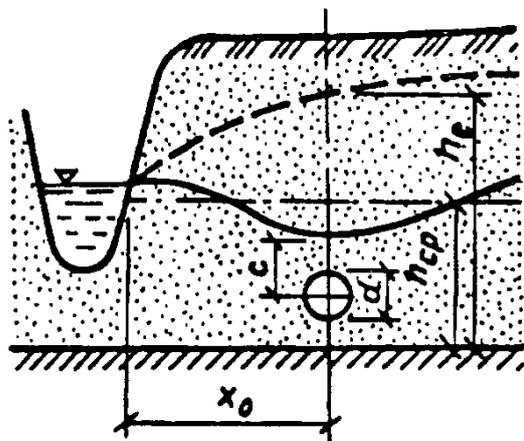


Рис. 5.27. Схема к расчету горизонтального водозабора

Гидравлическое сопротивление  $R$  находят по формуле

$$R = \ln(1 + \bar{x}_0^2) - \bar{x}_0^2 \ln(1 + 1/\bar{x}_0^2) + 4\bar{x}_0 \arctg \bar{x}_0,$$

где  $x_0 = x_0/l$  ( $x_0$  - расстояние от реки до водозабора;  $l$  - половина длины водозабора).

Дополнительное сопротивление может быть найдено по формуле

$$\zeta = \frac{m}{l} \ln \frac{0,16m}{r_0 \sin(\pi c/m)},$$

где  $r_0$  - радиус дрены;  
 $c$  - заглубление дрены под уровень подземных вод.

Для безнапорных потоков мощность напорного пласта  $m = h_{cp}$ , где  $h_{cp}$  - средняя мощность грунтового потока при работе водозабора ( $h_{cp} = 0,7 - 0,8$ ).

Для прямоугольных дрен и каналов  $r_0 = 0,5(b_1 + 0,5b_2)$ , где  $b_1$  - заглубление дрены под уровень подземных вод;  $b_2$  - ширина дрены.

В случае совершенной в фильтрационном отношении реки (рис. 5.28). гидравлическое сопротивление  $R$  определяется по формуле

$$R = \ln \left[ \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{8} \frac{4c-d}{m} \right) \right] \operatorname{ctg} \frac{\pi}{8} \frac{d}{m},$$

где  $m$  - мощность водоносного горизонта от дна реки до водоупора;  
 $d$  - диаметр водозабора;  
 $c$  - глубина заложения подруслового водозабора, считая от дна водоема.

Если водозабор располагается на водоупоре, т.е.  $c = m$ , то

$$R = 2 \ln \operatorname{tg} \frac{\pi}{8} \frac{d}{m}.$$

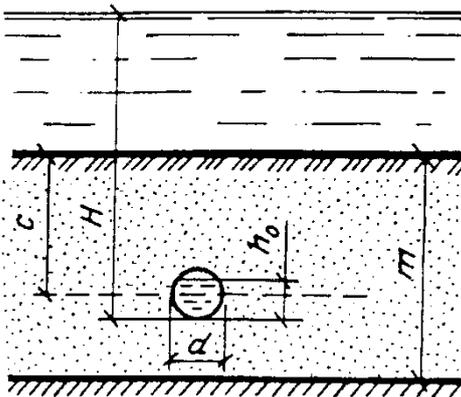


Рис. 5.28. Схема к расчету подруслового водозабора

Кяриз (канат, фоггара) представляют собой ряд шахтных колодцев-шурфов, пройденных до водоносных пород, между которыми подземным способом проходят водосборные галереи непосредственно в водоносном слое. Колодцы располагают на расстоянии 5 - 50 м один от другого. Они одновременно служат для вентиляции.

Практикой установлен следующий порядок сооружения кяризов: сначала проходят колодцы-шурфы, а после выяснения положения водоносных пород между колодцами прокладывают водосборные галереи. Галерею располагают таким образом, чтобы одной своей половиной она входила в водоносный слой и копировала его, а другой проходила в

водонепроницаемых грунтах и служила путями выхода коптированной воды на дневную поверхность.

## 15.8. ЛУЧЕВЫЕ ВОДОЗАБОРЫ

Лучевые водозаборы - это система горизонтальных или наклонных скважин, которые собирают воду из водоносного пласта и отводят ее в центральную водосборную камеру (шахту), откуда ведется откачка. Водозабор этого типа устраивают как в маломощных пластах (до 5 м), так и в пластах мощностью до 20 м, кровля которых находится на глубине до 15-20 м от поверхности земли.

В зависимости от условий расположения лучевые водозаборы бывают различных типов (рис. 5.29):

подрусловой - под дном реки (с шахтой на берегу или в русле);

береговой - при расположении лучевого водозабора на берегу недалеко от реки;

комбинированный - когда водозабор находится на берегу реки, а лучевые фильтры - как в береговой зоне, так и под руслом;

водораздельный - при расположении лучевого водозабора вдали от источников питания.

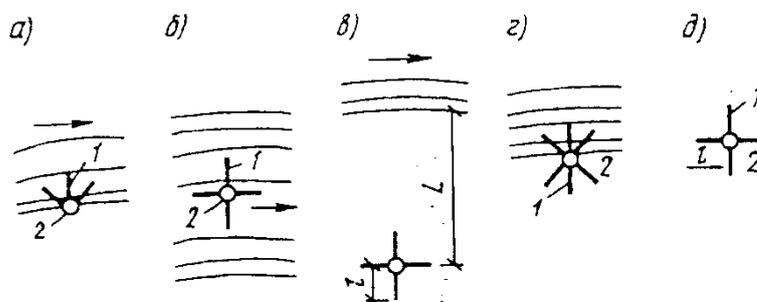


Рис. 5.29. Схемы лучевых водозаборов в плане

а и б — подрусловой с водозаборной шахтой соответственно на берегу и в русле реки;  
в — береговой; г — комбинированный; д — водораздельный; 1 — горизонтальные радиальные скважины; 2 — водосборный колодец (шахта)

В зависимости от способа устройства сборного колодца и расположения лучей в водоносном пласте они подразделяются на водозаборы с горизонтальными, наклонными восходящими и нисходящими, многоярусными скважинами. Они могут быть комбинированными, если предусматривается устройство как наклонных лучей-скважин, так и горизонтальных.

Многоярусные водозаборы могут устраиваться в неоднородных (в вертикальной плоскости) водоносных пластах, а также в случае, если один ярус лучевых фильтров не обеспечивает необходимой мощности.

Приемный колодец, расположенный в центральной части водозабора, предназначен не только для приема воды и установки соответствующего насосного оборудования, но и для проведения работ по устройству лучей-скважин. Обычно колодец устраивают опускным способом, в особо тяжелых условиях - кессонным способом. Его высота зависит от глубины залегания водоупорного пласта, а также от глубины заложения лучей. В зависимости от условий эксплуатации водозабора лучи-скважины могут быть с затопленными устьями или со свободным изливом воды из них в колодец. Верх колодца должен иметь более высокую отметку, чем отметка максимального уровня воды в источнике. Внутренний диаметр колодца принимается в пределах 1,5-6 м в зависимости от оборудования для устройства лучей и условий эксплуатации. Колодцы выполняют из

сборного и монолитного железобетона, а для колодцев малых диаметров можно использовать стальные трубы.

Число лучевых скважин, их длина, направление и глубина расположения назначают в зависимости от гидрогеологических, строительных, инженерных и эксплуатационных условий.

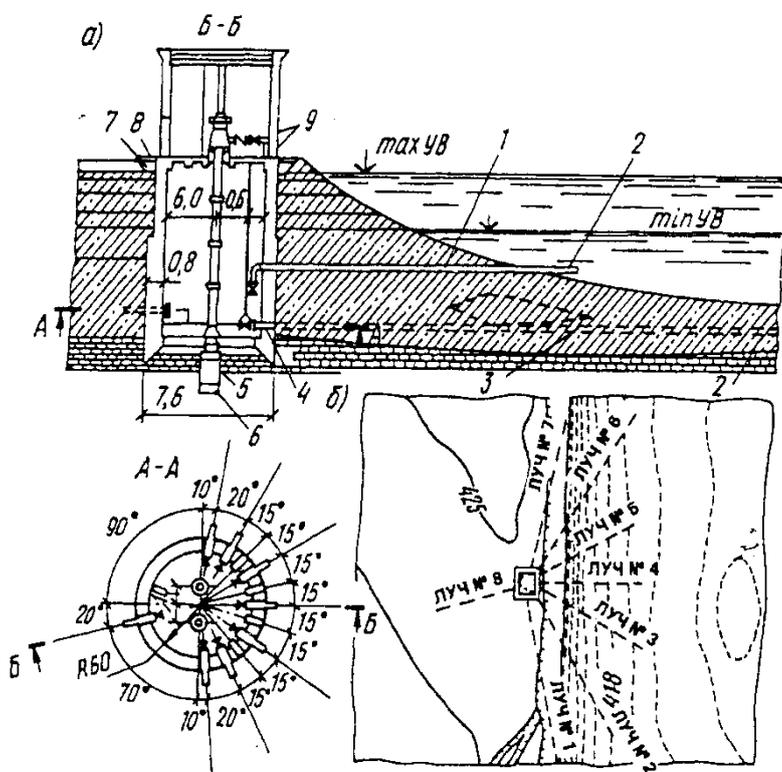


Рис. 5.30. Лучевой водозабор на берегу реки

*а* — план и разрез; *б* — общая схема; 1 — глухая труба; 2 — конец трубы с буровой головкой; 3 — перфорированная стальная труба; 4 — закладной патрубок; 5 — обсадная труба; 6 — бетонная пробка; 7 — шлак; 8 — покрытие (асфальт 3 см; песок 10 см, гравий 10 см); 9 — бетонная опора под водовод

Существуют различные способы устройства горизонтальных лучей-скважин. Для большинства этих способов используется метод продавливания отдельных звеньев труб с помощью домкратов, устанавливаемых в шахте. Учитывая метод производства работ по прокладке дрен, не рекомендуется устройство лучевых водозаборов в водоносных грунтах из крупного галечника, с вкраплениями валунов или подверженных сильной кольматации.

Длину вдавливаемых звеньев, определяемую размерами шахты, принимают равной 1-2,5 м. Диаметр вдавливаемых труб составляет 50-300 мм, а полная длина луча - 5-80 м. Подъем воды из колодцев (шахт) лучевых водозаборов осуществляют горизонтальными или вертикальными насосами, кроме того, возможно использование вакуумных систем с подключением вакуум-насосов к устью горизонтальных скважин. Последнее особенно важно для водозаборов, работающих в грунтах с низкой водоотдачей и в мало водообильных пластах.

На рис. 5.30 приведена схема лучевого водозабора, расположенного на берегу реки. Он состоит из бетонного шахтного колодца и системы горизонтальных скважин. Оптимальное число лучей принимают равным 3-7. При выборе основных параметров лучевого водозабора необходимо учитывать, что его дебит не пропорционален увеличению длины лучей. Увеличение приводит к росту гидравлических сопротивлений, уменьшающих дебит водозабора. Однако взаимовлияние лучей с ростом их длины уменьшается. Изменение диаметра лучевых дрен и наружного диаметра водосборного

колодца оказывает меньшее влияние на дебит водозабора, чем изменение длины, числа и заглубления дрен.

Дебит лучевого водозабора может быть определен по следующей общей зависимости:

$$Q = 2\pi kmS(1/R_г + 1/R_n),$$

где  $k$  - коэффициент фильтрации;

$M$  - мощность пласта;

$S$  - понижение уровня воды в водосборном колодце при откачке, равное  $S = H_e - H_0$  (здесь  $H_e$  и  $H_0$  - напор воды, соответственно в водоносном пласте до начала откачки и в водосборном колодце при эксплуатации водозабора).

Для берегового лучевого водозабора (рис. 5.31, а) величина  $R_n$  принимается бесконечно большой, забор подрусловых вод в этом случае не производится, а величина  $1/R_n$  в формуле (5.21) равняется нулю.

Фильтрационное сопротивление радиальной системы береговых скважин определяется формулой

$$R_г = (\ln v_r + 2\eta v_T) \frac{m}{l k_n N_г},$$

где  $N_г$  - число лучей водозабора, расположенных равномерно по всему кругу, с равными углами между лучами.

При этом

$$v_r = \frac{lv}{1,36r_0}; \quad v_T = \frac{l + \sqrt{l^2 + 4m^2}}{2m}; \quad v = \sqrt{\frac{4L - l}{4L + l}},$$

где  $r_0$  - радиус горизонтальных лучей скважины;

$L$  - расстояние от вертикальной оси водосборного колодца до уреза воды в водоеме;

$l$  - длина лучей.

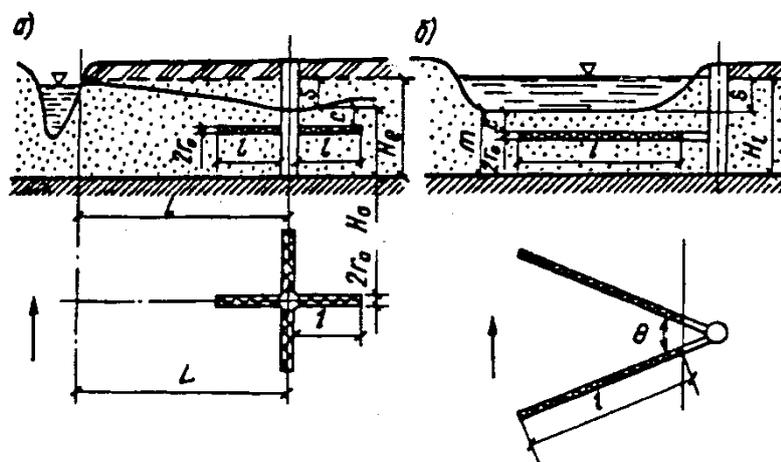


Рис. 5.31. Схемы к расчету подачи лучевых водозаборов

Коэффициент взаимодействия  $k$  лучевых дрен зависит от соотношений  $N_6$  и  $l/m$  и находится в пределах 0,3-0,7. Коэффициент  $\eta$  зависит от соотношений величин  $L/m$  и  $l/m$  и изменяется в диапазоне 3-8.

Для подруслового водозабора с водосборным колодцем, расположенным на берегу (рис. 5.31,б), величина  $R_6$  принимается равной бесконечности, а  $l/R_6 = 0$ .

Фильтрационное сопротивление  $R$  определяется по формуле

$$R_{\Pi} = (U_0 + U_{\Pi}) \frac{m}{lN_{\Pi}},$$

где

$$U_0 = \ln \frac{3cm l [l + \sqrt{l^2 + 16(m-c)^2}]}{r_0 (m-c) (l + \sqrt{l^2 + 16m^2}) (l + \sqrt{l^2 + 16c^2})}.$$

Величина  $U_{\Pi}$  для случая, когда  $l/m < 3$ , вычисляется по формуле

$$U_{\Pi} = \frac{N_{\Pi} + 2}{3} \ln \left\{ 1 + \left[ \frac{4m}{(l + 0,5m) \sin \theta} \right]^2 \right\}$$

где  $N_{\Pi}$  - число лучей под руслом реки;  
 $c$  - заглубление лучей под русло реки;  
 $\theta$  - угол между лучами. Для комбинированного лучевого водозабора, имеющего  $N_6$  береговых и  $N_{\Pi}$  подрусовых лучей, дебит скважины определяют по формуле (5.21), а величины  $R_6$  и  $R_{\Pi}$ , входящие в нее - по формулам (5.22) и (5.23).

## 15.9. ИСКУССТВЕННОЕ ВОСПОЛНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД (ИВПВ)

В практике водоснабжения все более широко применяют инфильтрационные водозаборы при искусственном восполнении подземных вод. Сущность этого метода состоит в переводе поверхностной воды в подземный водоносный горизонт через специально устраиваемые инфильтрационные сооружения. Метод ИВПВ позволяет решать ряд задач: увеличение запасов намечаемого к эксплуатации водоносного горизонта за счет поверхностных источников;

увеличение дебита действующих водозаборов подземных вод; создание подземных водохранилищ; улучшение качества воды, забираемой для целей водоснабжения, и др.

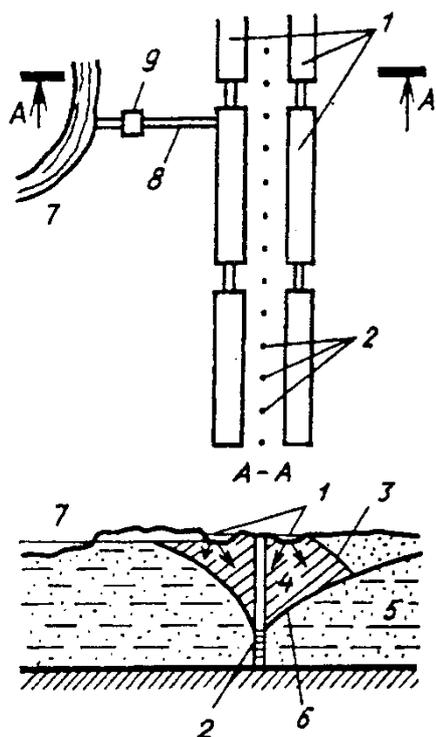
Система искусственного восполнения подземных вод включает:

источник пополнения, сооружения для подготовки воды, переводимой в подземные горизонты, установки для подачи воды на инфильтрационные сооружения, водозаборы подземных вод, а также сооружения подготовки воды для потребителей.

Сооружения для инфильтрации, являющиеся основным элементом установки ИВПВ, бывают двух основных типов: открытые и закрытые. К первым относятся бассейны, каналы, площадки и др.; ко вторым - скважины, колодцы, галереи.

Целесообразность применения тех или иных инфильтрационных сооружений определяется гидрогеологическими и климатическими условиями участка работ, а также качеством воды в источнике пополнения, наличием свободных площадей. Инфильтрационные сооружения могут быть непрерывного и периодического действия.

Открытые инфильтрационные сооружения используются, как правило, для пополнения запасов подземных вод первого от поверхности земли водоносного горизонта. Наибольшее применение в системах ИВПВ нашли сооружения с инфильтрационными бассейнами. Они представляют собой систему бассейнов, дно которых выложено слоем песка (рис. 5.32). По специальным трубопроводам вода поверхностного источника перекачивается в бассейны, просачиваясь через дно бассейна, фильтруется в подземный водоносный слой и заполняет депрессионную воронку, которая образовалась в процессе работы водозаборных скважин, в результате восстанавливаются запасы подземных вод и их уровни. Производится периодическая чистка бассейнов. Они имеют длину 200-400 м и ширину 15-30 м при глубине 1,5-2 м.



**Рис. 5.32.** Схема искусственного пополнения грунтовых вод

1 — инфильтрационные бассейны; 2 — водозаборные скважины; 3 — граница растекания воды из инфильтрационного бассейна; 4 — объем грунта, заполняемый водой из инфильтрационных бассейнов (призма регулирования запасов грунтовых вод); 5 — грунтовые воды; 6 — депрессионная поверхность грунтовых вод; 7 — источник поверхностных вод (озеро); 8 — водоводы; 9 — насосная станция

Инфильтрационные сооружения закрытого типа рекомендуется применять в случае, когда на поверхности земли залегают относительно слабопроницаемые породы или при слоистом строении зоны аэрации. Они распространены в районах со сложными условиями строительства и эксплуатации открытых инфильтрационных сооружений.

В зависимости от характера размещений в водоносном пласте закрытые инфильтрационные сооружения подразделяют на горизонтальные и вертикальные. Такие горизонтальные сооружения, как трубчатые дрены, галереи и штольни, не нашли широкого применения из-за отсутствия эффективных методов восстановления их мощности и несовершенства конструкций.

Наиболее широко используются вертикальные закрытые инфильтрационные сооружения: шурфы, шахтные колодцы и буровые скважины. Шурфы, как правило, устраивают диаметром до 4 м и при глубине уровня грунтовых вод до 5 м; шахтные колодцы — при уровне грунтовых вод на глубине до 30 м. Инфильтрация из этих сооружений может происходить через дно, боковые стенки или одновременно через боковые стенки и дно.

Наибольшее распространение из всех закрытых инфильтрационных сооружений получили буровые скважины. Они по назначению и условиям эксплуатации подразделяются на следующие. Поглощающие скважины обеспечивают подачу воды после ее предварительной подготовки непосредственно в эксплуатируемый пласт. При этом они одновременно могут служить для создания гидравлического барьера между эксплуатируемым водоносным горизонтом и другими близлежащими горизонтами с более низким качеством воды.

Дренажно-поглощающие скважины предназначены для дренирования верхнего горизонта и передачи воды в лежащий ниже эксплуатируемый пласт или, наоборот, для перетока воды из нижнего напорного пласта в верхний безнапорный горизонт.

Помимо скважин указанных типов имеются скважины двойного назначения, работающие попеременно в режиме поглощения и водозабора. Последние скважины, а также поглощающие применяют для обогащения подмерзлотного водоносного горизонта, который используется для целей водоснабжения в периоды промерзания рек и надмерзлотных пластов.

Расчет дебита инфильтрационных водозаборов проводят по ранее приведенным формулам для расчетных схем, отвечающих условиям инфильтрации. Однако при проектировании этих водозаборов возникают трудности из-за недостаточной изученности явления кольматации толщи пород, через которые вода поступает из водоема. Кольматация снижает дебит инфильтрационных водозаборов, поэтому ее влияние учитывают при расчете, вводя дополнительные сопротивления. В береговых водозаборах они условно представляются в виде некоторого дополнительного пути фильтрации к водозабору от водоема; в подрусовых - увеличения мощности пород, через которые вода из водоема поступает в водозабор.

### **15.10. КАПТАЖ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

Источники (ключи, родники) являются выходами подземных вод на поверхность земли. Условия выхода источников весьма разнообразны. Родниковые воды характеризуются малой мутностью. Они широко используются в системах водоснабжения.

Типы и конструкции каптажных сооружений разнообразны. Они зависят от гидрогеологических условий выхода родников, мощности источника, топографии и других факторов. При рассредоточенном выходе воды вдоль фронта потока каптаж осуществляется с помощью горизонтальных водозаборов каменно-щебеночного или галерейного типа; при сосредоточенном - водосборных камер.

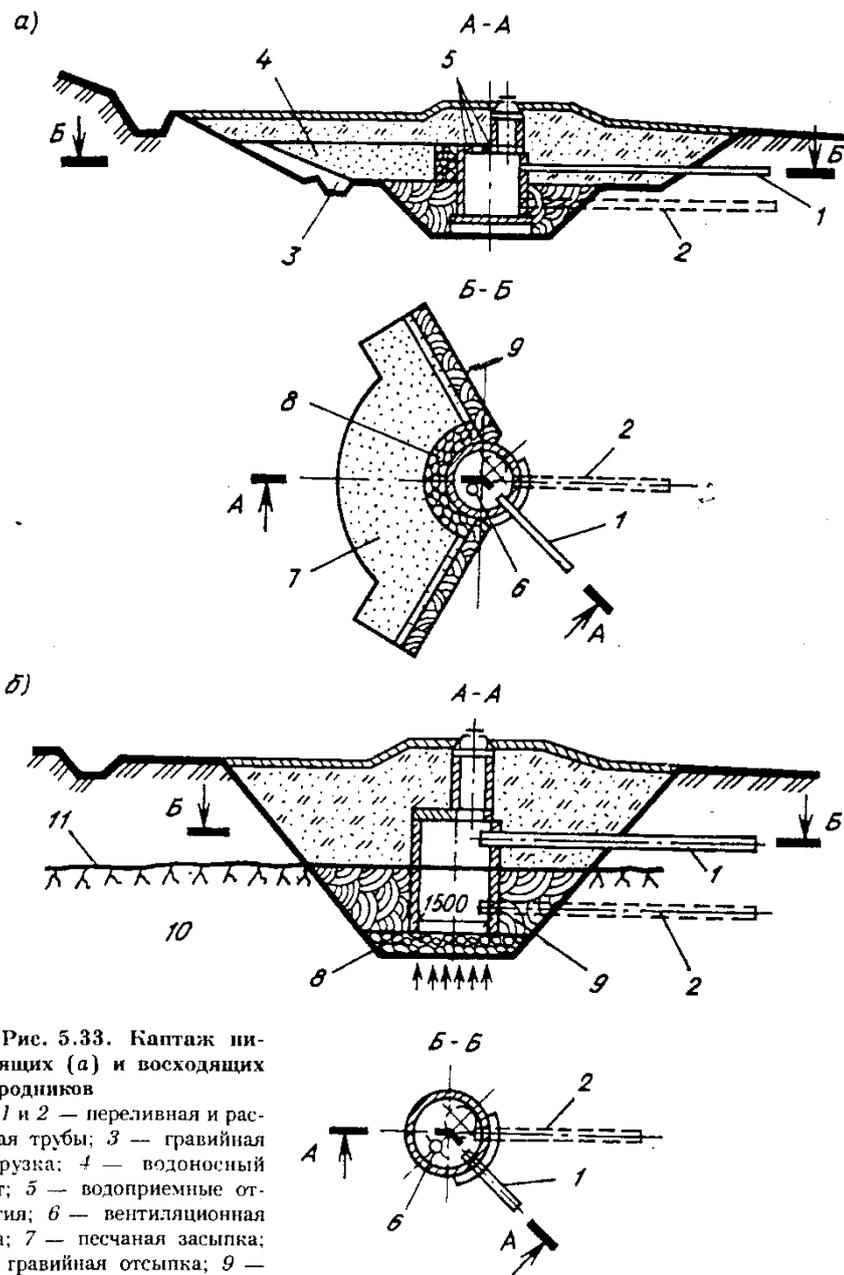


Рис. 5.33. Каптаж нисходящих (а) и восходящих (б) родников

1 и 2 — переливная и расходная трубы; 3 — гравийная пригрузка; 4 — водоносный пласт; 5 — водоприемные отверстия; 6 — вентиляционная труба; 7 — песчаная засыпка; 8 — гравийная отсыпка; 9 — плотно утрамбованный глинистый грунт; 10 — водоносный пласт; 11 — водоупор

В зависимости от условий выхода на поверхность родники бывают двух типов - восходящие и нисходящие. Нисходящие источники образуются в местах выхода на поверхность водоносных пластов, лежащих на водонепроницаемых породах; это происходит на склонах горных возвышенностей и долин рек, оврагов и балок.

Восходящие родники образуются при выходе напорных вод в местах нарушения целостности перекрывающих их водонепроницаемых пластов. При нисходящих родниках каптажное сооружение располагается перед местом их интенсивного выхода. При каптаже восходящих родников водозаборное сооружение располагается над выходом источника. Каптажные сооружения должны строиться в местах, где нет опасности возникновения обвалов, провалов, размыва и оползней, так как должны быть исключены попадание в каптаж загрязнений, затопление места его расположения и промерзание.

Типовой проект, разработанный ПО Интервод для каптажа нисходящих родников из водоносных пластов, представленных гравийно-галечниковыми и трещиноватыми

породами, приведен на рис. 5.33,а. Сооружение выполняют в виде камеры, имеющей железобетонное перекрытие и днище, стены - из железобетонных колец. Вода в водоприемную камеру поступает через водоприемные отверстия, обсыпанные гравийным фильтром. С обеих сторон камеры устраивают водоулавливающие стенки из плотно утрамбованного глинистого грунта. Пространство, образованное стенками, перед входными окнами заполняют песком. Камеру оборудуют расходной, переливной и вентиляционными трубами. В тех случаях, когда мощность водоносного пласта незначительна, а водоупорный пласт расположен близко к поверхности, днище каптажа заглубляют в подошву пласта. Величину заглубления определяют исходя из расположения расходной трубы в вертикальной плоскости; над трубой образуется слой воды, обеспечивающий напор, достаточный для дальнейшего ее транспортирования. Для максимального использования водоносного пласта необходимо, чтобы уровень воды в каптажной камере не превышал отметки подошвы пласта.

Каптаж воды из восходящих родников производится через дно каптажного сооружения. Типовой проект такого устройства приведен на рис. 5.33,о. Оно также выполнено из сборных железобетонных элементов. В основании камеры лежит фильтрующий материал из гравия, гальки, щебня. Подбор фильтрующего материала производят при условиях, исключающих вынос мелких частиц в приемную камеру. В том случае, если вода из каптажных камер не может быть подана потребителю самотеком, применяются насосные установки. Дебит каптажей определяется на основе наблюдений за режимом подземных вод.

### **15.11. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕБИТОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОДОЗАБОРОВ**

Изменение дебита водозаборов в общем случае определяется изменением граничных условий водоносного пласта, истощением запасов подземных вод, кольматажом водоприемных частей водозаборных сооружений.

Сохранение гидродинамических параметров водоносных пластов в большинстве случаев не обеспечивается. В значительной мере возможно поддержание стабильной работы водозаборных сооружений, скважин, лучевых водозаборов, колодцев и т.д. Снижение дебита скважин может происходить при установке фильтров со значительным сопротивлением или при использовании некачественной гравийной обсыпки, а также вследствие глинизации стенок скважин.

При сооружении водоприемной части водозаборного сооружения, а также в процессе эксплуатации в пористой среде пород водоносного пласта или гравийной обсыпки в отверстиях фильтра накапливается осадок. В результате изменяются структурные показатели пористой среды и уменьшается ее водопроницаемость. В дальнейшем при химическом кольматации распределение проницаемости в пределах обсыпки изменяется и наименьшую проницаемость приобретает слой породы, непосредственно контактирующий с каркасом фильтра.

Полностью учесть влияние всех факторов, определяющих снижение дебита водозаборов, на стадии изысканий и проектирования трудно. Поэтому в процессе эксплуатации проводятся мероприятия по восстановлению дебита скважин, оборудованных фильтрами, при этом главным является удаление кольматирующих отложений с фильтра и из прифильтровой зоны.

Существуют две группы методов воздействия на фильтр и прифильтровую зону: реагентные и импульсные. На рис. 5.34 приведена классификация методов регенерации скважин на воду. Первая группа этих методов предназначена для растворения кольматанта. Задачей технологических исследований является подбор вида реагента, его количества, выбор рациональной технологии обработки в зависимости от гидрогеологических условий и конструкции скважин, надежного метода контроля хода обработки и критерия для оценки ее окончания. При импульсной регенерации необходимо

оценить возможную степень дробимости образований в прифилтровой зоне и декольматации скважин, а также возможность сохранности самого фильтра. Сочетание импульсных и реагентных методов позволит обеспечить большую эффективность обработки фильтра и прифилтровой зоны. Термореагентная обработка предпочтительна в длительно эксплуатирующихся скважинах.

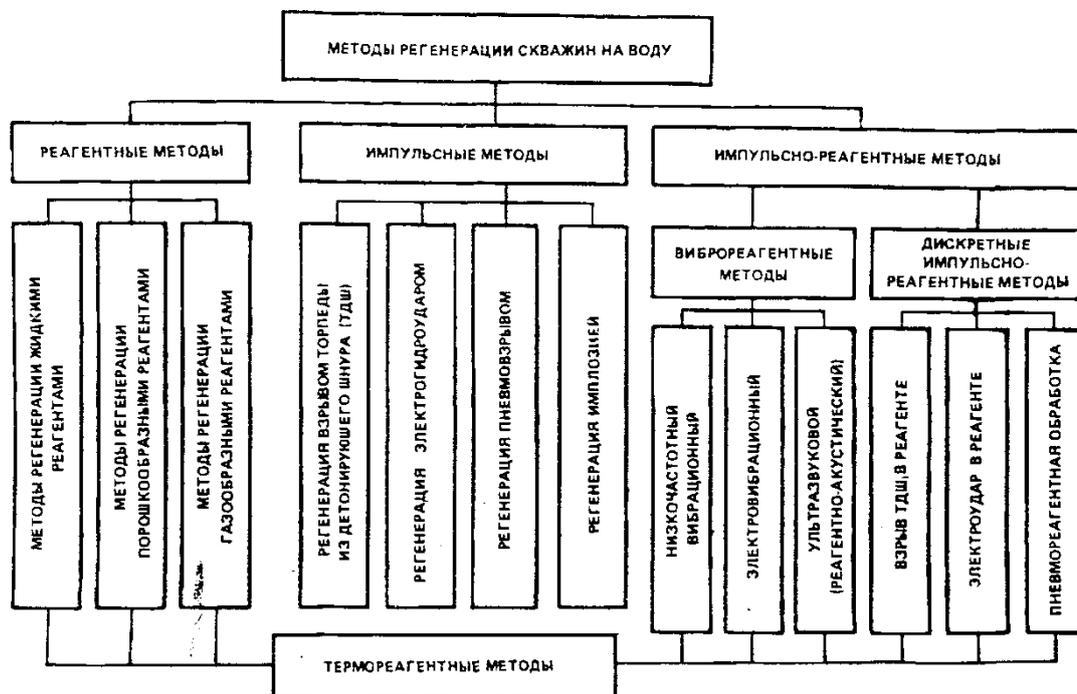


Рис. 5.34. Классификация методов регенерации скважин на воду

При восстановлении дебита шахтных колодцев используют реагентные и комбинированные методы регенерации. При их эксплуатации наиболее широко применяются механическая и гидравлическая очистка с помощью специальных установок. Снижение дебита лучевых водозаборов происходит вследствие кольматации поверхности фильтров и дна источника. Для восстановления лучей скважин применяют механическую чистку, промывку и обработку кислотой. Очистку дна поверхностного источника производят земснарядами, водоструйными установками или механическим рыхлением.

Для поддержания дебита водозаборов других видов могут использоваться ранее рассмотренные способы.

## Глава 16. ВОДОЗАБОРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ ИЗ ПОВЕРХНОСТНЫХ ИСТОЧНИКОВ

### 16.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ СООРУЖЕНИЙ

Водозаборным сооружением (или сокращенно водозабором) называют комплекс гидротехнических сооружений, служащих для забора воды из источника водоснабжения, ее предварительной очистки (обычно процеживанием воды через сетки) и подачи под необходимым напором в водоводы (к потребителю или на очистные сооружения системы водоснабжения).

Водоприемником называют сооружение, предназначенное для приема воды и непосредственно взаимодействующее с речным потоком или водоемом.

Водозаборные сооружения - одни из ответственных и дорогих сооружений системы водоснабжения. Снабжение водой потребителей в значительной степени зависит от бесперебойного, функционирования водозаборных сооружений соответствующей

мощности, что возможно только при осуществлении водозабора с учетом всех природных условий водоисточника.

Водозаборные сооружения классифицируют: **по назначению** - хозяйственно-питьевого или производственного водоснабжения; **по роду водоисточника** - речные, морские, водохранилищные; **по месту расположения водоприемника** - береговые и русловые;

**по производительности** - малой ( $Q_v < 1 \text{ м}^3/\text{с}$ ), средней ( $Q_v = 1 \dots 6 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и большой ( $Q_v > 6 \text{ м}^3/\text{с}$ ) производительности ( $Q_v$  - производительность водозабора); **по степени обеспеченности подачи воды** - I, II и III категорий; **по компоновке основных сооружений водозабора** - совмещенные (компонуются в одном сооружении) и раздельные (комплекс сооружений); **по степени стационарности** - стационарные и нестационарные (плавучие, фуникулерные, передвижные).

Водозаборные сооружения на реках различают также по наличию в их составе регуляционных и подпорных сооружений, служащих для регулирования стока реки или увеличения глубин воды у водоприемника - бесплотинные, приплотинные и др. Кроме того, применяют водозаборные сооружения с подводными каналами и водоприемными ковшами.

Таблица 5.7

Категория водозаборных сооружений	Характеристика обеспеченности подачи воды	Обеспеченность, %		
		расчетного расхода воды в водоисточнике	расчетного уровня воды в водоисточнике	
			максимального	минимального
I	Допускается снижение подачи воды на хозяйственно-питьевые нужды не более 30% расчетного расхода воды и на производственные нужды до предела, устанавливаемого аварийным графиком работы предприятий; длительность снижения подачи не должна превышать 3 сут. Перерыв в подаче воды или снижение подачи ниже указанного предела допускается не более чем на 10 мин	95	1	97
II	Допускаемое снижение подачи воды - то же, что при I категории; длительность снижения подачи - не более 10 сут. Перерыв в подаче воды или снижение подачи ниже указанного предела - до 6 ч	90	3	95
III	Допускаемое снижение подачи воды - то же, что при I категории; длительность снижения подачи воды не должна превышать 15 сут. Перерыв в подаче воды или снижение подачи ниже указанного предела - до 24 ч	85	5	90

**Примечание.** Объединенные хозяйственно-питьевые и производственные системы водоснабжения населенных пунктов при числе жителей в них более 50 тыс. чел. следует относить к I категории; от 5 до 50 тыс. чел. - к II категории; менее 5 тыс. чел. - к III категории.

Водозаборы для хозяйственно-питьевого и производственного водоснабжения действуют в течение всего года и, как правило, не допускают перерывов в подаче воды.

По характеру водопотребления и требуемой обеспеченности подачи воды водозаборные сооружения разделяют на три категории (табл. 5.7).

## **16.2. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ВОДОЗАБОРАМ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Водозаборные сооружения должны обеспечивать подачу воды потребителю в необходимом объеме и требуемого качества при всех расходах и уровнях воды в реке, не меньших минимального расчетного.

Бесперебойность подачи воды должна быть обеспечена при самых неблагоприятных возможных при выбранной обеспеченности сочетаниях гидрологических, технологических, шуголедовых и других условий. Водозаборные сооружения должны обеспечивать забор из водоисточника потребного расхода воды и подачу ее потребителю; защищать систему водоснабжения от попадания в нее сора водорослей, планктона, биологических обрастателей, наносов, льда и т.п., защищать молодь рыб от попадания в водозаборные сооружения.

Водозаборные сооружения должны быть рассчитаны на эксплуатацию в обычных и редкоповторяющихся условиях, в том числе и при мгновенных максимальных и минимальных уровнях воды в водоисточнике с обеспеченностью, указанной в табл. 5.7.

Надежность действия водоприемника в значительной степени определяет надежность функционирования всего водозабора в целом, поэтому водоприемник должен обеспечивать прием воды в условиях, осложненных: уменьшением глубин или расходов воды в русле реки; образованием внутриводного льда и шути, шугозаполнением русла, транспортированием потоком шути, сора, наносов, топляков, карчей и т.п.; судоходством, лесосплавом, регулированием стока на ГЭС, отбором воды для других целей; захватом загрязнений водоема; переформированием русла или побережья водоема; волнением, вдольбереговым перемещением наносов, нагоном шути, сора, льда; развитием или деградацией границы многолетнемерзлых грунтов, наледеобразованием, заторами и навалами льда и др.

Водозаборные сооружения хозяйственно-питьевого назначения должны удовлетворять санитарным требованиям; место их расположения должно позволять организацию зон санитарной охраны. Водозаборные сооружения должны быть прочными, долговечными, устойчивыми, простыми в строительстве и удобными в эксплуатации, экономичными. При проектировании водозаборных сооружений и определении их стоимости надо учитывать не только затраты на строительство сооружений, но и возможный ущерб, который может быть вызван непредвиденными нарушениями бесперебойности подачи воды потребителям.

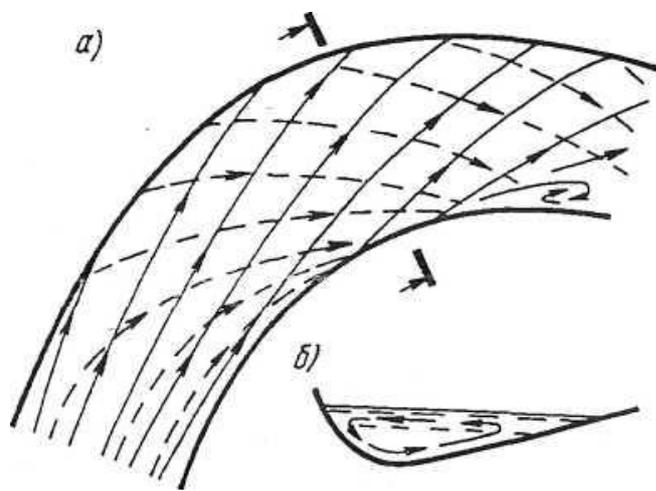
Водозаборные сооружения необходимо проектировать так, чтобы их расположение, форма и размеры обеспечивали плавное обтекание речным потоком (при всех гидрологических фазах), наименьшее стеснение русла и не вызывали бы его переформирования.

## **16.3. ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ ЗАБОРА ВОДЫ**

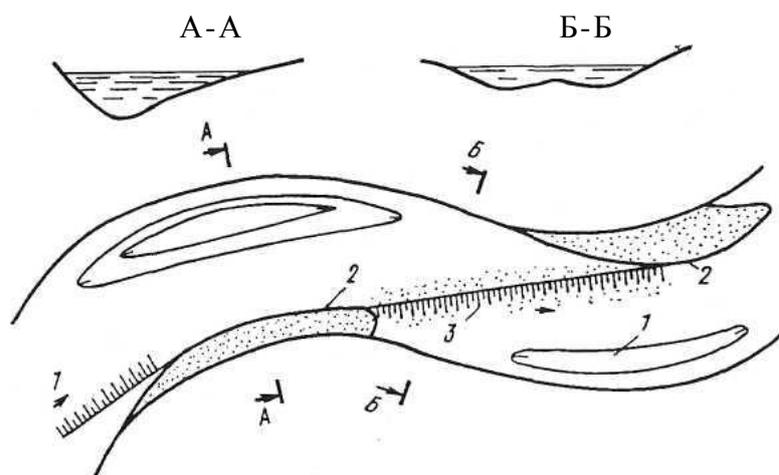
Осложнения в работе водозаборных сооружений могут возникнуть: при заносе водоприемников отложениями донных наносов; при отделении мест расположения водоприемников косами наносов; при отходе русла реки от сооружения вследствие переформирования русла; при подмыве и разрушении водоприемника течением воды или волнением; при разрушении водоприемника под воздействием льда, при зажорах, заторах и навале льда; при закупорке решеток сором, водорослями, скоплениями шути или при обмерзании решеток. Перемещение наносов речным потоком связано с

размывом русла в одних местах и с отложением наносов в других. В структурном механизме речных потоков поперечные циркуляционные течения определяют особенности формируемого потоком русла, движения наносов и плавающих тел, льда и шуги. Русло реки характеризуется извилистой формой в плане и чередованием вдоль него глубоких участков - плесов и мелких - перекатов. Плесовые участки соответствуют изогнутым участкам русла, а перекааты - участкам, соединяющим излучины с противоположными направлениями изогнутости.

При движении воды на повороте под действием центробежной силы возникает перекося поверхности воды. Поверхностные мало-мутные струи воды, набегая на вогнутый берег, отклоняются ко дну и размывают его, формируя углубление дна - плесовую ложбину, представляющую большой интерес для размещения в ней водоприемника (рис. 5.35). Донные струи насыщаются наносами и, выходя к поверхности у выпуклого берега, теряют здесь часть своей скорости, образуя отмель, называемую побочнем (рис. 5.36). Возникающее винтовое течение называют поперечной циркуляцией. В результате размыва вогнутого и наращивания выпуклого берега происходит развитие и перемещение речных излучин (рис. 5.37).



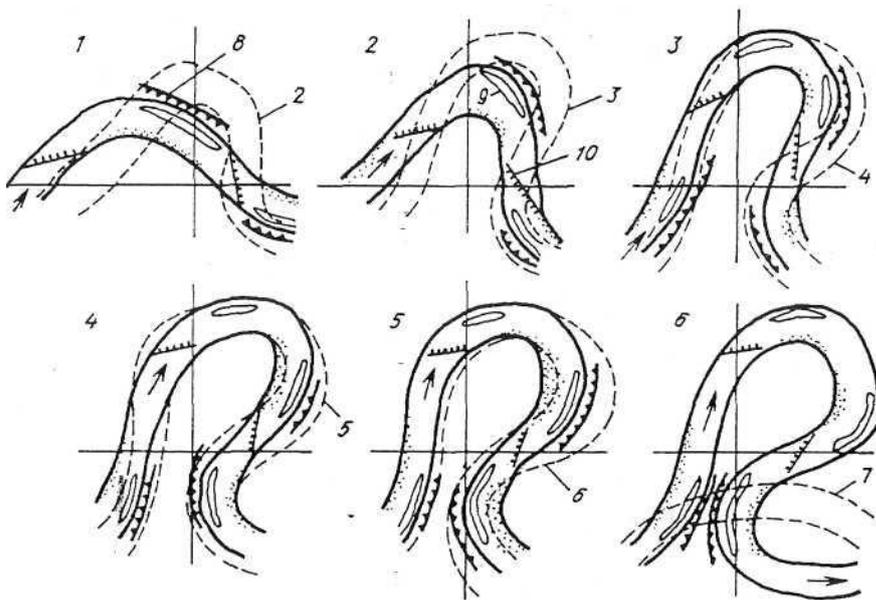
**Рис. 5.35. Структура течений на изгибе потока**  
а - план; б - сечение русла



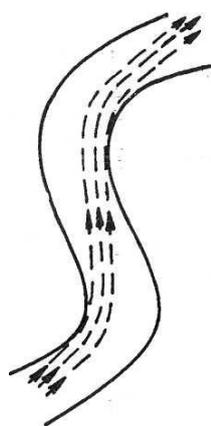
**Рис. 5.36. Плесовая ложбина, перекаат и береговая отмель (побочень)**  
1 - плесовая ложбина; 2 - побочень; 3 - перекаат

На перекаате происходит затухание поперечной циркуляции и вследствие этого уменьшается транспортирующая способность потока. Наносы при этом оседают на дне, глубина потока уменьшается, а ширина русла увеличивается. Наносы движутся по дну, пересекая русло от верхнего побочня к нижнему (рис. 5.38). Гряда наносов на перекаате располагается по этому же направлению, часто с повышением дна в середине русла, где может образоваться осередок - затапливаемое подвижное возвышение дна или даже остров. Меандрическая форма русла в большей степени свойственна малым и средним рекам с небольшими уклонами (около 0,0001), большим рекам свойственна

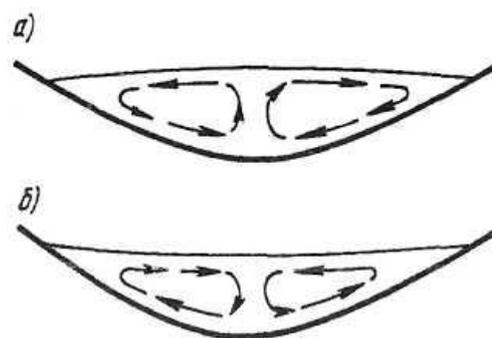
слабая извилистость. При проходе по руслу паводковых и паводковых расходов воды также возникает поперечная циркуляция (рис. 5.39). Характер циркуляции обусловлен быстрым увеличением глубины и скорости потока в стержневой его части при подъеме уровней; они же быстрее убывают при снижении уровней воды. Вследствие этого перекаты при подъеме уровней воды нарастают, при спаде - размываются.



**Рис. 5.37.**  
**Последовательные стадии развития излучины**  
 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7 - стадии развития излучины; 8 - подмываемый берег; 9 - плесовая ложина; 10 - перекат



**Рис. 5.38.** Перемещение наносов в русле реки



**Рис. 5.39.** Поперечная циркуляция воды при паводке (а) и при его спаде (б)

Образование внутриводного льда, создающего помехи забору воды, начинается с отрицательных среднесуточных температур воздуха, когда температура воды в реке достигает значений, близких  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Дальнейшее охлаждение потока приводит к переохлаждению тонкого поверхностного слоя до  $t = -0,005... -0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Образование кристаллов льда при этом может происходить в толще воды вследствие турбулентного перемешивания и на ее поверхности при наличии центров кристаллизации (песчинок, кристаллов льда) и на неровностях дна. Толщина донного льда, имеющего пористую структуру, может достичь  $0,6\text{ м}$  в галечном русле и  $1,5\text{ м}$  - на скальном дне. В плесе могут отмечаться редкие и небольшие скопления, на перекате с большими скоростями потока - сплошной ковер донного льда.

При мелкопесчаном дне кристаллы льда с примерзшими песчинками всплывают, образуя ледяную взвесь с песчаными включениями. У водоприемных отверстий затопленных водоприемников скопления такого льда уплотняются, образуя ледяные

стенки, закупоривающие отверстия, что иногда приводило к разрушению решеток и даже водоприемников.

Скопления донного льда при подтаивании его у дна от притока глубинного тепла всплывают, образуя плавающие скопления внутриводного льда - шугу. Сначала она движется небольшими скоплениями, которые, смерзаясь, образуют шуговые ковры. Ледостав начинается со смерзания ковров шути с заберегами. С ледоставом прекращается переохлаждение воды и образование внутриводного льда. На реках с малыми скоростями течения  $v < v_{к,1} = 0,4...0,5$  м/с ледостав устанавливается без значительного внутриводного льдообразования. При скорости течения  $v > v_{к,2}$  (по А.С. Образовскому  $v_{к,2} = 0,7...0,067 H$ , м/с, где  $H$  - глубина воды, м) скопления шугольда подныривают, затягиваются под лед, заполняя живое сечение реки. На перекатах и в сужениях шуга останавливается, образуя зажор, при котором уровень воды повышается. При скоростях  $v > v_{к,3} = 1,5$  м/с шуголедовый материал транспортируется в толще потока в виде ледяной взвеси, в том числе и под массами ранее остановившейся, уплотнившейся и замерзшей с поверхности шути. Большинство равнинных рек с песчаными руслами в предледоставный период имеют скорости течения на плесах  $v_{к,1} < v < v_{к,2}$  и на перекатах  $v_{к,2} < v < v_{к,3}$ , где  $v_{к,1}$ ,  $v_{к,2}$  и  $v_{к,3}$  - критериальные скорости течения воды. При таких скоростях всплывающая в плесах шуга смерзается, образуя в нижних участках плесов ледяные перемычки, стесняющие живое сечение потока и приводящие к повышению уровней воды и образованию на плесах ледяного покрова. Кромка ледостава с приближением к расположенным выше перекатам перестает двигаться вверх и здесь некоторое время сохраняется полынья. Если размеры полыньи значительны, то переохлаждение воды увеличивается и полынья генерирует шугу. Образующаяся здесь мелкозернистая шуга поступает в расположенный ниже плес и накапливается в его верховой части.

На реках с большими уклонами, песчано-гравелистым руслом и большим объемом шугольда при таком же соотношении скоростей течения кромка ледостава также перемещается в плесе вверх по течению. Подныривание начинается ближе к перекату и верховая часть плеса оказывается частично заполненной «висячим» шугозажором, который создает подпор, распространяющийся™™ перекат. Это приводит к уменьшению скорости течения воды на перекате, в результате чего кромка ледостава передвигается в расположенный выше плес, где процессы повторяются.

Если перекат достаточно высок, то на нем может возникнуть на какое-то время полынья, которая увеличит объем шугозажора. Это вызовет подпор, повышение уровня воды на перекате и продвижение кромки ледостава.

Скорость транзита шуголедовой взвеси под телом шугозажора около 1,5 м/с. Следовательно, глубина  $h$ , м, под шугозажором составляет минимально  $q/1,5$ , где  $q$  - удельный расход воды на 1 м ширины плеса. И если скорость течения в плесе в открытом потоке составляет 0,5 м/с, то заполнение русла шугой составит около 67 %. Характер шугозаполнения русла может измениться при потеплениях, ледоходах и повторных ледоставах.

Условия забора воды из поверхностных источников приведены в табл. 5.8.

Таблица 5.8

Условия забора воды	Мутность, устойчивость берегов и дна	Шуга и лед	Примечания
Легкие	Мутность < 500 мг/л, устойчивое ложе водоема и водотока	Отсутствие внутриводного ледообразования. Ледостав умеренной мощности (0,8 м), устойчивый	Отсутствие в водоисточнике дрейсины, баянуса, мидий и т.п., водорослей, малое количество загрязнений и сора
Средние	Мутность 4 1500 мг/л (среднее за паводок). Русло (побережье) и берега устойчивые с сезонными деформациями ± 0,3 м. Вдоль береговое перемещение насосов не влияет на устойчивость подводного склона постоянной крутизны.	Наличие внутриводного ледообразования, прекращающегося с установлением ледостава обычно без шугозаполнения русла и образования шугозажоров. Ледостав устойчивый мощностью < 1,2 м, формирующийся с полыньями	Наличие сора, водорослей, дрейсины, баянуса, мидий и загрязнений в количествах, вызывающих помехи в работе водозабора. Ледосплав молевой; и плотами. Судходство.
Тяжелые	Мутность ≤ 5000 мг/л. Русло подвижное с переформированием берегов и дна, вызывающим изменение отметок дна до 1-2 м. Наличие переработки берега с вдоль береговым перемещением насосов по склону переменной крутизны	Неоднократно формирующийся ледяной покров с шугоходами и шугозаполнением русла при ледоставе до 60-70 % сечения водотока. В отдельные годы с образованием шугозажоров в предледоставный период и ледяных заторов весной. Участки нижнего бьефа ГЭС в зоне неустойчивого ледового покрова. Нагон шугольда на берег с образованием навалов на берега, торосов и шугозаполнением прибрежной зоны	То же, но в количествах, затрудняющих работу водозабора и сооружений водопровода
Очень тяжелые	Мутность > 5000 мг/л, русло неустойчивое, систематически и случайно изменяющее свою форму. Интенсивная и значительная переработка берега. Наличие или вероятность оползневых явление	Формирование ледяного покрова только при шугозажорах, вызывающих подпор; транзит шуги под ледяным покровом в течение большей части зимы. Возможность наледей и перезамерзания русла. Ледоход с заторами и г большими навалами льда на берега. Тяжелые шуголедовые условия при наличии приливов	

**Примечание.** Общая характеристика условий забора воды определяется по наиболее тяжелому виду затруднений.

#### 16.4. ВЫБОР МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ВОДОЗАБОРА

Выбранное место расположения водозабора должно располагаться как можно ближе к потребителю; при хозяйственно-питьевом водоснабжении необходим учет санитарных требований: возможности расширения границ объекта водоснабжения в перспективе и организации зон санитарной охраны.

Количество и качество воды в водоисточнике должны соответствовать требованиям потребителя (с учетом возможности обработки воды). Топографические, гидрологические, геологические и гидрогеологические условия площадки

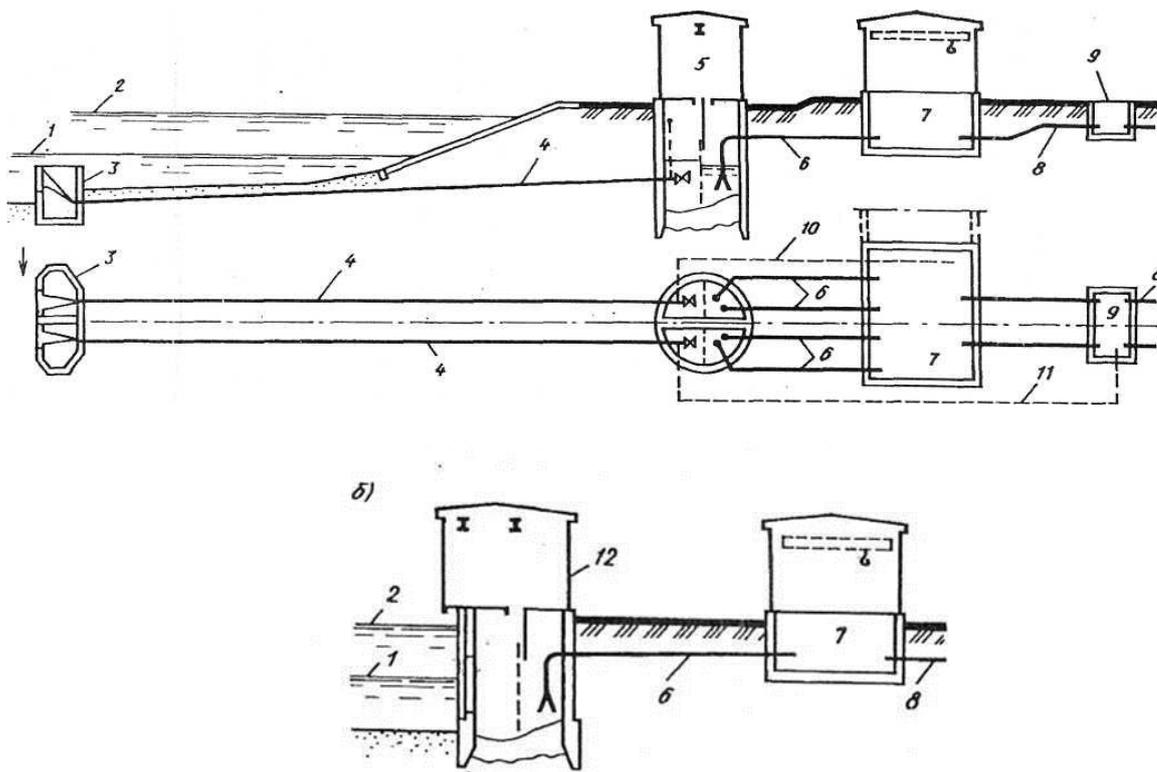
строительства должны быть благоприятными или хотя бы приемлемыми для строительства и эксплуатации сооружений.

Водозабор должен располагаться на достаточно устойчивом участке реки, характеризующемся благоприятными гидравлическими и шуголедовыми режимами речного потока. Благоприятный гидравлический режим должен обеспечить устойчивое сохранение речного потока у сооружений, необходимые глубины и формы русла, транзитное перемещение мимо сооружений наносов, скоплений льда и шуги. Благоприятный режим речного потока наблюдается у вогнутого берега плесовых участков. Здесь наибольшие глубины воды и динамическая ось потока приближены к вогнутому берегу, что в наибольшей мере обеспечивает транзитное движение шуголедовых масс мимо водозабора и меньшую вероятность шугозаполнения русла. Отложение наносов возможно лишь в верхней части плесовой ложбины при смыве гребня расположенного выше переката в межень. Водозабор располагают в пределах третьей четверти излучины реки.

Нежелательно располагать водозабор в плесе ниже незамерзающего зимой переката либо следует предусматривать с целью ликвидации полыньи ее покрытие хворостяным плетнем, соломенными матами и пр. Не допускается размещать водоприемники в зоне движения судов и плотов, в местах зимовки и нереста рыб, скопления плавника и водорослей, возникновения зажоров и заторов, в зоне отложения и жильного движения донных наносов. Не рекомендуется размещать водоприемники на участках нижних бьефов ГЭС, прилегающих к гидроузлу, в верховьях водохранилищ.

Технологическая схема водозаборных сооружений, обычно включающая водоприемник, водоочистной сеточный колодец и насосную станцию, выбирается соответственно требуемому расходу воды, категории водозабора, гидрологическим характеристикам водисточника, топографическим и геологическим условиям, требованиям санитарной инспекции, организаций рыбоохраны и водного транспорта. При выборе схемы водозаборных сооружений надо учитывать и возможное увеличение дебита водозабора в перспективе.

На рис. 5.40-5.42 представлены основные схемы водозаборных сооружений, отличающихся местом расположения водоприемника и компоновкой основных сооружений водозабора. В состав водозаборных сооружений на рис. 5.40, входит русловой затопленный водоприемник, находящийся в некотором удалении от берега (где глубина воды достаточна для его расположения). Водоприемные отверстия таких водоприемников в отдельные периоды года практически недоступны для обслуживания. Водоприемные отверстия берегового незатопляемого водоприемника, показанного на рис. 5.40,6, всегда доступны для обслуживания, что имеет большое значение для обеспечения бесперебойной подачи воды - водозаборными сооружениями. Кроме водоприемников на рис. 5.40 показаны самотечные водоводы (для транспортирования воды от водоприемника на берег), береговой сеточный колодец (предназначенный для расположения в нем водоочистных сеток) и насосные станции I подъема для создания необходимого напора со всасывающими и напорными водоводами, камерами предохранительных устройств и переключений. Водоочистные сетки в водозаборе (см. рис. 5.40,6) располагаются в береговом водоприемнике, что упрощает технологическую схему водозаборных сооружений. Водозаборные сооружения оборудуют плоскими или вращающимися (ленточными) водоочистными сетками; вращающиеся сетки применяют при  $Q_B > 1 \text{ м}^3/\text{с}$ .



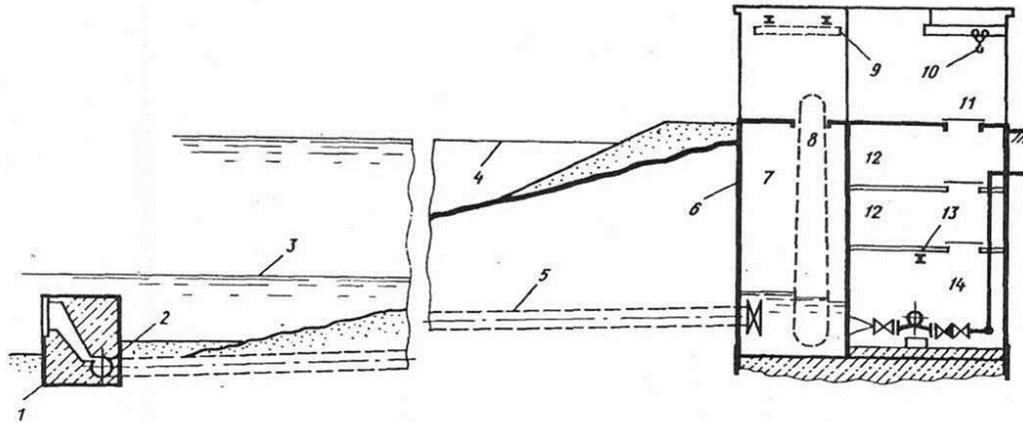
**Рис. 5.40. Схемы водозаборных сооружений**

а - раздельного типа с русловым затоплением водоприемником; б - то же, с береговым незатопленным водоприемником; 1 и 2 - уровни воды минимальный и максимальный расчетной обеспеченности соответственно; 3-русловой затопленный водоприемник; 4 - самотечные водоводы; 5 - береговой сеточный колодец; 6 - всасывающие водоводы; 7 - насосная станция; 8 - напорные водоводы; 9 - камера переключения и предохранительной аппаратуры; 10 и 11 - водоводы для подачи воды на промыв решеток и водоводов обратным током воды; 12 - береговой незатопляемый водоприемник

Схема водозаборных сооружений упрощается при совмещении сеточного колодца и насосной станции в одном здании. Такое совмещение необходимо при применении насосов с малой высотой всасывания и амплитуде колебания уровней воды в реке больше 6- 8 м, а также, как правило, при оборудовании водозаборных сооружений вращающимися сетками.

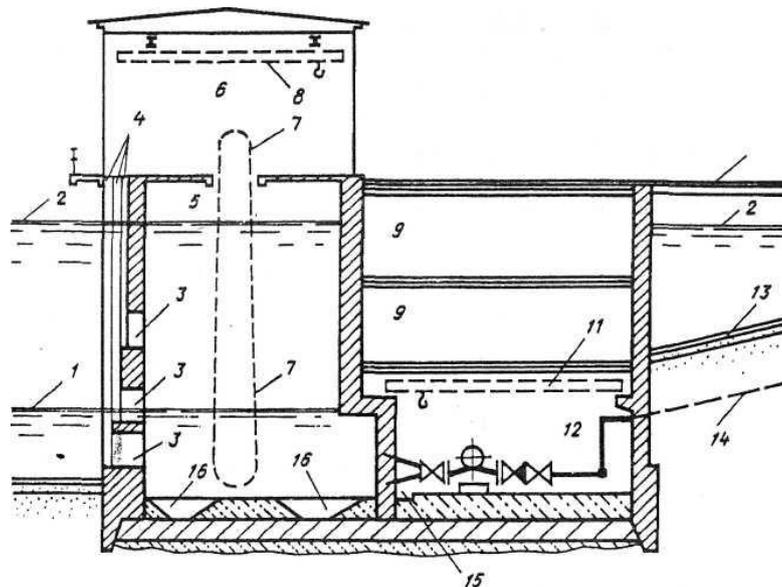
На рис. 5.41 приведена схема водозаборных сооружений совмещенного типа с русловым затоплением водоприемником, на рис. 5.42 - схема берегового водозаборного сооружения совмещенного типа; здесь в одном сооружении совмещены водоприемники, сеточный колодец и насосная станция. Водозаборные сооружения, схемы которых показаны на рис. 5.40, именуют водозаборными сооружениями раздельного типа.

Кроме показанных на рис. 5.40-5.42, применяют водозаборы комбинированного типа (например, с несколькими водоприемниками различных типов - с береговым незатопляемым и русловым затоплением; с двумя ярусами самотечных водоводов и водоприемниками, предназначенными для забора воды в различные гидрологические фазы), с водоприемником с водоприемными отверстиями и с подрусовым приемом воды (инфильтрационным), с водоприемником, имеющим секции с водоприемными отверстиями и секции с фильтрующим приемом воды.



**Рис. 5.41. Схема водозаборных сооружений совмещенного типа с русловым затопленным водоприемником**

1 - затопленный водоприемник; 2 - вихревая камера; 3 и 4 - уровни воды минимальный и максимальный соответственно; 5 - самотечные водоводы; 6 - насосная станция, совмещенная с сеточным зданием; 7 - сеточное отделение; 8 - сетка водоочистная вращающаяся; 9 - кран подвесной однобалочный; 10 - таль; 11 - монтажный проем; 12 - помещения для электрораспределустройств, щитов автоматики; 13 - монорельс для тали; 14 - насосное отделение

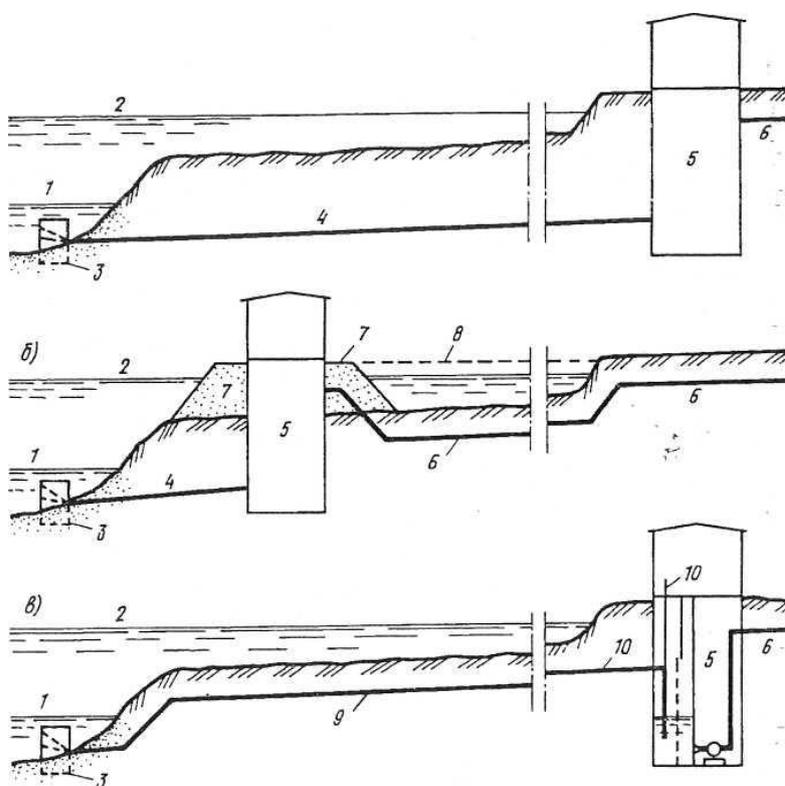


**Рис. 5.42. Береговое водозаборное сооружение совмещенного типа**

1 и 2 - уровни воды минимальный и максимальный соответственно; 3 - водоприемные отверстия; 4 - пазы для установки сороудерживающих решеток, рыбозащитных сеток, затворов и для передвижения промывных устройств; 5 - водоприемно-сеточное отделение; 6 - наземный павильон; 7 - сетка водоочистная вращающаяся; 8 - кран подвесной; 9 - помещения электрораспределустройств, щитов управления и сигнализации, вентиляционных устройств; 10 - служебный мост для сообщения с берегом; 11 - кран мостовой радиальный; 12 - насосное отделение; 13 - берегоукрепление; 14 - напорные водоводы; 15 - канал для сбора профильтрованной воды; 16 - приемки для сбора осадка

При широкой заливаемой в половодье пойме строительство водозаборных сооружений с самотечными водоводами (рис.5.43,а) будет осложнено необходимостью

прокладки водоводов значительной протяженности на большой глубине в сложных гидрогеологических условиях. В этом случае береговые сооружения водозабора можно расположить на островке, отсыпанном на пойменной террасе; самотечные водоводы будут короткими, а напорные пересекут пойму на относительно небольшой глубине (рис. 5.43,б). Сообщение с водозабором будет возможно по дороге, проложенной по пойме вдоль водоводов, а при высоких уровнях воды - с помощью плавсредств (кроме периода ледохода). Дорога может быть проложена и по дамбе, соединяющей островок с коренным берегом. Водоприемник с береговыми сооружениями, располагаемыми на коренном берегу, можно соединить сифонными водоводами (рис. 5.43,в). Береговые сооружения водозаборов (см. рис. 5.43) могут выполняться по схемам водозаборов раздельного или совмещенного типа. Сифонные водоводы допускается применять в водозаборах второй и третьей категорий, а применение их в водозаборах первой категории должно быть обосновано. В отдельных случаях строительство берегового водозабора совмещенного типа ведут в котловане на некотором расстоянии от реки, а воду к сооружению подводят по каналу (рис. 5.44).



**Рис. 5.43. Схемы водозаборных сооружений**

а - с самотечными водоводами; б - с расположением береговых сооружений водозабора на незатопляемом островке; а - с сифонными водоводами; 1 и 2 - уровни воды минимальный и максимальный соответственно; 3 - затопляемый водоприемник; 4 - самотечные водоводы; 5 - береговая насосная станция, совмещенная с сеточным помещением; 6 - напорные водоводы; 7 - островок, насыпанный на пойме; 8 - гребень дамбы; 9 - сифонный водовод; 10 - труба к вакуум-наосу

При заборе больших расходов воды из шугоносных рек применяют водоприемные ковши, поверхность воды в которых покрывается льдом на несколько дней ранее реки. Переохлаждение воды в ковше и образование внутриводного льда прекращаются, а шуга, поступающая с водой из реки, всплывает уже в начале ковша и частично расплавляется за счет притока глубинного тепла земли (рис. 5.45). В отдельных случаях ковши в составе водозаборных сооружений применяют для увеличения относительного отбора воды из реки. По опыту эксплуатации водозаборных сооружений считают, что при относительном водоотборе из реки  $\alpha = Q_{\text{в}} / Q_{\text{min}} < 0,25$  (где  $Q_{\text{в}}$  - расход воды, подаваемой водозабором, а  $Q_{\text{min}}$  - минимальный расход воды в реке) из русел равнинных рек возможен забор воды с помощью затопленных водоприемников.

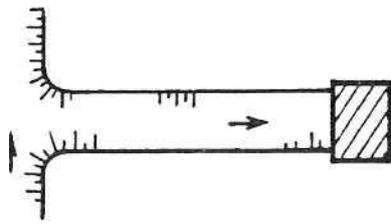


Рис. 5.44. Водозаборные сооружения с водоподводящим каналом

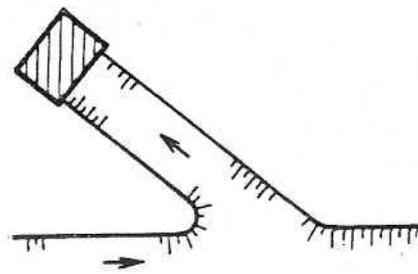


Рис. 5.45. Водозаборные сооружения с водоприемным ковшом

При  $\alpha = 0,25 \dots 0,75$  надежный отбор воды возможен только из незашугованного открытого потока при особо благоприятной форме и состоянии русла. Чаще бывает необходимо строительство русловыправительных и руслорегулирующих сооружений. Величина относительного водоотбора зависит от типа водоприемника, глубины воды при  $Q_{min}$  и ее уменьшении после отбора воды, особенностей русла и шуголедовых условий. При дебите водозабора, превышающем предельный относительный водоотбор, или при недостаточной глубине воды в реке в состав сооружений включают водоподъемную плотину либо в отдельных случаях водоприемный ковш. Для обеспечения бесперебойной подачи воды предусматривают секционирование водозаборных сооружений. Минимальное число секций - две. Водозаборы малой и средней мощности (до  $1-2 \text{ м}^3/\text{с}$ ) обычно устраивают двухсекционными. При большей мощности сооружений число секций может быть больше двух. Например, водозаборное сооружение совмещенного типа мощностью  $5 \text{ м}^3/\text{с}$  (см. рис. 5.65) запроектировано с трехсекционным водоприемно-сеточным отделением. В водозаборах большой мощности число секций может быть принято по числу насосов. Секционирование обязательно для водоприемников, самотечных водоводов, сеточных колодцев и водоприемно-сеточных отделений насосных станций (и желательно для насосных станций при амплитуде колебания уровней воды более  $10 \text{ м}$ ).

В табл. 5.9 приведены рекомендации по применению водозаборных сооружений различных типов

Таблица 5.9

Водозаборное сооружение	Область и условия применения
С русловым водоприемником:	
раздельного типа	Пологий берег; наличие пойменной террасы; отсутствие достаточных глубин у берега; нескальный грунт. Амплитуда колебаний уровней воды в реке до $6-8 \text{ м}$ ; допустимая высота всасывания насосов - более $3-4 \text{ м}$ ; мощность водозабора до $1 \text{ м}^3/\text{с}$
раздельного типа с сифонными водоводами	Большое заглубление самотечных водоводов на большой длине; неблагоприятные геологические и гидрогеологические условия для укладки самотечных водоводов
совмещенного типа	Амплитуда колебаний уровней воды - более $6 \text{ м}$ при мощности водозабора до $1 \text{ м}^3/\text{с}$ ; при мощности $1-6 \text{ м}^3/\text{с}$ - амплитуда любая
С береговым водоприемником:	
раздельного типа	Наличие достаточных глубин в русле у берега; крутой берег; незагрязненность воды у берега. Амплитуда колебаний уровней воды $6-8 \text{ м}$ ; допустимая высота всасывания насосов - свыше $3-4 \text{ м}$ ;

	мощность водозабора - до 1,5 м <sup>3</sup> /с
совмещенного типа	Амплитуда колебаний уровней воды - любая; мощность водозабора - любая; необходимость установки насосов под залив
совмещенного типа с дополнительным русловым водоприемником	Загрязненность воды (в том числе бактериальная) у берега в межень и относительно небольшая загрязненность в половодье; пологий берег; амплитуда колебания уровней воды - любая; мощность водозабора более 1 м <sup>3</sup> /с

В табл. 5.10 приведены категории водозаборных сооружений ( $Q_в = 1...6$  м/с) в зависимости от характеристики природных условий забора воды, типа водоприемника и принятой схемы водозаборных сооружений. По этой таблице проверяют, соответствует ли заданной категории обеспеченности подачи воды принятая схема водозаборных сооружений.

Повышение категории водозаборов с затопленными водоприемниками на единицу допускается в случаях: размещения водоприемника в затопленном самопромываемом водоприемном ковше подвода к водоприемным отверстиям теплой воды (не менее 20 % забираемого расхода воды) и применении специальных насосозащитных устройств; обеспечения надежной системы промыва самотечных водоводов, сороудерживающих решеток и рывозащитных устройств (РЗУ) водоприемников.

Тип водоприемника	Природные условия забора воды								
	легкие			средние			тяжелые		
	при схеме водозаборных сооружений								
	а	б	в	а	б	в	а	б	в
Береговые незатопляемые с водоприемными отверстиями, всегда доступными для обслуживания, с необходимыми ограждающими и вспомогательными сооружениями и устройствами	I	-	-	I	-	-	II	I	I
Затопленные всех типов, удаленные от берега, практически недоступные для обслуживания в отдельные периоды года	I	-	-	II	I	-	III	I	I
Нестационарные устройства:									
плавучие	II	I	-	III	III	II	-	-	-
фуникулерные	III	II	-	-	-	-	-	-	-

**Примечания:** 1. Таблица составлена для водозаборов, устраиваемых по трем схемам:

"а" - в одном створе; "б" - то же, но при нескольких водоприемниках, снабженных средствами борьбы с шугой, наносами и другими затруднениями забору воды; "в" - в двух створах, удаленных на расстояние, исключающее возможность одновременного перерыва забора воды.

2. В водозаборных сооружениях I и II категорий надлежит предусматривать секционирование водоприемной части.

## 16.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Технологическое оборудование водозаборов включает сороудерживающие решетки, водоочистные сетки, насосы с электродвигателями, подъемно-транспортное оборудование, электрооборудование, оборудование для автоматического, телемеханического или местного управления и контроля за функционированием оборудования водозаборных сооружений, отопительно-вентиляционное оборудование, трубопроводную арматуру, а также оборудование для промыва водоприемных отверстий и самотечных водоводов.

**Решетки сороудерживающие** предназначены для задержания сора (водорослей, веток, шугольда). Их устанавливают в водоприемных отверстиях водоприемников. Решетка состоит из сварной рамы, изготовленной из швеллеров или угловой стали и стержней из полосовой стали шириной 40-80 мм и толщиной 6-10 мм, расположенных вертикально с расстоянием между стержнями 50-60 мм (рис. 5.46). Решетки часто располагают в вертикальной плоскости в боковых стенках водоприемника. При расположении стержней решетки под некоторым углом к направлению течения воды в реке, например  $135^\circ$ , сор и скопления шуги при небольших скоростях втекания воды мало засоряют решетку. На рис. 5.47 изображены схемы втекания воды в водоприемные отверстия. На рис. 5.47,а показано втекание воды между стержнями с небольшим углом поворота струй; втекание происходит плавно и именно поэтому наблюдается «прочное» прижатие к решетке сора, имеющего размеры, большие ширины просвета между стержнями решетки. При  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 5.47,б) образуется валец у стержня с верхней стороны и происходит искривление струй у низового. При  $\alpha = 135^\circ$  водоворотная зона увеличивается и в большей степени искривляются струи у низового стержня (рис. 5.47,в). Вследствие пульсации скорости водоворотная зона занимает то меньший, то больший объем между стержнями. Можно даже говорить о некотором объеме воды, вытекающей у низового стержня. Именно эта вытекающая вода не дает частицам сора плотно держаться на решетке и вследствие пульсации скорости сор и скопления шугольда передвигаются по решетке и уносятся течением воды в реке.

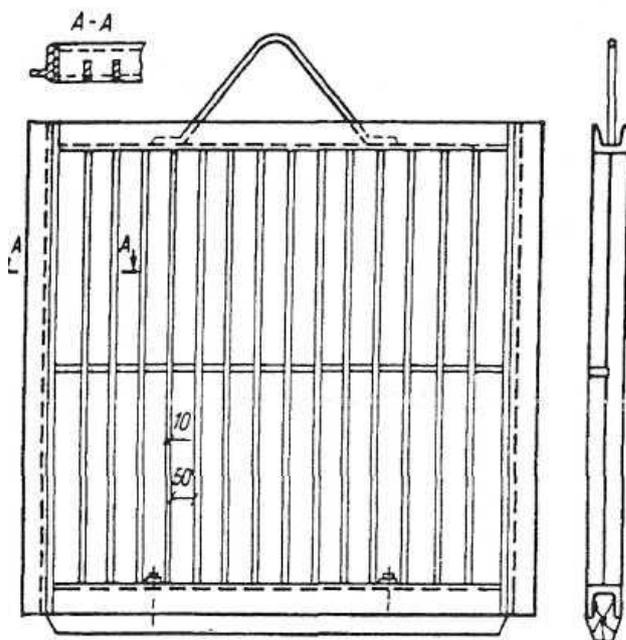


Рис. 5.46. Решетки сороудерживающие для водоприемных отверстий размером 400x600, 600x800 и 800x1000 мм

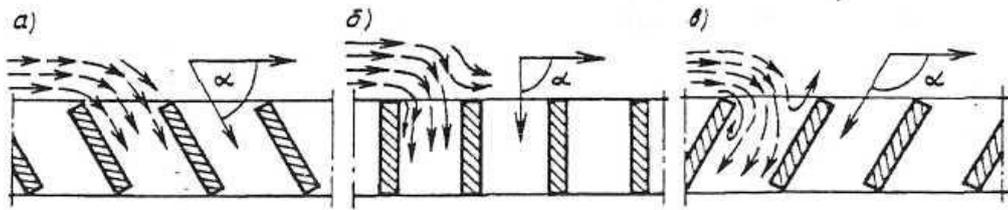


Рис. 5.47. Схемы втекания в водоприёмные отверстия, оборудованные решетками  
 а - при  $< 90^\circ$ ; б - при  $= 90^\circ$ ; в - при  $135^\circ$

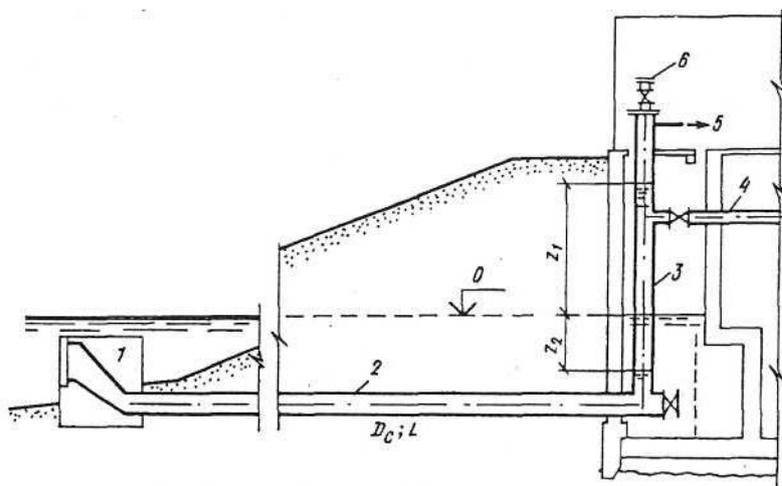
Очистка решеток от сора производится вручную после их подъема из воды. Возможна их очистка граблями с плавсредств или со льда. Для промыва решеток предусматривают необходимое оборудование.

Для установки решеток в отверстиях водоприемников наиболее часто используют направляющие из швеллеров.

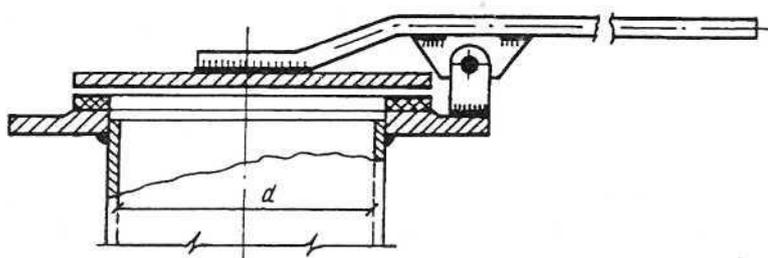
Сорудерживающие решетки водоприемников могут промываться обратным током воды и волновыми импульсами (импульсный промыв). Для промыва обратным током желательна подача увеличенного на 25-50 % (по сравнению с забираемым) расхода воды. Для этого в водозаборе (см. рис. 5.39,а) включают резервный насос (к двум работающим) и открывают перепускную задвижку в береговом колодце; затем закрывают задвижку на промываемом самотечном водоводе и открывают задвижку в насосной на водоводе 10. При трех работающих насосах (суммарная подача  $1,5 Q_B$  возможно подать на промыв  $0,8 Q_B$ , сократив подачу потребителю до  $0,7 Q_B$ . При расходе воды  $1,5 Q_B$  во втором водоводе (произойдет промыв его от наносов прямым током воды) потери напора в нем возрастут в 9 раз и в межень такой режим промыва не осуществим.

Кратковременно на промыв можно будет подать  $0,6 Q_B$ , а потребителю -  $0,4 Q_B$  (учитывая малую продолжительность промыва решеток). На рис. 5.39,а приведен вариант с подачей воды на промыв и от камеры переключений по водоводу 11.

Промыв решеток волновыми импульсами (импульсный промыв) не требует расходования воды из напорных коммуникаций и по действующей секции в двухсекционном водозаборе может быть подан расход воды, близкий к  $Q$ . Для импульсного промыва в береговом сооружении водозабора располагают вакуум-стояки диаметром  $D$ , присоединенные к самотечным водоводам перед задвижками (рис. 5.48). В верхней части стояков к заглушке присоединяют задвижку диаметром  $d$  и клапан для впуска воздуха. Воздух из стояка откачивается вакуум-насосом и уровень воды в стояке поднимается на высоту  $z_1 = P_{\text{вак}} / \rho g$ . Закрывают задвижку на самотечном водоводе и открывают клапан; воздух поступает в стояк, а уровень воды в нем быстро снижается. Скорость течения воды в стояке и водоводе возрастает от нуля до значения  $v_{\text{max}}$ . Уровень воды останавливается на высоте  $z_2$  ниже нуля, а затем вода течет обратно в стояк и останавливается на высоте  $z_2$  завершая первый период колебательного движения жидкости продолжительностью  $T$ . Вследствие гидравлического трения  $z_3 < z_2 < z_1$ . Затем происходит еще несколько затухающих колебаний жидкости.



**Рис. 5.48**  
**Оборудование водозаборных сооружений устройствами для импульсного промыва**  
 1 - водоприемник; 2 - самотечный водовод; 3 - вакуум-стояк; 4 - подвод воды для промыва обратным током воды; 5 - труба к вакуум-наосу; 6 - клапан для впуска воздуха в вакуум-стояк



**Рис. 5.49.** Клапан простейшей конструкции для впуска воздуха в вакуум-стояк

Наибольшее воздействие вытекающей жидкости на сор происходит в середине первого полупериода ее колебания при максимальной скорости течения жидкости. Волновой импульс воздействует на всю решетку независимо от степени ее засорения, а оторванный сор уносится течением в реку. Импульсный промыв характеризуется малой продолжительностью основных и подготовительных операций и незначительной стоимостью оборудования.

Диаметр стояка  $D$  рекомендуется назначать равным диаметру самотечного водовода или несколько большим, а диаметр клапана для впуска воздуха равным  $0,8-0,171D$ . К вакуум-стояку может быть присоединен водовод для промыва обратным током воды. Стояк можно расположить и вне сеточного помещения водозабора, например при его реконструкции. Быстродействующий клапан для впуска воздуха показан на рис. 5.49. При нажатии рукой на рычаг диск поднимается, открывая воздуху доступ в вакуум-стояк. Для впуска воздуха в вакуум-стояк можно применять пробковые краны большого диаметра.

Водозабор целесообразно оборудовать коммуникациями для промыва обратным током воды и устройствами для импульсного промыва. Для автоматической сигнализации о необходимости промыва применяют дифференциальные манометры с передачей импульса о перепаде уровней воды до и после решетки.

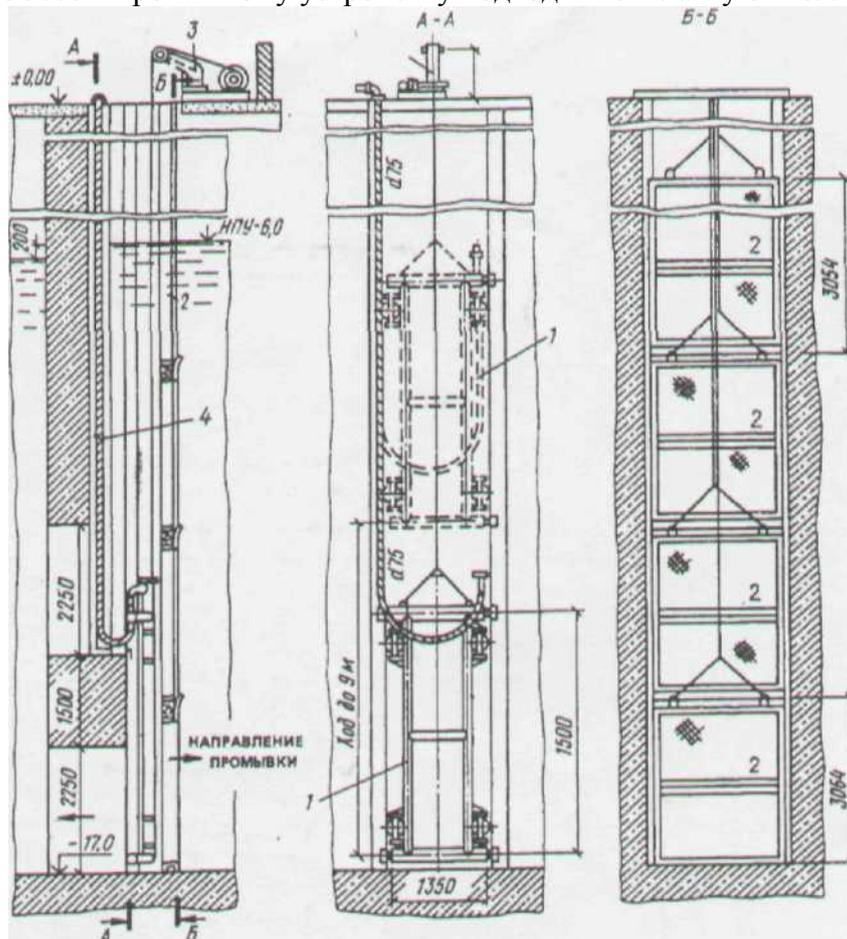
Технические мероприятия по защите от обмерзания решеток включают: забор воды с малыми скоростями втекания; покрытие решеток гидрофобными обмазками, резиной; обогрев решеток (с поступлением шуги в водоприемник и в береговые сооружения, оборудованные вращающимися сетками); козырьки и плавучие запаны у водоприемника; воздушно-пузырьковые завесы; фильтрующие водоприемники; сброс теплой воды в реку у водоприемника.

Рыбозащитные устройства (РЗУ) предназначаются для защиты молоди рыб от попадания в водозаборные сооружения. Фильтрующими и сетчатыми РЗУ оборудуют водоприемные отверстия водоприемников. При этом скорость течения воды на подходе к РЗУ не должна превышать крейсерской скорости плавания рыб, которая в 1 с ориентировочно может быть принята равной  $v \leq 4l$ , где  $l$  - длина тела рыб. При отсутствии

данных о длине тела рыб скорость течения воды на подходе к РЗУ принимается равной 0,1 м/с для водотоков и 0,05 м/с для водоемов.

Эффективная промывка РЗУ от сора очень важна, так как при эксплуатации засоренного РЗУ значительно снижается его рыбозащитная эффективность и возникает опасность прорыва сетчатого полотна.

На рис. 5.50 представлена установка плоской рыбозащитной сетки с промывным устройством в береговом водозаборе. Промывное устройство выполнено в виде рамы из трубчатых элементов, снабженной роликами для возвратно-поступательного перемещения в пазовых устройствах. Нижний элемент рамы имеет отверстия, ориентированные к сетке для создания потока промывной воды ножевой формы. Лебедка с электроприводом перемещает промывное устройство со скоростью 5 см/с, при этом тросом соединяют два промывных устройства в соседних водоприемных отверстиях. При подъеме одного промывного устройства второе служит противовесом и опускается. Воду с давлением 0,3 МПа и расходом 30 л/с к промывному устройству подводят по шлангу от коллектора.



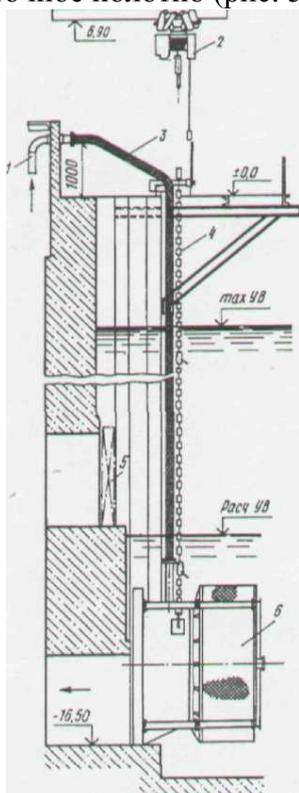
**Рис. 5.50. Плоская рыбозащитная сетка с промывным устройством**  
1 - промывное устройство; 2 - рыбозащитные сетки; 3 - лебедка; 4 - шланг

Водоприемные отверстия водозабора (рис. 5.51) оборудуют механическими, струереактивными РЗУ, выполненными в виде сетчатого барабана, смонтированного на плоском стальном щите, устанавливаемом в пазовые устройства берегового водозабора. Промывное струе реактивное устройство выполнено из перфорированных стальных труб в виде рамы, вращающейся на двух подшипниках внутри барабана вокруг горизонтальной оси. Воду к промывному устройству подводят по шлангу через внутренний подшипник. Отверстия промывного устройства располагают под небольшим углом к сеточному полотну, чтобы обеспечивать вращение промывного устройства возникающей реактивной силой. При высоких уровнях воды невозможна установка РЗУ в водоприемных отверстиях второго яруса.

Для целей рыбозащиты можно также использовать фильтры с различной зернистой загрузкой (щебень, гравий, керамзит, зерна из пластмасс). При этом фильтры могут быть стационарными, как, например, у ряжевых фильтрующих водоприемников с загрузкой камнем крупностью около 15 см, или съемными. Рыбозащитные съемные фильтры, устанавливаемые на период ската рыбной молоди в пазовых устройствах водоприемника, могут быть выполнены в виде контейнеров, в том числе и с горизонтальным течением воды через фильтры.

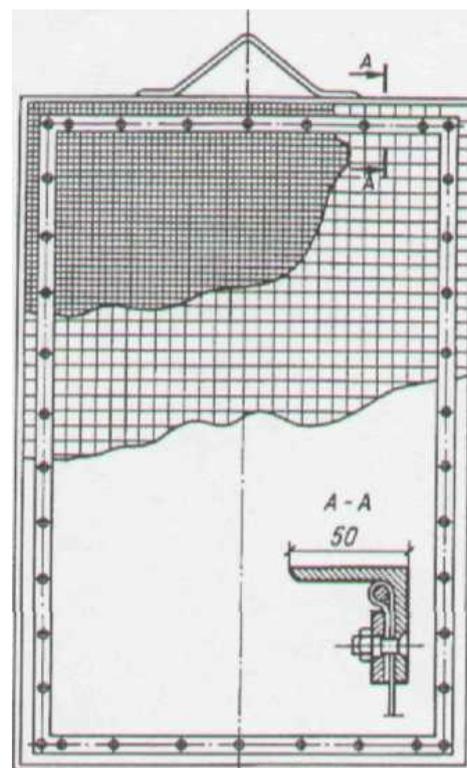
Сетки водоочистные служат для задержания мелкого сора, прошедшего через решетки. Сетки плоские съемные применяют при малой пропускной способности водозаборных сооружений (до  $1 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Сетка состоит из металлической рамы, изготовленной из уголкового стали, к которой крепится сеточное полотно (рис. 5.52).



**Рис. 5.51. Цилиндрическая барабанная рыбозащитная сетка**

1 - подача промывной воды; 2 - таль электрическая; 3 - шланг для подачи промывной воды к сетке; 4 - цепь для подъема сетки; 5 - затвор; 6 - барабанная сетка



**Рис. 5.52. Водоочистная сетка плоская для отверстий размером от 0,4х 0,6 до 1х1,25 м.**

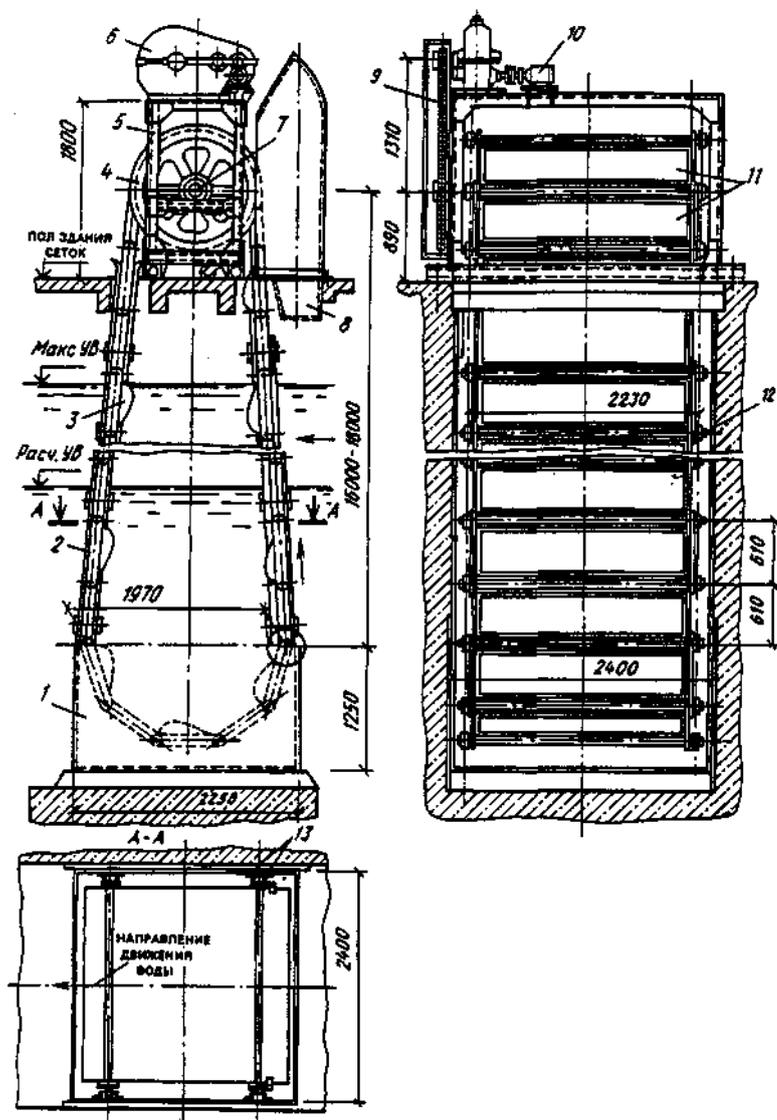
Рабочее полотно сетки с ячейками размером  $2 \times 2 - 5 \times 5$  мм от выпучивания поддерживается полотном сетки с ячейками  $20 \times 20$  мм и более. Рабочее полотно сетки выполняют из тонкой стальной нержавеющей проволоки или другого коррозионно-стойкого материала (бронза, латунь), а поддерживающее - из стальной оцинкованной проволоки  $d = 3$  мм.

Для промыва сетки поднимают из воды, устанавливают в ванну с экраном и промывают вручную струей воды из брандспойта. Перед подъемом рабочей сетки на промыв должна устанавливаться запасная сетка.

Недостатком плоских сеток является сложность механизации промыва. Для исключения их частой промывки в половодье целесообразно применять сетку большей

высоты, а при небольшой амплитуде колебания уровней в реке - даже сетку на всю высоту сеточного помещения.

Сетки ленточные вращающиеся применяют для процеживания воды при пропускной способности водозаборных сооружений более  $1 \text{ м}^3/\text{с}$ , а также при средних, тяжелых и очень тяжелых природных условиях засоренности воды и источнике (рис. 5.53).



**Рис. 5.53.**  
**Вращающаяся водоочистная сетка бескаркасная с лобовым подводом воды**  
 1 - порог; 2 - пластинчатые шарнирные цепи; 3 - ковшовая секция сетки; 4 - грузовая шестерня; 5 - рама привода; 6 - редуктор; 7 - грузовой вал; 8 - сточный желоб; 9 - цепная передача; 10 - электродвигатель; 11 - секции сетки; 12 - ось с роликом; 13 - направляющие

Вращающиеся сетки состоят из отдельных секций (рамок высотой около 600 мм с сеточным полотном), соединенных шарнирно между собой и закрепленных на двух замкнутых транспортерных роliko-втулочных цепях. Во избежание протекания неочищенной воды через зазоры между секциями предусматривают гибкое межсекционное уплотнение или козырек, который обеспечивает зазор с осью секции не более 3 мм. Транспортерные цепи навешивают на две шестерни на грузовом валу, который приводят во вращение электродвигателем через редуктор.

Преимущество вращающихся сеток в том, что подъем и промыв сеток механизированы, а включение их на промыв легко автоматизировать. Вначале предусматривается подача воды на промыв и лишь затем по сигналу от датчика давления на промывной трубе сетка приводится в движение.

Промывочное устройство состоит из трубы с рассеивающими насадками, расположенными в два ряда. Струями воды из насадок смывают с сеточного полотна сор, который вместе с промывной водой попадает в грязевой желоб. Воду для промыва подают

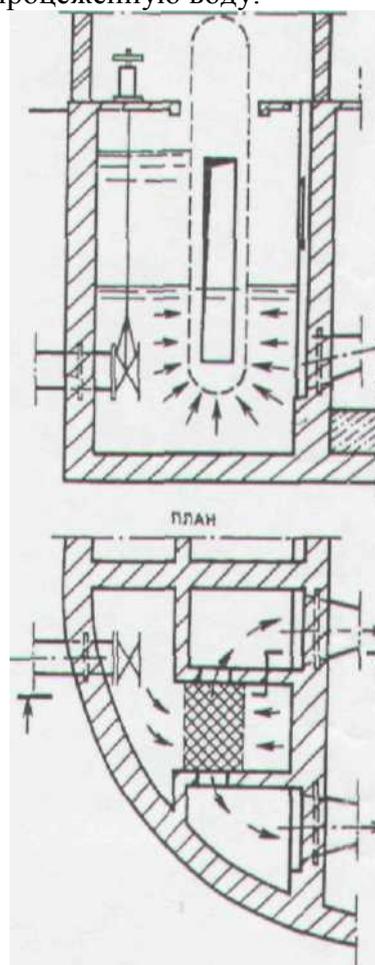
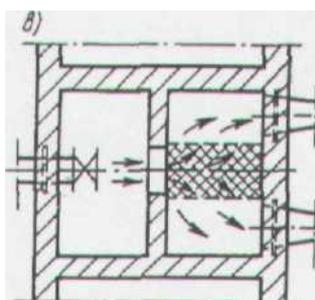
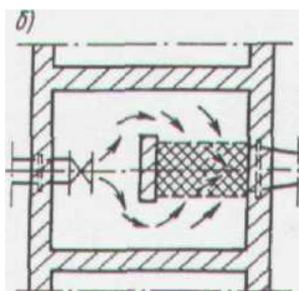
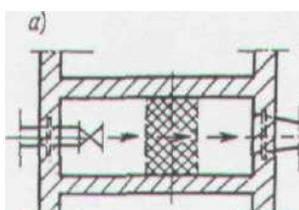
под давлением 0,3-0,4 МПа, расход промывной воды составляет 15- 20 л/с. Скорость движения сетки зависит от засоренности воды и составляет 4-10 см/с.

Качество очистки воды от сора и загрязнений, а также компоновка сеточного помещения в значительной степени определяются схемой подвода неочищенной воды к сетке и отвода от нее процеженной. По способу подвода к сеткам неочищенной воды, и отвода от них чистой различают сетки (рис. 5.54) с подводом воды: лобовым (подвод воды осуществляется по нормали к поверхности сеток, а процеживание происходит через два сеточных полотна); внешним; внутренним и лобово-внешним. К сетке с лобово-внешним подводом вода притекает так же, как к сетке с лобовым подводом, но некоторое количество воды протекает под нижней частью сетки и поступает на процеживание через второе полотнище с внешней стороны. Отвод процеженной воды осуществляется изнутри сетки.

Сеткам с внутренним подводом воды свойственны недостатки: 1) внутри сетки накапливается сор, удаление которого невозможно без разборки сетки; 2) к засоренной поверхности сеточного полотна нет доступа; 3) затруднен доступ к расположенному внутри сетки желобу, отводящему промывную воду с сором; 4) неудовлетворительная структура течения воды в сеточном помещении; 5) большая площадь сеточного помещения в плане (на 30-40 % больше площади сеточного помещения для сеток с лобовым подводом; 6) неравномерность засорения сеточных полотен по ширине.

Недостатки, указанные в пп. 3-6, свойственны также сеткам с внешним подводом воды, а в п.п. 4-6 - с лобово-внешним подводом воды.

Недостатками сеток с лобовым подводом воды являются следующие: задержание сора происходит только на первом по течению воде пологие; при неудовлетворительном промыве возможен перенос сора и загрязнений в процеженную воду.



**Рис. 5.54. Вращающиеся сетки с лобовым (а), внешним (б), внутренним (в) и лобовым внешним подводом воды**

Для устранения последнего недостатка устанавливают два промывных устройства - на восходящем и нисходящем сеточных полотнах. Простота компоновки сеточного помещения, благоприятная гидравлическая структура потока воды и малая площадь в плане сеточного помещения компенсируют первый недостаток сеток с лобовым подводом и обуславливают частое их применение. Часть секций делают ковшеобразной формы для удаления из сеточного помещения скоплений шугольда, прошедших через решетки (см. рис. 5.53).

Вращающиеся ленточные сетки разделяют на каркасные и бескаркасные. Каркасные сетки характеризуются большими массой и стоимостью; бескаркасные - простой конструкцией, простотой монтажа, меньшими массой (на 30-40 % легче каркасных) и стоимостью (поэтому их применение более предпочтительно). Вес сетки передается на грузовой вал приводного механизма, устанавливаемого на перекрытии водозабора. Для передвижения сетки на стенах сеточного помещения закрепляют направляющие из уголковой стали, между которыми передвигаются ролики секции транспортерной цепи. В нижней части направляющие делают изогнутыми (полукруглой формы).

Насосы для водозаборных сооружений наиболее часто применяют центробежные с приводом от электродвигателей. Для водозаборных сооружений малой пропускной способности (до  $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ ) применяют насосы марки К, большей - марки Д. При применении насосов с вертикальным валом насосное оборудование удастся расположить более компактно. Такой же эффект достигается при применении насосов для артезианских скважин и пропеллерных насосов.

Кроме основных в водозаборных сооружениях устанавливают вспомогательные насосы, в том числе вакуум-насосы для откачки воздуха из всасывающих водоводов и корпусов основных насосов и заполнения их водой перед пуском (при установке насосов выше минимального уровня воды), насосы для откачки осадка из сеточных отделений и для их опорожнения при проведении ремонтных работ, насосы-повысители напора для промыва вращающихся сеток (при недостаточности напора основных насосов), насосы для откачки из насосной станции профильтрованной воды (включение их должно быть автоматизировано).

Подъемно-транспортное оборудование применяют для монтажа технологического оборудования и трубопроводов, а также при ремонтных работах. При массе поднимаемого груза от 5 т предусматривают тать ручную, перемещающуюся с помощью вошки по монорельсу, или кран подвесной однобалочный; при массе груза более 5 т - кран мостовой ручной. Электрическое крановое оборудование применяют при подъеме груза на высоту более 6 м или при длине кранового пути более 18 м.

Грузоподъемность кранового оборудования определяют исходя из максимальной массы перемещаемого оборудования; при отсутствии требований заводов-изготовителей к транспортированию оборудования только в собранном виде грузоподъемность крана определяют по наибольшей массе части оборудования.

**Тали** выпускают подвесные с червячным или шестеренным механизмом подъема, передвижные ручные (без механизма и с механизмом передвижения) и электрические (с ручным и электрическим механизмом передвижения). Из подвесных талей предпочтение следует отдавать таям червячным, поскольку они имеют более простую и надежную конструкцию и дешевле шестеренных.

Тали электрические представляют собой самоходную тележку, передвигающуюся по подвесному монорельсу из двутавра. К тележке снизу крепится канатный барабан с редуктором, электродвигателем и тормозным устройством. Управляют талью с пола подвесным переключателем. Высота подъема талей составляет разность отметок

наивысшего положения крюка и пола сооружения. В грузоподъемность тали входят масса груза и масса устройств для строповки.

**Кошки** предназначены для подвешивания тали и перемещения груза по подвесному пути (монорельсу) из двутавра. Кошка грузоподъемностью 1 т передвигается по двутаврам № 16; 18 и 20 (при радиусе закругления пути не менее 1,5 и); расстояние от низа двутавра до грузовой траверсы составляет 80 мм. Масса подъемного механизма, подвешиваемого к кошке, в ее грузоподъемность не входит.

**Краны подвесные однобалочные** наиболее употребительны в водопроводных сооружениях, так как для них не требуются подкрановые пути, что упрощает строительную часть сооружения. Кран подвесной однобалочной представляет собой отрезок двутавра, подвешенный к двум кареткам, каждая из которых передвигается по подвесному крановому пути на двутавра (прикрепляемому снизу к балкам перекрытия). По балке крана (двутавру), на которой находятся каретки и механизм перемещения крана, движется ручная или электрическая таль для подъема груза.

Краны подвесные однобалочные ручные выпускаются грузоподъемностью 0,5-5 т, длиной 3,6-11,4 м с высотой подъема груза 3-12 м; электрические - грузоподъемностью 1-5 т, длиной 3,6-18 м с высотой подъема груза 6-36 м при скорости его подъема 0,13 м/с, скорости передвижения тали 0,33 м/с и передвижения крана 0,5 м/с.

**Краны мостовые** (ручные и электрические) в зависимости от грузоподъемности и пролета изготовляют одно - и двух балочными. Подкрановые пути укладывают на консоли колонн или пилястры стен. Краны мостовые ручные изготовляют грузоподъемностью 3,2; 5 и 8 т, пролетом 4,5; 7,5; 10,5; 13,5 и 16,5 м ( допускается изготовление кранов с увеличенными на 0,5 м пролетами для подъема грузов на высоту до 12 м}. Краны электрические выпускают грузоподъемностью 5 и 10 т пролетом 11-32 м.

**Краны мостовые радиальные** (поворачивающиеся вокруг центральной опоры) предназначены для установки их в насосных станциях круглой формы в плане. Краны мостовые радиальные грузоподъемностью 5 и 8 т с ручным приводом состоят из двутавровой балки, по которой передвигается таль с ручным приводом. Балка с одной стороны заканчивается цапфой с радиально-сферическим подшипником, воспринимающим вертикальную нагрузку от груза и крана и передающим ее на центральную опору; с другой - несущая балка соединена с торцевой балкой (изогнутой в плане), которая оборудована колесами (приводным и холостым), передвигающимися по круговому рельсу. Торцевая балка с несущей, соединена подкосами. На одном подкосе расположен приводной механизм (ручной) передвижения крана.

**Задвижки** подразделяют на параллельные и клиновые с выдвигным и не выдвигным шпинделем, с ручным или электрическим приводом.

**Клапаны обратные поворотные** используют для того, чтобы после выключения насоса через него не происходило движение воды в обратном направлении. Обратный клапан устанавливают на напорном трубопроводе между насосом и запорной арматурой. Обратные клапаны устанавливают также на напорных водоводах, около насосных станций для защиты их от затопления при нарушении герметичности коммуникаций в насосной станции. Клапаны обратные поворотные, так называемые «безударные», устанавливают на горизонтальном трубопроводе с горизонтальным расположением оси диска, на вертикальном - с подачей воды под диск. Клапаны диаметром 50-600 мм присоединяют к трубе с ответными фланцами, стягиваемыми шпильками. Клапаны диаметром 800-1000 мм фланцевые с противовесом устанавливают только на горизонтальном трубопроводе.

**Клапаны предохранительные**, применяемые на напорных водоводах, включают клапаны пружинные и рычажные (для защиты от повышенного давления), гасители гидравлического удара, клапаны для впуска и заземления воздуха (для предотвращения вакуума и для смягчения гидравлического удара), клапаны для впуска и выпуска воздуха.

**Клапаны приемные обратные** устанавливают на всасывающей трубе, насоса для заполнения трубы и насоса подои перед пуском, а также для предохранения насоса от

попадания в него крупного сора. Выпускают обратные приемные клапаны с сеткой чугунные  $D = 50...400$  мм для воды с  $t < 50^{\circ}\text{C}$  на  $P - 0,25$  МПа. К недостаткам клапанов относятся большое гидравлическое сопротивление и сложность их очистки при эксплуатации. Последнее обстоятельство не позволяет применять эти клапаны на водозаборах I и II категорий, а для водозаборов III категории ограничивает их применение диаметром в 200 мм.

## 16.6. ВОДОПРИЕМНИКИ

Водоприемник - это сооружение, входящее в комплекс водозаборных сооружений и предназначенное для непосредственного приема воды из источника водоснабжения.

Водоприемники классифицируют: *по способу приема воды* - открытые поверхностные, глубинные, донные, фильтрующие, инфильтрационные и комбинированные; *по месту расположения* - береговые и русловые; *по конструктивным особенностям* - ряжевые, свайные, трубчатые, бетонные, железобетонные, бетонные в металлическом кожухе, с вихревыми камерами и т.д.; *по расположению относительно минимального и максимального уровней воды* - затопленные, затопляемые и незатопляемые; *по расположению водоприемных отверстий и направлению втекания в них воды* - с горизонтальными, вертикальными или наклонными отверстиями, с лобовым, боковым, низовым, а также с односторонним, двухсторонним и круговым втеканием воды. Русловые затопленные водоприемники (удаленные от берега), характеризуются тем, что их водоприемные отверстия практически недоступны для обслуживания в отдельные периоды года {ледоход, шугоход, шторм и др.) и труднодоступны в остальное время. Несмотря на их меньшую надежность, затопленные водоприемники находят широкое применение в практике водоснабжения, а необходимую бесперебойность приема воды обеспечивают за счет применения дополнительных мер.

Водоприемники незатопляемые с водоприемными отверстиями, всегда доступными для обслуживания, в большей степени могут обеспечить бесперебойность водоснабжения, но стоимость их существенно превышает стоимость затопленных. Особенно высокой стоимостью и сложностью строительства характеризуются русловые незатопляемые водоприемники (рис. 5.55). Вследствие расположения в русло реки они должны обладать достаточной прочностью и устойчивостью, чтобы выдержать статическое и динамическое давление льда; этим объясняется достаточно редкое их использование.

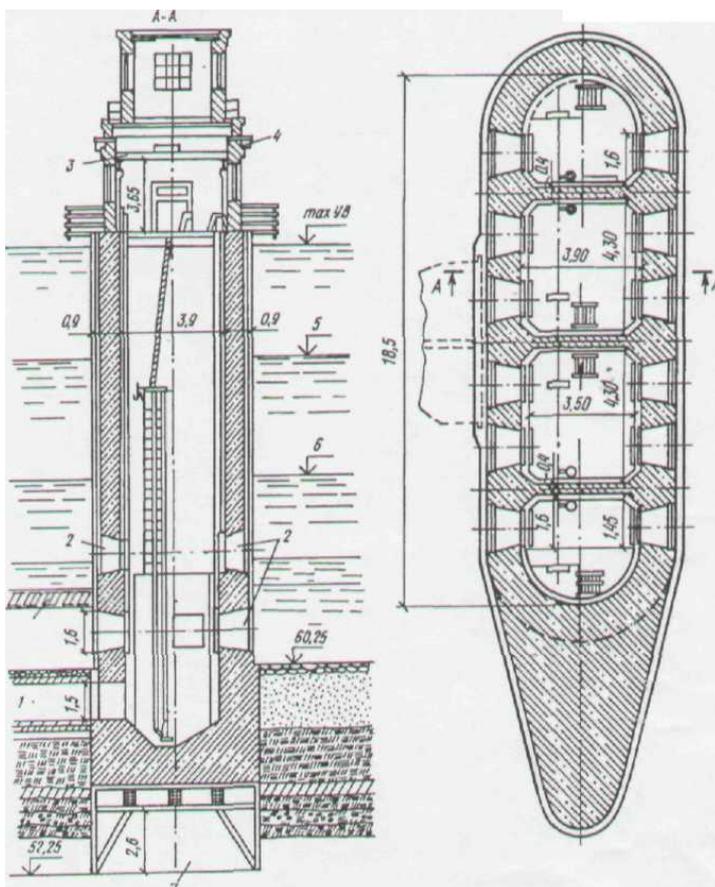


Рис. 5.55. Незатопляемый водоприемник  
 1 - самотечная галерея 2 водоприемные отверстия; 3 - кран мостовой; 4 - кошка с талью; 5 и 6 - максимальный и минимальный уровни ледохода; 7 - заполнен бетоном после опускания кессона.

Гораздо чаще незатопляемые водоприемники применяют в береговых водозаборах раздельной, или совмещенной компоновки (см. рис. 5.41 и 5.42).

Затопляемые водоприемники могут располагаться у берега или в русле реки. Практика эксплуатации таких водоприемников показывает, что по своей надежности они близки к незатопляемым, так как лишь в отдельные непродолжительные периоды года (половодье, паводки) их водоприемные отверстия недоступны для обслуживания. Следует также учитывать, что в эти периоды осложнений с забором воды вследствие обмерзания сороудерживающих решеток не бывает. СНиПом применение затопляемых водоприемников не регламентировано, поэтому в табл. 5.10 водозаборные сооружения с такими водоприемниками не упомянуты.

Различно ориентированные отверстия по-разному засоряются водорослями, сором, поверхностной и глубинной шугой, различно и поступление в отверстия донных наносов; по-разному происходит и промыв сороудерживающих решеток в водоприемных отверстиях. Эффективность функционирования водоприемных отверстий зависит от расположения их относительно уровня воды и направления течения воды в водоисточнике, а также от скорости втекания воды в отверстие.

Горизонтальные отверстия могут располагаться на некоторой высоте над дном с втеканием воды в отверстие сверху вниз или снизу вверх, а при расположении отверстий у дна вода втекает только сверху вниз. В водоприемниках с горизонтальным расположением отверстий при втекании воды сверху вниз труднее удаляется сор с решеток, возможно образование водоворотов с воронками над отверстием, вследствие чего в водоприемник будет поступать вода с сором из поверхностного слоя. При втекании воды снизу вверх вода поступает в основном из придонного слоя; задержанный на решетках сор легко удаляется при промывке, иногда для очистки решеток достаточно кратковременно приостановить забор воды. Донный прием воды (втекание воды сверху вниз в горизонтальные отверстия, расположенные на одном уровне с дном, или с

незначительным возвышением над ним) применяют вынужденно при очень малых глубинах воды в водоисточнике.

Водоприемники с отверстиями в вертикальной плоскости различаются по направлению втекания воды относительно направления течения воды в реке: с лобовым, низовым и боковым втеканием (приемом) воды. Лобовой прием воды применяют крайне редко из-за быстрого засорения сором, шугой и трудности промыва таких отверстий. Низовой прием воды с непромываемым порогом нежелателен вследствие отложения донных наносов у водоприемника и последующего их поступления в водоприемник. При низовом приеме воды в отверстия с промываемым порогом обеспечиваются благоприятные условия для транзитного движения по руслу шуги и наносов. Но при заборе сколько-нибудь значительных расходов воды сложнее выполняется условие наименьшего стеснения живого сечения речного потока, поэтому водоприемники с такими отверстиями применяют лишь при заборе относительно небольших расходов воды.

Наиболее часто применяют водоприемники с отверстиями в продольных стенках водоприемников, т.е. осуществляют боковой прием воды. При этом сородерживающие решетки располагаются параллельно направлению течения воды в реке. В этом случае при промыве решеток достаточно добиться отрыва и удаления на незначительное расстояние сора от решетки - сор будет подхвачен транзитным течением воды в реке.

При определении размеров водоприемника следует учитывать, что водоприемник должен иметь обтекаемую форму и в наименьшей степени стеснять сечение потока реки во избежание возможного переформирования русла реки у водозаборных сооружений.

Водоприемники русловые затопленные применяют при пологих берегах, т.е. в тех случаях, когда необходимые для расположения водоприемника под уровнем воды глубины находятся на некотором (иногда значительном) расстоянии от уреза воды при минимальном ее уровне. Минимальная глубина воды в реке для размещения водоприемника (рис. 5.56) составит:

для летнего периода,  $H$ , м:

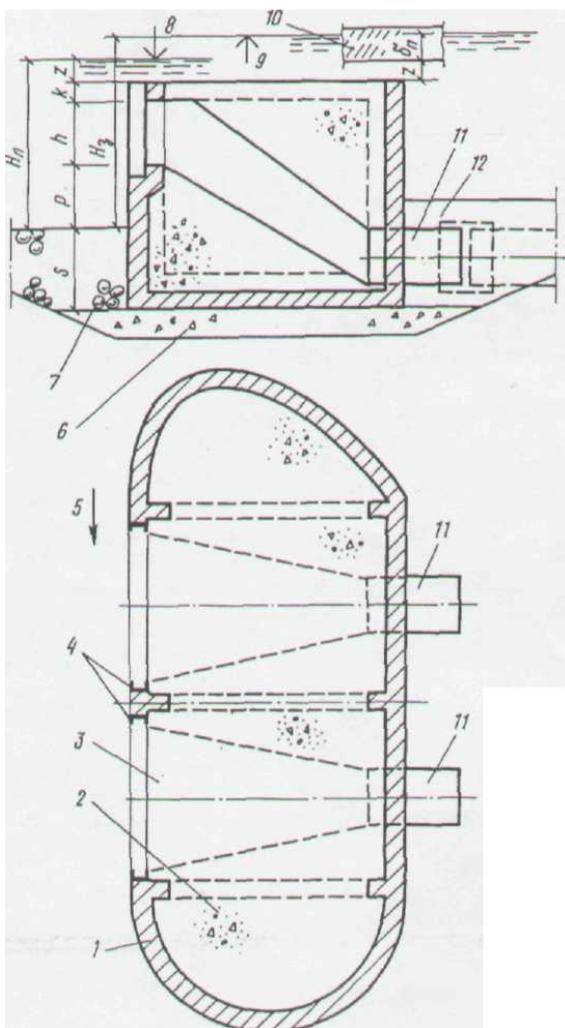
$$H_l - p + h + k + a,$$

- где  $p$  - порог водоприемных отверстий (расстояние от длины реки до низа водоприемных отверстий), составляющий не менее 0,5 м; с учетом возможного отложения донных наносов у водоприемники и для уменьшения поступления воды ил придонных слоев, имеющих большую мутность, обычно назначают  $p = 0,7 \dots 1,5$  м;
- $h$  - высота водоприемного отверстия, м;
- $k$  - расстояние от верха водоприемника до водоприемного отверстия;  $k$  0,2 м (зависит от конструкции водоприемника);
- $a$  - расстояние от верха водоприемника до уровня воды или до ложбины (подошвы) волны (при волнении - не менее 0,3 м) или до нижней поверхности льда (не менее 0,2 м);

для зимнего периода,  $H_z$ , м:

$$H_l - p + h + k + a + b_n$$

- где  $b_n$  - глубина погружения льда под уровень воды;
- $b_n = b (p_l / p_v)$ , здесь  $b$  - толщина льда,
- $p_l$  и  $p_v$  - плотность льда и воды, соответственно 0,9 и 1 т/м<sup>3</sup>.



**Рис.5-56. Затопленный водоприемник**

1 - корпус; 2 - заполните корпуса тощим бетоном; 3 - водоприемное отверстие 4 - направляющие швеллера; 5 - направление течения воды в реке; 6 - щебеночная подготовка; 7 - заполнение пазух строительного котлована наброской камней; 8 и 9 -минимальные уровни воды летний и зимний соответственно; 10 - лед; 11 - патрубок водоприемника; 12 - соединительная муфта

Заглубление водоприемника под дном реки должно быть не менее глубины возможного размыва дна, при назначении величины заглубления водоприемника следует учитывать, что верх самотечного водовода должен быть заглублен под дно реки не менее чем на 0,5 м или должно быть предусмотрено крепление дна в этом месте.

Конструкция затопленного водоприемника определяется многими факторами, главные из которых: расход воды (пропускная способность водозабора), глубина воды (минимальная) в выбранном для расположения водоприемника месте и устойчивость русла; геологические и гидротермические (шуголедовые) условия, наличие в речном потоке сора, хвороста, топляков, карчей и т.п.; характеристика водохозяйственного использования реки - судоходство, лесосплав и т.д. Конструкцию водоприемника в значительной степени определяет и принятый способ его строительства.

Деревянные ряжевые водоприемники применяют в богатых лесом районах. Если ряж (сруб) собирают наплаву, отпадает необходимость устройства стапеля для его изготовления и спуска на воду. Зимой упрощаются работы при сборке ряжа на льду непосредственно над местом установки на дно реки на заранее подготовленное в котловане основание. Собранный ряд со встроенными в него уширениями самотечных водоводов опускают в проектное положение путем загрузки клеток ряжа камнем.

На судоходных и лесосплавных реках ряжевые водоприемники часто разрушаются якорями и волокушами. Поэтому на таких реках предпочтение должно быть отдано бетонным водоприемникам в железобетонном или стальном корпусе, используемом как опалубка для подводного бетонирования (см. рис. 3.22). Корпус изготавливают тонкостенным на берегу на стапеле со встроенными уширениями самотечных водоводов. После спуска его на катках на воду, он в плавучем состоянии {с понтонами для

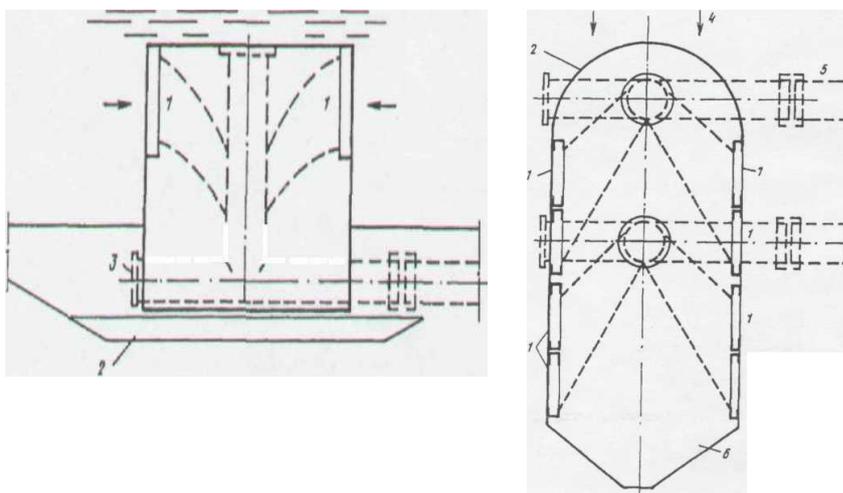
увеличения плавучести или без них) транспортируется к месту установки. Затем его опускают в подготовленное основание путем затопления. Понтоны отсоединяют и они всплывают после продувки их воздухом, а корпус заполняют бетоном методом подводного бетонирования. Патрубки водоприемника присоединяют муфтами к самотечным водоводам.

Засыпку траншей самотечных водоводов и пазух котлована у водоприемника, а также крепление дна, защищающее водоприемник от подмыва речным потоком, выполняют подводными способами.

Водоприемник может быть двухсекционным (см. рис. 5.56) и трех секционным, а для водозаборов с большим числом самотечных водоводов водоприемник делают из двух и более частей, иначе он будет больших размеров, сложным для изготовления и опускания.

Водоприемник в плане должен быть удобообтекаемой формы, исключая отрыв струй потока от него, особенно у водоприемных отверстий. В месте отрыва струи образуются вихри и часть водоприемного отверстия выключается из работы.

Двухсекционный водоприемник с двухсторонним втеканием воды имеет в плане удобообтекаемую форму, его корпус выполнен стальным сварным (рис. 5.57). Самотечные водоводы проходят через водоприемник и заглушены с внешней стороны. Заглушки могут быть сняты для очистки самотечных водоводов. К самотечным водоводам присоединены вертикальные стояки, заглушённые сверху.



**Рис. 5.57. Двухсекционный водоприемник**

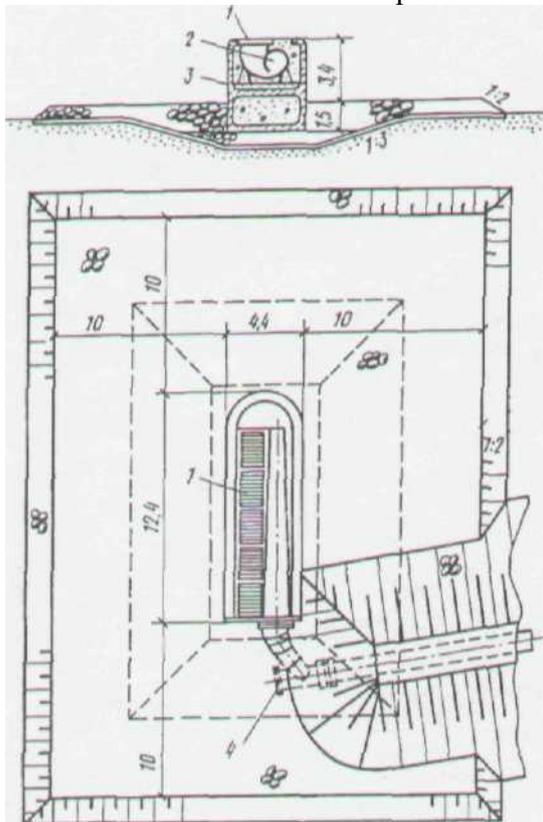
1 - водоприемное отверстие; 2 - корпус стальной (опалубка для подводного бетонирования); 3 - заглушки; 4 - направление течения; 5 - самотечные водоводы; 6 - бетон

Водоприемные отверстия размером 0,8x1,2 м по четыре в каждой секции расположены с обеих сторон водоприемника и соединены со стояками косыми сужающимися коробами. Втекание воды в отверстия запроектировано под благоприятным углом отвода 135 (аналогично расположение и стержней решетки). Форма коробов за отверстиями обеспечивает плавное движение воды с непрерывным увеличением скоростей течения.

Для водозаборов пропускной способностью 1 -1,5 м<sup>3</sup>/с и более применяют водоприемники с вихревыми камерами. Введение вихревой камеры в конструктивную схему водоприемника с несколькими водоприемными отверстиями обеспечивает равномерность втекания воды и подвода ее к отверстию при его промыве обратным током воды по всем водоприемным отверстиям.

Водоприемник, изображенный на рис. 5.58, рассчитан на забор 1 м<sup>3</sup>/с воды со скоростями втекания в решетки 0.1 м/с, для защиты молоди рыб от попадания в водоприемник и предотвращения закупорки решеток внутриводным льдом. Пять водоприемных отверстий расположены вдоль вихревой камеры, площадь которой

увеличивается по направлению течения воды в ней. Втекание воды в камеру тангенциальное через продольную щель, вследствие чего поток воды в коллекторе, расположенное под водоприемными отверстиями, закручивается, совершая, кроме поступательного, и вращательное движение. Скорость течения воды в щели должна быть больше скорости течения в камере не менее чем в 1,15 раза. При указанном соотношении скоростей течения, поступающие в нее по всей длине расходы воды оказываются практически постоянными. К недостатку водоприемника можно отнести некоторую сложность изготовления вихревой камеры пирамидальной формы.

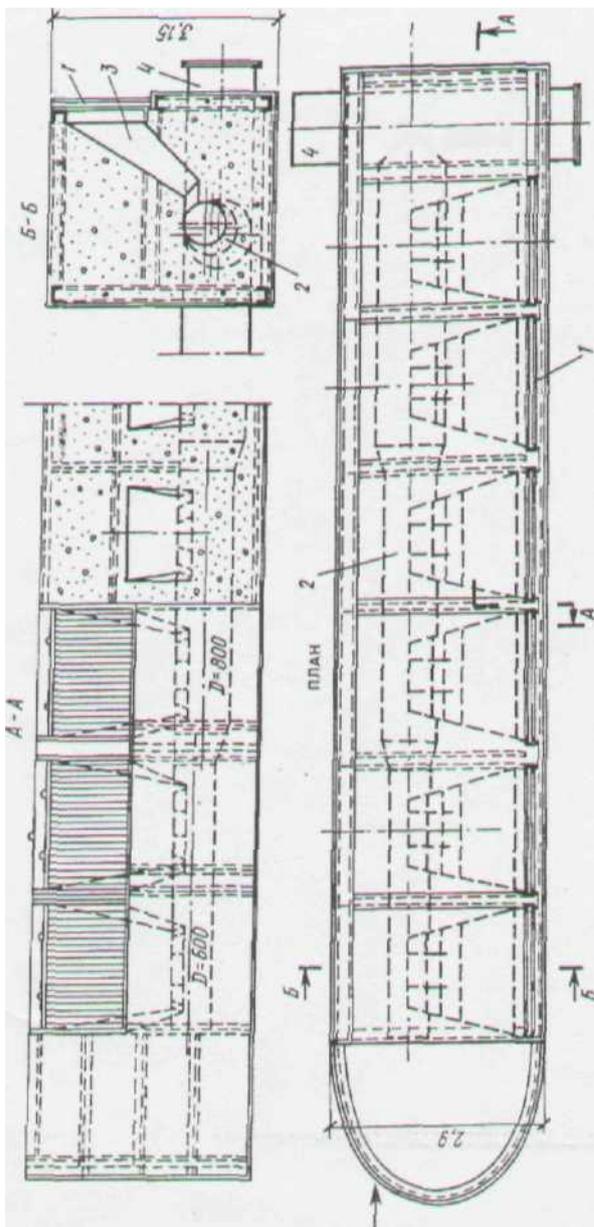


**Рис. 5.58. Затопленный водоприемник с вихревой камерой:**

*1* - водоприемные отверстия *2* - вихревая камера (водосборный коллектор); *3* - корпус железобетонный; *4* - ответвление на самотечном водоводе на случай его очистки

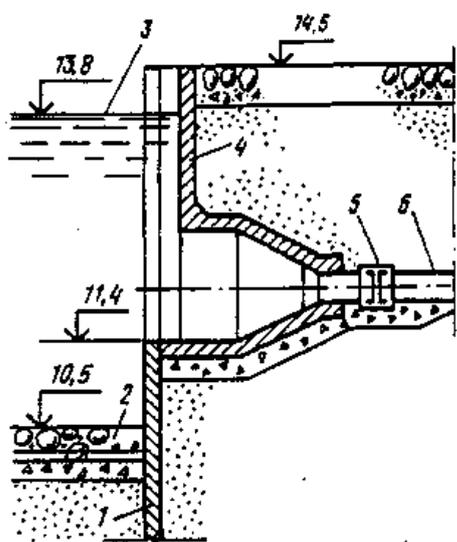
Водоприемник с телескопической формой щелевой вихревой камеры рассчитан на расход воды до  $0.75 \text{ м}^3/\text{с}$  при скорости ее втекания около  $0,1 \text{ м/с}$  (рис. 5.59). Водоприемник односекционный; для двухсекционного водозабора вторая секция водоприемника изготавливается зеркально отображенной, а секции в реке располагаются впритык.

Затопляемый водоприемник (рис. 5.60) затопляется лишь при паводках и половодных расходах воды в реке, что позволяет большую часть года обслуживать рыбозащитные сетки в водоприемных отверстиях. Водоприемник изготовлен железобетонным и в готовом виде установлен на подготовленное основание под воду. Водоприемник встроен в шпунтовый ряд из железобетонных свай, ограждающих площадку обслуживания.



**Рис. 5.59. Водоприемник с вихревой камерой**

1 - отверстие; 2 - вихревая камера; 3 - бункерная камера; 4 - патрубок водоприемника



**Рис. 5.60.**

**Затопляемый водоприемник**

1 - береговая шпунтовая стенка; 2 - крепление дна наброской камня по стальной сетке; 3 - высокий межженный уровень воды; 4 - водоприемник; 5 - соединительная муфта; 6 - самотечный водовод

Водоприемное отверстие для уменьшения размеров плоских рыбозащитных сеток разделено промежуточной стенкой на две части с размерами 1,2x1,3 м. Промыв сеток предусмотрен без подъема их из воды обратным током воды по самотечным водоводам. Возможна замена сеток на решетки на зимний период.

Береговой незатопляемый водоприемник с наземным павильоном из кирпича размером 6x6 м выполнен из железобетона (см. рис. 5.40). Водоприемные отверстия в каждой из трех секций оборудуются фильтрующими пакетно-реечными рыбозащитными кассетами. Для их обслуживания в павильоне предусмотрен тельфер. Для установки водоочистных сеток были предусмотрены пазовые устройства, хотя по СНиП можно отказаться от сеток при применении для рыбозащиты фильтрующих устройств или водоприемников фильтрующего типа.

## 16.7. САМОТЕЧНЫЕ, ВСАСЫВАЮЩИЕ И СИФОННЫЕ ВОДОВОДЫ

По самотечным водоводам вода поступает из водоприемника в береговой сеточный колодец или в сеточное отделение насосной станции, совмещенной с береговым колодцем.

Всасывающие водоводы соединяют береговой сеточный колодец с насосной станцией, а самотечно-всасывающие - водоприемник с насосной станцией. Сифонные (самотечно-сифонные) водоводы соединяют водоприемник с сеточным отделением насосной станции, совмещенной с береговым колодцем. Строительство самотечных водоводов осуществляется или в открытом котловане, или спуском в траншее под воду, а на участках примыкания к подземной части береговых колодцев и насосных станций, выполняемых опускным способом, - методами бестраншейной прокладки.

Самотечные, всасывающие и сифонные водоводы выполняют, как правило, из стальных труб. СНиП допускает также применение железобетонных и пластмассовых труб.

Самотечные водоводы должны укладываться в плане и в вертикальной плоскости без резких поворотов, вызывающих отложение наносов, сора и шуги и затрудняющих промыв и очистку водоводов. Прокладка водоводов с уклоном или без уклона практически не влияет на характер движения в водоводе наносов (при промыве или заборе воды). Поэтому высотное положение водоводов определяется необходимостью их заглубления в пределах русла под дно для защиты от подмыва речным потоком и повреждения якорями судов и плотов на судоходных реках - на 0,8 - 1,5 м (с учетом возможного размыва и дноуглубления), а на несудоходных - на 0,5 м (или обсыпкой грунтом с соответствующим укреплением его от размыва). При этом учитывается возможность уменьшения объемов земляных работ. Достаточно часто самотечные водоводы прокладывают с некоторым подъемом в сторону береговых сооружений водозабора.

Высотное положение самотечных водоводов назначают с таким расчетом, чтобы водовод располагался не менее, чем на 0,5 м ниже пьезометрической линии. Высотное положение всасывающих водоводов определяется допустимой высотой всасывания насосов. Водоводы выполняют из стальных труб со сварными соединениями и прокладывают с подъемом в сторону насосной станции (уклон не менее 0,001). Всасывающие водоводы желательно делать возможно более короткими и обособленными для каждого насоса (см. рис. 5.40,а). Для сбора и откачки воздуха сифонный водовод прокладывают с постоянным подъемом в сторону насосной станции (уклон не менее 0,001). Высотное положение сифонных водоводов назначают исходя из обеспечения их работы при минимальном расчетном уровне воды в водоисточнике и максимальном расходе воды в водоводе. Для этого необходимо выполнение условия

$$\frac{P_{\text{вак}}}{\rho \cdot g} < \frac{P_{\text{ат}}}{\rho \cdot g} - \frac{P_{\text{нп}}}{\rho \cdot g},$$

где  $P_{вак}$  - вакуумметрическое давление в наивысшем месте водовода;  $P_{ат}$  - давление атмосферного воздуха, зависящее от высоты расположения местности над уровнем моря  $H_{у.м}$

$H_{у.м}, м... 0 \quad 100 \quad 200 \quad 300 \quad 400 \quad 500 \quad 600 \quad 800 \quad 1000 \quad 1500 \quad 2000$

$\frac{P_{ат}}{\rho \cdot g} \dots 11,3 \quad 10,2 \quad 10,1 \quad 9,9 \quad 9,8 \quad 9,7 \quad 9,6 \quad 9,4 \quad 9,2 \quad 8,6 \quad 8,4$

$P_{нт}$  - давление насыщенных паров воды, зависящее от ее расчетной температуры  $t_{в}$ :

$t_{в}, ^\circ C \dots 10 \quad 20 \quad 30 \quad 40 \quad 50 \quad 60 \quad 70 \quad 80 \quad 90 \quad 100$

$\frac{P_{нт}}{\rho \cdot g} \dots 0,12 \quad 0,24 \quad 0,43 \quad 0,75 \quad 1,25 \quad 2,02 \quad 3,17 \quad 4,82 \quad 7,14 \quad 10,3$

Приведенную высоту вакуумметрического давления в некотором сечении водовода находят по формуле

$$\frac{P_{вак}}{\rho \cdot g} = \Pi + \sum h_n + v^2 / 2g$$

где  $\Pi$  - высота расположения водовода в этом сечении над минимальным уровнем воды в реке;

$\sum h_n$  - сумма потерь напори в водоводе от начального до расчетного сечения;

$v$  - скорость течения воды в расчетном сечении, м /с.

При проектировании сифонных водоводов следует также учитывать характеристику вакуум-насосов, предназначенных для откачки воздуха при зарядке и эксплуатации водоводов. Вакуум-насосы типа ВВН создают вакуум до 85-95 % атмосферного давления (в зависимости от марки и подачи насоса). Глубину заложения труб, считая до низа, берут на 0,5 м больше расчетной глубины проникновения в грунт нулевой температуры. Самотечные и сифонные водоводы из стальных труб устраивают с оклеечной противокоррозионной изоляцией с защитой ее деревянными рейками; весьма целесообразно покрытие внутренней поверхности труб цементным или иным покрытием (в зависимости от коррозионных свойств воды),

Траншея, в которой уложены самотечные водоводы, сверху должна быть укреплена наброской камня, укладываемого по стальной сетке с щебеночной или гравийной подготовкой, или железобетонными плитами, связанными в тюфяк по щебеночному обратному фильтру. Самотечные водоводы к патрубкам водоприемника присоединяют под водой монтажными свертными муфтами, состоящими из двух частей. Нижняя часть крепится к патрубку сваркой или временным креплением, а верхняя - болтами к нижней части после опускания самотечного водовода на выступающий ее конец с прокладкой резины.

Самотечные водоводы в береговые колодцы следует вводить через сальники. Самотечные, сифонные и всасывающие водоводы оборудуют задвижками или дисковыми затворами для отключения берегового сеточного колодца или насоса от реки при высоких уровнях воды в ней.

Промыв самотечных и сифонных водоводов от наносов предусматривают независимо от того, что их диаметр определяют в расчете на незаилающую скорость течения воды в них. Промыв водоводов от наносов осуществляют прямым и обратным током воды. При промыве самотечного водовода прямым током воды отключают один водовод (в двухсекционном водозаборе) и по второму пропускают весь потребный расход воды  $Q_{в}$ . Осадок из водовода при этом поступает с водой в береговой колодец. Такой же режим желателен в паводки и половодья при высокой мутности воды в реке.

Возможно применение гидропневматического промыва, который осуществляют подачей сжатого воздуха в поток воды и который эффективен при наличии заиления и

коррозионных отложений. Для гидropневматического промыва можно использовать передвижной компрессор, шланг от которого присоединяют к патрубку в верхней части вакуум-стояка для импульсного промыва.

В отдельных случаях водоводы можно очищать протаскиванием через них совков и рыхлителей.

## 16.8. БЕРЕГОВЫЕ СЕТОЧНЫЕ КОЛОДЦЫ

Береговые колодцы предназначены для размещения в них водоочистных сеток. Так как сетки располагают ниже минимального уровня воды, то сеточное здание оказывается заглубленным. Строительство его при нескальных грунтах в большинстве случаев осуществляют методом опускного колодца. В связи с этим и само сеточное здание именуют колодцем - береговым сеточным колодцем.

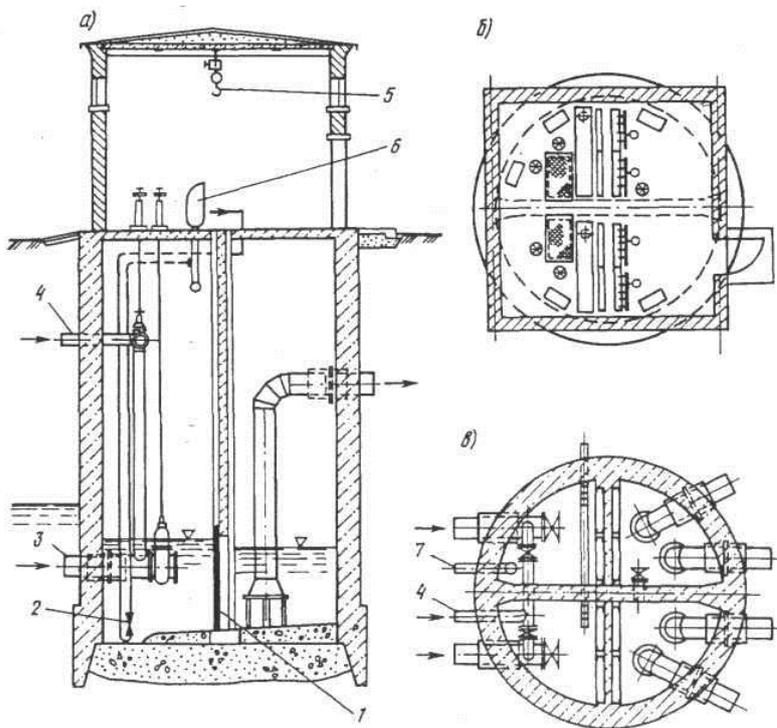
Береговые колодцы следует располагать на незатопляемых отметках берега. Для сокращения протяженности самотечных водоводов на участке с наибольшей глубиной их заложения береговой колодец можно расположить на пологом берегу в месте, заливаемом в половодье на 1 - 3 м. При этом предусматривают обсыпку его грунтом до отметки, превышающей высоту наката волны при расчетном максимальном уровне воды не менее чем на 0,5 м. При отсутствии волнения отметку планировку площадки у берегового колодца принимают на 0,5 м выше максимального уровня воды расчетной обеспеченности, а площадки у насосной станции - выше на 0,7 м.

Водоочистные сетки предохраняют насосы от крупного сора, что значительно повышает надежность подачи воды насосами. Поэтому применение берегового колодца, оборудованного водоочистными сетками, в составе водозаборных сооружений I и II категорий обязательно. Для береговых колодцев наиболее часто применяют плоские съемные водоочистные сетки. Недопустима замена съемных сеток приемными сетками или приемными клапанами на концах всасывающих водоводов, так как из-за сложности их очистки возможны перебои в подаче воды потребителю.

Для очистки съемных сеток от сора должны быть предусмотрены промывные устройства с подводом воды от напорных водоводов насосной станции, а для подъема сеток - подъемно-транспортные механизмы. Промыв сеток может производиться струей воды из брандспойта над специальным лотком с экраном. Следует предусмотреть устройства для отвода промывной воды и сора из колодца в реку или местную систему водоотведения. Процессы взмучивания и удаления осадка из приемков (в днище колодца) необходимо механизировать.

Размеры берегового колодца зависят от целесообразного размещения перечисленного выше технологического оборудования; кроме того, в колодце следует размещать указатели уровней воды (в реке; перед сетками и после сеток), а также лестницы для спуска в колодец. Лестницы-стремянки (с ограждением высотой 0,7 м) располагают перед водоочистными сетками и после них во всех секциях сеточных колодцев.

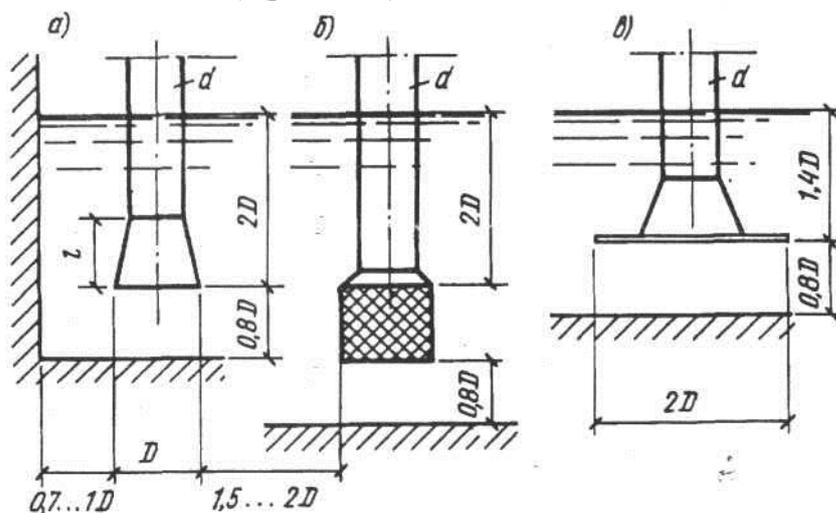
Двухсекционный железобетонный круглый в плане береговой сеточный колодец (рис. 5.61) имеет наземный павильон прямоугольной в плане формы. Объем воды в каждой секции колодца при минимальном расчетном ее уровне в колодце должен быть определен из условий запуска насоса и совместной работы самотечных и всасывающих водоводов и берегового колодца и не должен быть менее 30 - 35-кратного секундного расхода воды, забираемого насосами из секции.



**Рис. 5.61. Береговой сеточный колодец**  
*a* - разрез; *б* - план наземного павильона; *в* - план подземной части; 1 - сетка плоская; 2 - эжектор; 3 - самотечный водовод; 4 - подвод воды для промыва сеток и самотечных водоводов; 5 - кошка с подъемным механизмом; 6 - ванна с экраном для промыва сеток; 7 - подвод воды из реки к самописцу уровня воды

Минимальный уровень воды в береговом колодце определяют гидравлическим расчетом при минимальном уровне воды в водоисточнике, выключении одной из секций водоприемника и других возможных неблагоприятных условиях (засорение решеток, обрастание водоводов и др.).

Отметку днища берегового колодца определяют из условия расположения под минимальным расчетным уровнем воды в колодце водоочистных сеток необходимой площади. Вместе с этим высота слоя воды в береговом колодце должна быть достаточной для расположения под минимальным расчетным уровнем воды приемных воронок всасывающих водоводов. Вертикальные всасывающие водоводы диаметром  $d$  с приемными воронками диаметром  $D = (1,3 - 2)d$  и длиной  $l = (1,3 - 1,8)(D - d)$  должны иметь заглубление входного отверстия не менее  $(1,5 - 2) D$  с расстоянием от отверстия до дна не менее  $0,8D$  (рис. 5.62).



**Рис. 5.62.**  
 Заглубление всасывающих водоводов, оборудованных воронками (а), приемными сетками (б) и воронкой с диафрагмой (в)

Верх водоочистных сеток целесообразно располагать в колодце значительно выше минимального уровня воды, например, на уровне высокой межени, для того, чтобы большую часть года процеживание воды через сетку происходило с меньшими скоростями течения воды в ячейках сетки. Такое решение позволяет обеспечить не только более

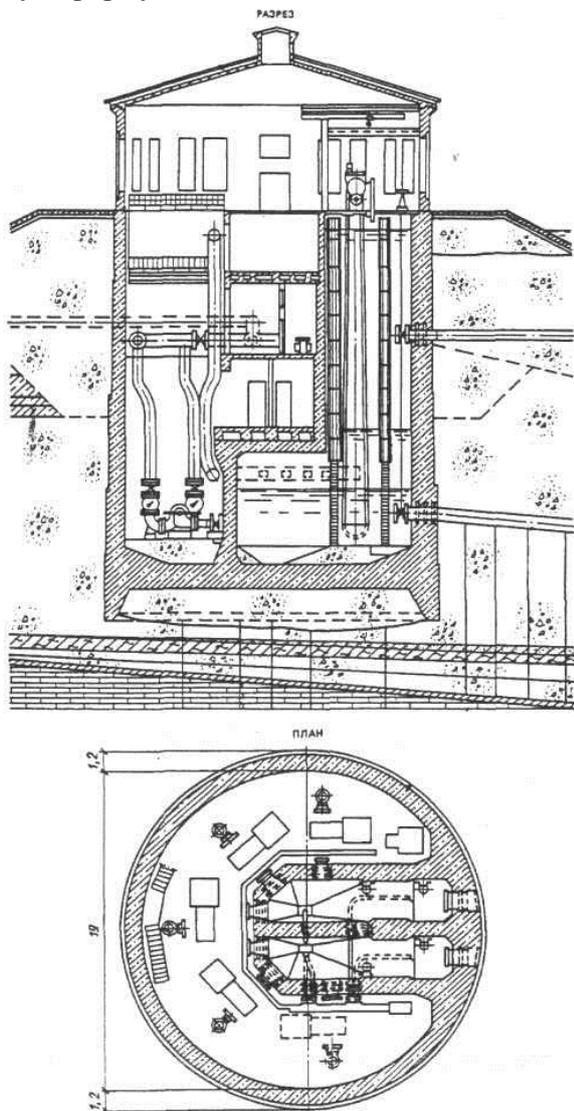
высокое качество очистки воды на сетках, но и повышает надежность действия сеток в случае поступления шуги через водоприемник и водоводы в береговой колодец.

### 16.9. ВОДОЗАБОРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ СОВМЕЩЕННОГО ТИПА

Для водозаборов совмещенного типа предпочтительнее применение артезианских насосов и насосов с вертикальным валом. Но ввиду ограниченности типоразмеров первых и большой подачи вторых значительно чаще применяют насосы с горизонтальным валом.

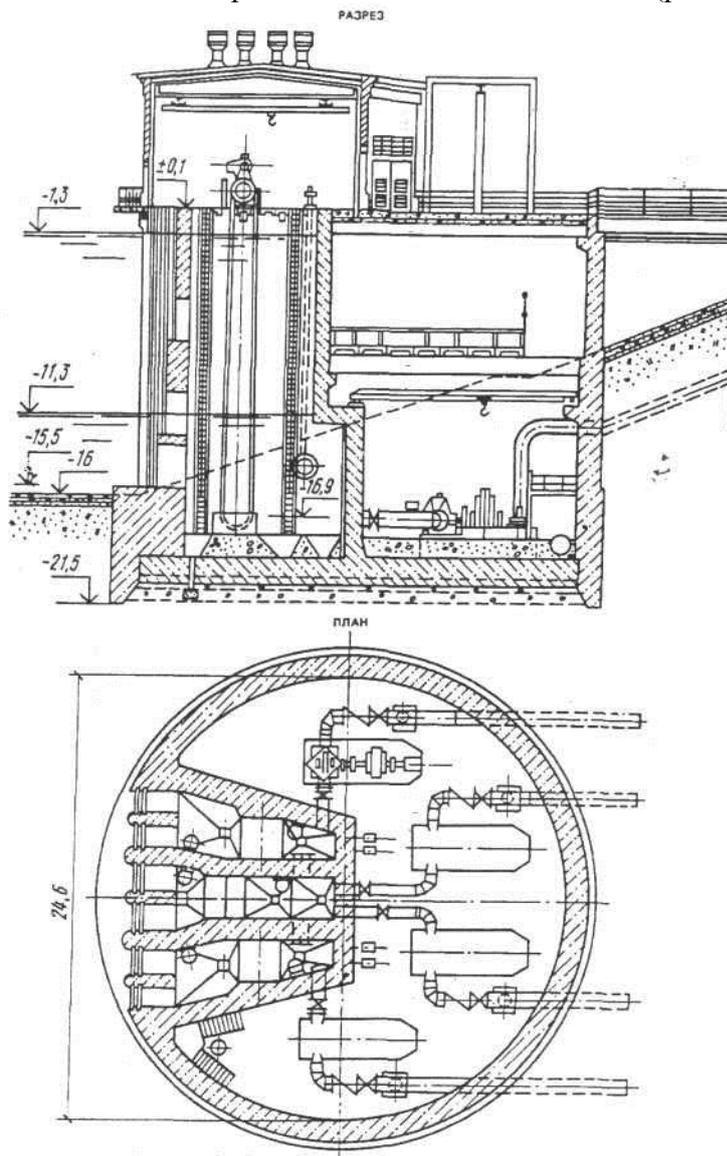
Водозаборные сооружения совмещенного типа устраивают с плоскими или чаще с вращающимися водоочистными сетками.

Компоновка сооружений определяется типом вращающихся сеток и числом насосных агрегатов. При числе насосов 3 - 5 часто принимают круглую в плане форму сооружения в расчете на строительство методом опускного колодца (реже - кессона). Часто водозаборы, оборудованные вращающимися сетками с лобовым подводом воды, построены по схеме, когда насосное помещение подковообразной формы в плане расположено вокруг сеточного отделения (рис. 5.63). Береговые водозаборные сооружения с аналогичной компоновкой водоприемно-сеточных отделений обеспечивают бесперебойный забор воды при интенсивном шугоходе на реке и поступлении шуги в водозабор при непрерывном промыве вращающихся сеток, часть звеньев которых имеет ковшеобразную форму.



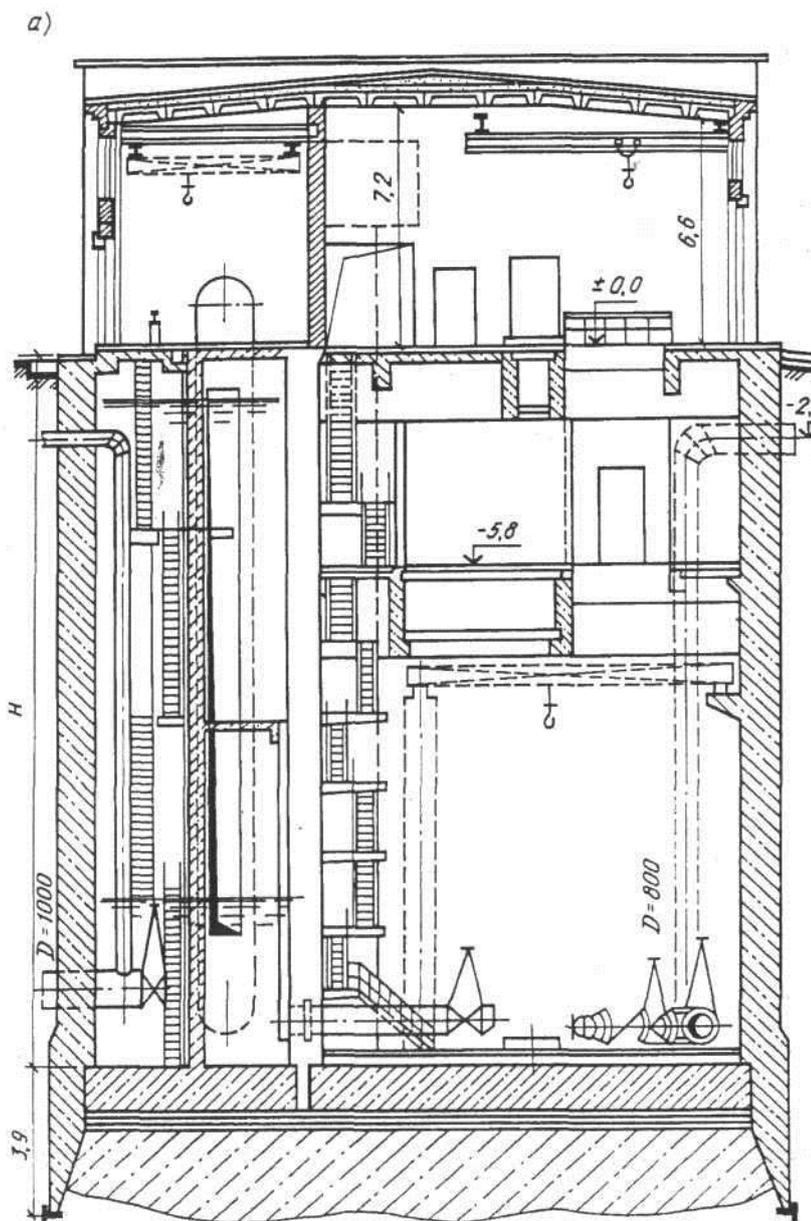
**Рис. 5.63.**  
**Насосная станция, совмещенная с сеточным колодцем, с двумя ярусами самотечных водоводов**

В типовом проекте водозаборное сооружение запроектировано на производительность 5 м<sup>3</sup>/с с трехсекционным водоприемно-сеточным отделением (рис. 5.64).



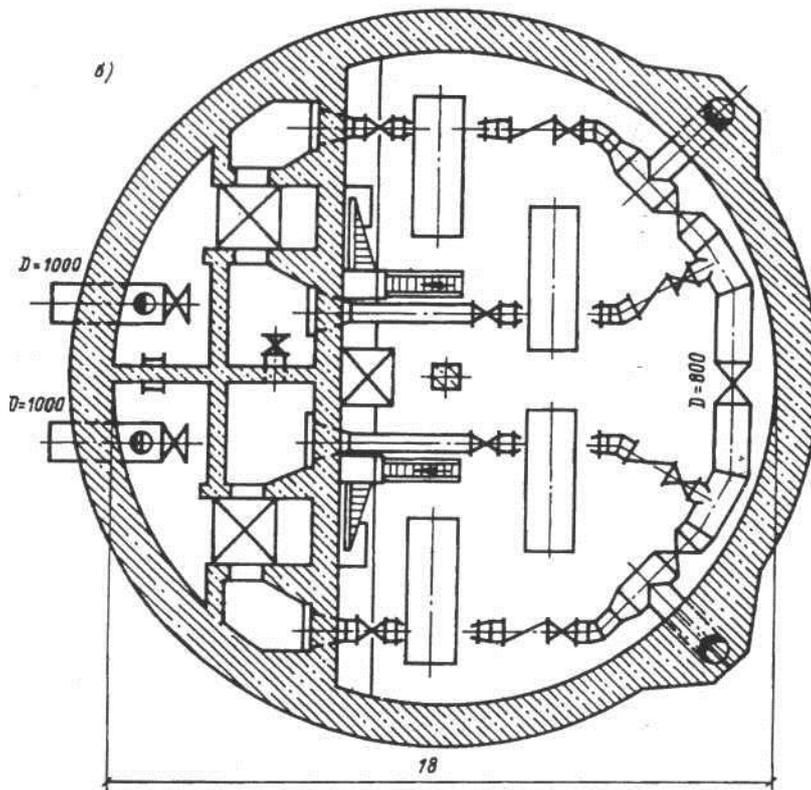
**Рис. 5.64. Водозаборное сооружение береговое совмещенного типа**

Иная компоновка сеточного отделения принята в водозаборе производительностью 1 - 6 м<sup>3</sup>/с по проекту с вращающимися сетками с лобово-внешним подводом воды (рис. 5.65). Насосное отделение имеет четыре насоса, два или три из которых являются рабочими.

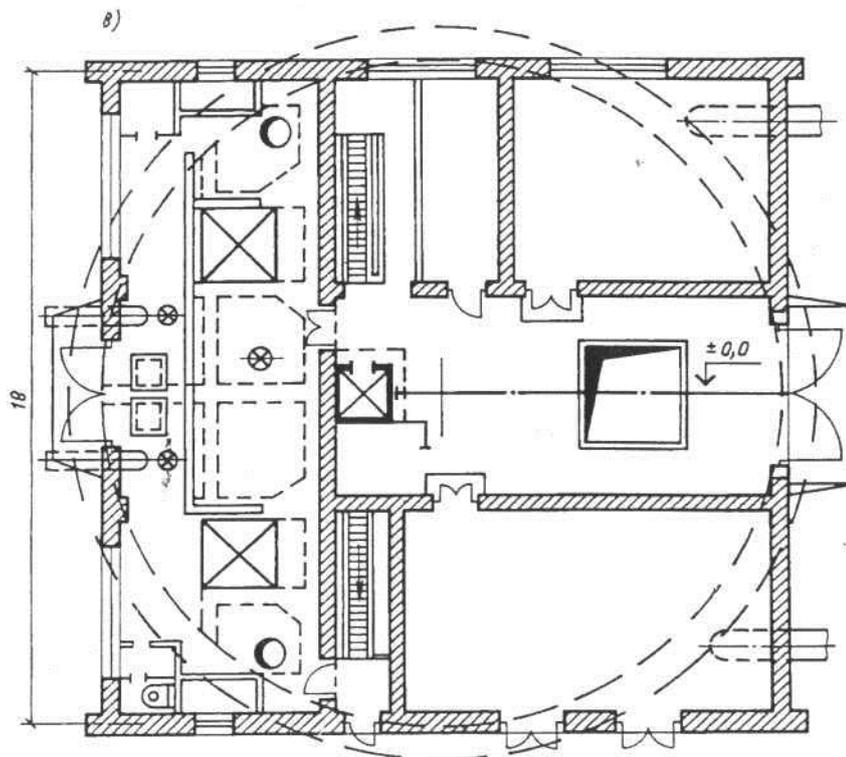


**Рис. 5.65. Насосная станция, совмещенная с сеточным колодцем**  
 а – разрез, б – план подземной части, в – план наземной части

Насосное помещение оборудуется мостовым радиальным краном; для обслуживания сеток предусмотрен подвесной кран; для опускания оборудования через монтажный проем - тельфер. Наземная часть прямоугольной формы одно- или двухэтажная в зависимости от глубины подземной части и возможности расположения в ней электрораспределительных устройств. Предусмотрены помещения для дежурного персонала, ремонтной бригады, санузла; из подземной части имеются два выхода, а при заглублении более 15 м дополнительно предусматривается лифт.



б - план подземной части



в - план наземной части

Предусмотрены насосы для откачки: профильтрованной воды из насосного помещения и воды из сеточных отделений (для проведения в них ремонтных работ), а также осадка из них.

При небольшом заглублении насосной станции стояки напорных водоводов внутри станции прокладывают открыто.

Водозаборные сооружения большой производительности иногда проектируют прямоугольной в плане формы, принимая число секций водо-приемно-сеточного отделения равным числу насосов.

## 16.10. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Гидравлический расчет водозаборных сооружений выполняют применительно к нормальным и аварийным условиям эксплуатации. При нормальных условиях одновременно действуют все секции водозабора (кроме резервных). В аварийном режиме одна из секций отключена и весь расчетный расход воды или значительная его часть протекает через остальные секции. Гидравлические расчеты по определению размеров водоприемных отверстий, диаметров трубопроводов и других элементов водозаборов выполняют для нормальных условий, а расчеты потерь напора, уровней воды в сеточном колодце (или сеточном отделении совмещенной насосной станции) и допускаемой наивысшей отметки оси насосов - применительно к аварийным условиям.

**Расчетный расход воды**,  $m^3/c$ , в одной секции водозабора для нормальных условий эксплуатации  $Q_p$  и для аварийных условий  $Q_p'$  определяют по формулам:

$$Q_p = Q_\phi/n; \quad Q_p' = (1-0,01p)Q_\phi/n,$$

где  $n$  - число секций водозабора;

$p$  - допускаемое уменьшение подачи воды в аварийном режиме, принимаемое по табл. 4.7.

**Площадь водоприемных отверстий** (брутто) одной секции водозабора (оборудованного решетками) определяют по формуле

$$F_p = Q_p'/(v_{вт}\eta_{ст}\eta_з), \quad (5.23)$$

где  $v_{вт}$  - средняя скорость втекания воды в водоприемные отверстия, м/с;

$\eta_{ст}$  - коэффициент стеснения площади водоприемного отверстия стержнями решетки;

$\eta_з$  - коэффициент засорения решетки.

В СНиП 2.04.02-84 формула (5.23) приведена к виду  $\Omega_{бр} = 1,25Q_p K_{ст}/v_{вт}$ , при этом  $1,25 = 1/\eta_з$  и  $K_{ст} = 1/\eta_{ст}$ . В формуле (5.23) использованы общепотребительные в гидравлике коэффициенты стеснения и засорения, имеющие геометрический смысл, например, коэффициент  $\eta_{ст}$  показывает в долях единицы площадь отверстия, которая остается свободной для протекания воды после стеснения отверстия стержнями решетки.

Допустимую скорость втекания воды  $v_{вт}$ , м/с, в водоприемные отверстия без учета требований рыбозащиты для средних и тяжелых условий забора принимают равной: для русловых затопленных водоприемников 0,1 - 1,3; для береговых - 0,2 - 0,6 (меньшие значения принимают для тяжелых шуголедовых условий); с учетом требований рыбозащиты скорость втекания воды принимают не более 0,25 - для рек со скоростями течения не менее 0,4 м/с и не более 0,1 - для рек со скоростями течения менее 0,4 м/с. Для очень тяжелых шуголедовых условий скорость втекания воды принимают не более 0,06 м/с.

Коэффициент стеснения площади водоприемного отверстия стержнями решетки представляет собой отношение площади живого сечения отверстия (площади нетто) к общей площади отверстия (брутто), включающей и площадь, занятую стержнями.

Численное значение коэффициента стеснения  $\eta_{ст}$  находят из отношения элементарной площади между стержнями  $a \Delta h$  к площади (брутто)  $(a + 20,5d) \Delta h$  (рис. 5.66):

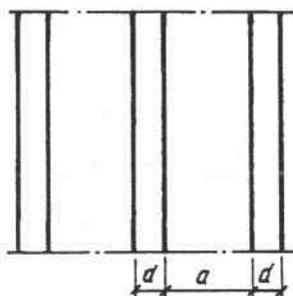


Рис. 5.66. Элемент решетки

$$\eta_{cm} = a \Delta h / (a + 20,5d) \Delta h = a / (a + d),$$

где  $a$  - расстояние между стержнями решетки в свету  $a = 40 \dots 100$  мм; часто принимают  $a = 50$  мм;  $d$  - толщина стержня,  $d = 6 \dots 10$  мм.

Среднее значение коэффициента засорения решетки сором или скоплениями шугольда  $\eta_z$  равно 0,8; для труднодоступных отверстий и засоренных водоисточников - 0,7 - 0,75; для легкодоступных отверстий или водоисточников с небольшим содержанием сора и водорослей - 0,85 - 0,9.

Назначая число и определяя размеры решеток следует учитывать глубину воды в месте расположения водоприемника и его конструкцию. Целесообразно высоту решетки принимать больше ее ширины, а массу решетки увязывать с характеристикой намеченного к использованию грузоподъемного оборудования.

При принятых размерах водоприемного отверстия  $h$  и  $b$  число отверстий (число решеток) составит  $n = F_p / (bh)$ . После подбора решеток и определения их размеров уточняют численное значение скорости втекания воды в отверстие  $v_{вт} = Q_p / (nbh \eta_{ст} \eta_z)$ .

Потери напора в сороудерживающих решетках принимают по практическим данным  $h_p = 0,03 \dots 0,06$  м.

При оборудовании водоприемных отверстий рыбозащитными сетками коэффициент стеснения водоприемного отверстия проволокой сетки определяют как отношение живого сечения одной ячейки сетки (площади «в свету»)  $a^2$  (рис. 5.67) к общей площади (брутто), включающей и площадь, занятую проволокой сетки  $(a + 2*0,5d)^2$ :

$$\eta_{cm} = a^2 / (a + 2*0,5d)^2 = a^2 / (a + d)^2, \eta_{cm} \eta_z \quad (5.24)$$

где  $a$  - расстояние между проволоками в свету;  $d$  - диаметр проволоки.

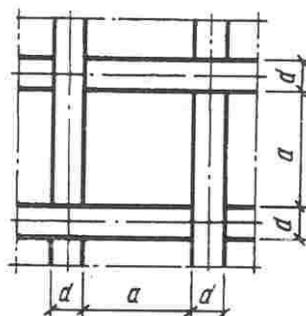


Рис. 5.67. Элемент сетки

При расчете площади рыбозащитной фильтрующей кассеты по формуле (3.7) скорость втекания воды в пустоты фильтра принимают  $v_{вт} \leq 0,25$  м/с. Коэффициент  $\eta_{ст}$  принимают равным пустотности фильтрующего заполнения кассеты  $p = 0,4 \dots 0,5$ ; коэффициент засорения  $\eta_z$  - равным 0,8...0,9.

Потери напора в самом водоприемнике состоят из потерь напора по пути течения воды и потерь напора в местных сопротивлениях.

**Площадь водоочистных сеток**, располагаемых под минимальным расчетным уровнем воды в береговом колодце или в водоприемно-сеточном отделении водозаборного сооружения совмещенного типа, определяют:

для плоских сеток

$$F_c = Q_p / (v_c \eta_{cm} \eta_z); \quad (5.25,а)$$

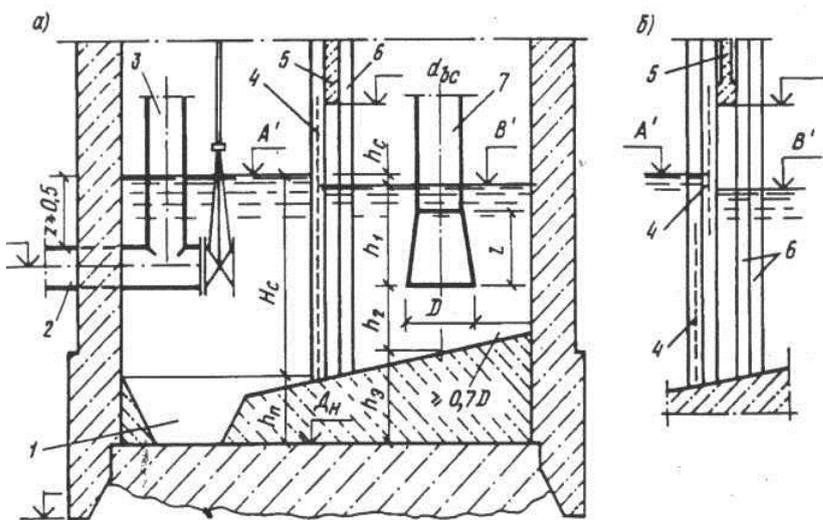
для вращающихся сеток

$$F_c = Q_p / (v_c \eta_{cm} \eta_z \eta_p); \quad (5.25,б)$$

- где  $v_c$  - допускаемые скорости течения воды в ячейках сеток, которые принимают равными 0,2 - 0,4 м/с - для плоских сеток и 0,6 - 1,2 м/с - для вращающихся;
- $\eta_{ст}$  - коэффициент стеснения отверстия проволокой сетки, определяемый по формуле (5.24);
- $\eta_p$  - коэффициент уменьшения площади сетки опорными рамками, межрамочными уплотнениями и шарнирами, определяемый по конструктивным особенностям сетки;  $\eta_p \approx 0,75$ ;
- $\eta_z$  - коэффициент засорения сетки, принимаемый для плоских съёмных сеток равным 0,7 - 0,8, для вращающихся - 0,8 - 0,85.

После подбора плоских сеток (и определения их числа) уточняют численное значение скорости течения воды в ячейках сети по принятой площади сеток  $F'_c$ :  $v_c = Q_p / (F'_c \eta_{ст} \eta_z)$ .

Под минимальным расчетным уровнем воды при этом располагают часть сетки высотой  $H_c = F_c / B$  (где  $B$  — ширина сетки), площадь которой  $F_c$  определена расчетом (рис. 5.68,а). Тогда при всех уровнях воды, больших минимального, процеживание воды будет происходить через большую площадь сетки и с меньшей скоростью течения воды. Вследствие этого повышается взвесеизвлекающая способность сеток и обеспечивается лучшая очистка воды. Процеживание воды можно также вести через две сетки, расположенные на разных уровнях (рис. 5.68,б). За разделительной перегородкой показаны направляющие швеллеры, в которых устанавливают запасные сетки перед подъемом засоренных на промывку. Возможна установка плоских сеток в два ряда по ширине секции сеточного колодца (см. рис. 5.61). Потери напора в сетках  $h_c$  зависят от скорости течения воды в ячейках сетки, плотности плетения сетки и степени ее засорения; при значительной засоренности водоисточника потери напора во вращающихся сетках достигают 0,2 - 0,3 м. Такие потери считают предельно допустимыми, так как возможен прорыв сеточного полотна. Потери напора в плоских сетках принимают 0,1 - 0,15 м.



**Рис. 5.68.**  
**Оборудование**  
**берегового колодца**  
 1 - приемок для сбора осадка; 2 — самотечный водовод; 3 - вакуумстояк для импульсного промыва; подвод воды для промыва обратным током воды; 4 - сетка; 5 - перегородка поперечная; 6 - направляющие для сеток; 7 - всасывающий водовод

Площадь погруженного под минимальный расчетный уровень воды сеточного полотна вращающейся сетки с лобовым подводом воды составит  $F_c = H_c B$ , где  $B$  - ширина сетки. (Напомним, что у сеток с лобовым подводом воды процеживание воды и задержание сора происходит только на первом по течению воды сеточном полотне). Глубину  $H_c$  можно также назвать глубиной погружения под уровень воды центра закругления направляющих сетки. Для сеток с внешним, внутренним и лобово-внешним подводами воды эта же площадь будет составлять  $F_c = 2 H_c B i + \pi R B$  (т.е. два вертикальных участка сетки высотой  $H_c$  и часть сетки, расположенной ниже центра закругления направляющих, площадью  $\pi R B$ ).

Глубина погружения сеточного полотна вращающихся сеток под расчетный уровень воды (рис. 5.69) до центра закругления нижнего направляющего устройства для сеток с лобовым подводом воды составит

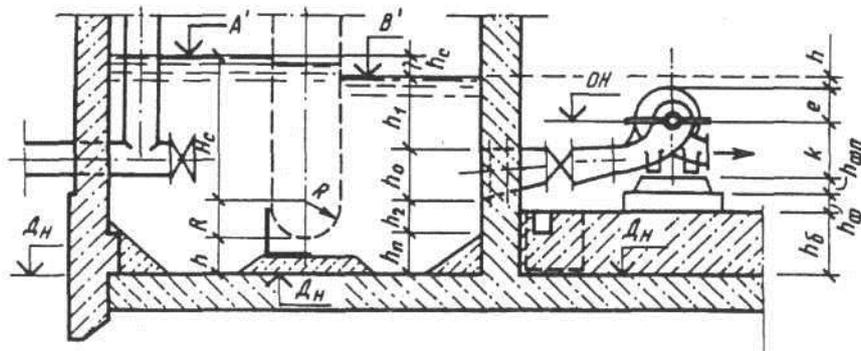
$$H_c = F_c / B,$$

а для сеток с лобово-внешним, внешним и внутренним подводами

$$H_c = 0,5(F_c / B - \pi R),$$

где  $B$  - ширина сеточного полотна;  $R$  - радиус закругления направляющих.

Уровень воды перед сеткой и после нее (см. рис. 5.68 и 5.69) определяют по формулам:



**Рис. 5.69.** Схема к определению отметки дна насосной станции

$$A' = \text{Мин УВ} - \sum h_n; \quad B' = A' - h_c,$$

где Мин УВ - минимальный расчетный уровень воды в реке;  $\sum h_n$  - сумма потерь напора при течении воды от решетки до водоочистной сетки; например, для водозабора по

рис. 5.40,а  $\sum h_n = h_p + h_b + h_{сам} + h_{м.с.}$ , здесь  $h_p$ ,  $h_b$ ,  $h_{сам}$ ,  $h_{м.с.}$  - потери напора соответственно в решетке, водоприемнике, самотечном водоводе, в местных сопротивлениях водовода, а также в сетке ( $h_c$ ) при расходе воды  $Q_p$  (аварийный режим).

**Отметку днища** берегового колодца определяют по формулам:

$$Дн = A' - H_c - h_{пр}; \quad Дн = B' - h_1 - h_2 - h_3$$

где  $H_c$  - высота сетки (по расчету) ниже минимального расчетного уровня воды  
 $h_{пр}$  - глубина приемка для сбора осадка, равная 0,5 - 0,7 м;  $h_1$  - допускаемое заглубление отверстия всасывающего водовода диаметром  $d$ ;  $h_1 = (1,5...2)D$  [диаметр отверстия воронки  $D = (1,3...2)d$ ];  $h_2$  - расстояние от низа воронки до дна,  $h_2 > 0,8D$ ;  $h_3$  - высота слоя бетона для образования приемка и откосов для сползания осадка к приемку;  $h_3$  зависит от глубины приемка и принятого уклона откосов; ориентировочно  $h_3 = h_{пр} + (0,15...0,25)$ , м.

Из двух полученных расчетом отметок днища принимают меньшую.

Если сеточное отделение насосной станции оборудуется вращающейся водоочистной сеткой (см. рис. 5.69), отметку днища определяют по формулам:

$$Дн = A' - H_c - R - h; \quad Дн = B' - h_1 - h_0 - h_2 - h_{пр},$$

где  $h$  - расстояние от низа сетки до днища сооружения, зависящее от типа и конструкции сетки; ориентировочно составляет 0,4 - 0,8 м;  $h_0$  - вертикальный размер отверстия всасывающей трубы к насосам.

Из двух рассчитанных отметок днища сооружений принимают меньшую. Отметка оси насоса (при его расположении «под заливом») определяется по формуле

$$ОН = B' - h - I,$$

где  $B'$  - отметка уровня воды в сеточном (или водоприемно-сеточном) отделении при аварийных условиях эксплуатации (при расходе воды  $Q_p$  в одной секции водозабора);  $h$  — высота слоя воды над верхом корпуса насоса, принимаемая 0,2 - 0,3 м;  $I$  - расстояние от оси насоса до его верхней части, определяемое по справочным данным.

Высоту слоя бетона  $h_6$  над железобетонным дном (см. рис. 5.69) определяют по формуле

$$h_6 = ОН - Дн - h - h_{ф.п} - h_{ф},$$

где  $h$  - расстояние от оси насоса до лапок (по справочным данным);  $h_{ф.п}$  - высота фундаментной плиты (по справочным данным) или высота сварной рамы, равная 0,2 - 0,25 м;  $h_{ф}$  - высота фундамента, равная 0,15 - 0,2 м.

Высота слоя бетона должна быть достаточной для устройства приемка (глубиной не менее 0,7 м) с целью отбора профильтрованной воды.

**Расчет водоводов** (самотечных, сифонных, всасывающих и напорных) выполняют применительно к нормальным и аварийным условиям. Скорости течения воды в водоводах при нормальных условиях рекомендуется принимать по табл. 5.11.

Скорость течения воды в напорных коммуникациях внутри насосной станции принимают до 1,5 - 3 м/с.

Принятый диаметр самотечных водоводов  $D$ , м, должен быть проверен на незаиляемость транспортируемыми по водоводу мелкими наносами в количестве  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, имеющими средневзвешенную гидравлическую крупность  $\omega$ , м/с, по формуле:

$$v \geq v_{нз} = \sqrt[3]{\rho \omega D / (0,11(1 - \omega / v_0)^{4,3})} \quad (5.26)$$

и на подвижность попадающих в водовод влекомых наносов крупностью  $d$ , м, по формуле:

$$v \geq A(dD)^{0,25}, \quad (5.27)$$

где  $v$  и  $v_{нз}$  - средняя и незаилающая скорости течения воды в водоводе м/с;  $v_0$  - динамическая скорость;  $A$  - параметр, принимаемый равным 7,5 - 10.

Полностью исключить осаждение взвешенных частиц в самотечных водоводах, диаметр которых был подобран с учетом незаилающих скоростей течения воды, как правило, не удается. Для удаления осадка из самотечных водоводов предусматривают их промыв.

Аналогичное решение приходится принимать и тогда, когда незаилающая скорость оказывается значительно больше скорости, рекомендуемой в табл. 5.11. В этом случае в двухсекционном водозаборе большую часть года в эксплуатации могут находиться оба самотечных водовода, а в период половодья или паводка - один. Скорость течения воды в нем при этом увеличивается в 2 раза, вследствие чего удается обеспечить транспорт наносов по водоводам в береговые сооружения водозабора, откуда их удаляют специальным насосом или гидроэлеватором.

Таблица 5. 11.

Диаметр водовода, м	Скорости течения воды, м/с, в водоводах	
	самотечных	всасывающих
300-500	0,7-1	0,75-1,1
500-800	1-1,4	1,1 - 1,5
Более 800	1.5	1.2-2

Промывную скорость течения воды можно определить по формуле (5.27), приняв  $A = 10$ ; ( $A = 5$  для скорости начала общего движения наносов и  $A = 15$  для скорости начала взвешивания наносов со дна).

Потери напора в водоводах (по длине) определяют по формулам:

$$h = iL; \quad h = 1000iL; \quad h = SQ^2 = S_0IQ^2,$$

где  $i$  - пьезометрический уклон;  $I, L$  - длина водовода (в м и км соответственно);  $S$  - сопротивление;  $Q$  - расход воды;  $S_0$  - удельное сопротивление.

Потери напора на местные сопротивления определяют по формуле  $h = \xi v^2/2g$ , где  $\xi$  - коэффициент местного сопротивления,  $v$  - скорость течения воды, м/с, за местным сопротивлением;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

Диаметр труб коммуникаций для промыва самотечных водоводов и решёток водоприемника обратным током воды определяют расчетом. Например, при промыве одного (из двух) самотечных водоводов по второму водоводу надо будет пропустить расход воды  $Q_B$ , который двумя насосами (рабочим и резервным) будет подаваться в напорный коллектор. Из напорного коллектора расход воды  $0,5 Q_B$  будет подан на промыв, а оставшаяся часть  $0,5 Q_B$  будет подана потребителю. Желательно подавать на промыв расход воды больший  $0,5 Q_B$ . Но снижение подачи воды потребителю регламентируется СНиП, следовательно, подача на промыв увеличенных расходов воды за счет снижения подачи потребителю может быть допущена в исключительных случаях и лишь кратковременно (например, на промыв сороудерживающих решеток). Поэтому желательно по второму водоводу забрать из источника расход воды  $1,5Q_B$  (тремя насосами,

предусмотрев для этого необходимые переключения); из этого расхода  $0,7 Q_v$  подать потребителю, а  $0,8 Q_v$  - на промыв.

Таким образом, насос, забирая воду из реки при некотором ее уровне, под этот же уровень будет подавать промывной расход, т.е. практически весь напор насоса должен быть равен сумме всех гидравлических сопротивлений по пути движения воды при промыве. Если из этой суммы на водовод (длиной  $l$ ) для подачи промывного расхода воды  $Q_{пр}$  приходится потери напора  $h_{пр}$ , то удельное сопротивление этого водовода  $S_0$  можно найти  $S_0 = h_{пр} / (lQ^2)$  и определить диаметр водовода.

**Наивысшая допустимая отметка оси насоса** может быть определена по формуле

$$OH = \text{МИН УВ} + H_{\text{вак}}^{\text{доп}} - \sum h_{\text{п}} - v^2/2g,$$

где Мин УВ - отметка минимального расчетного уровня воды в реке; допускаемая вакуумметрическая высота всасывания насоса, определяемая по справочным данным;  $\sum h_{\text{п}}$  — сумма потерь напора при движении воды в сооружениях от водоприемных отверстий до насоса при аварийных условиях эксплуатации;  $v^2/2g$  - скоростной напор во всасывающем патрубке насоса.

По этой формуле выполняют расчеты при расположении насосов выше минимального уровня воды в водоисточнике, например, для водозаборных сооружений, изображенных на рис. 5.40.

**Расчет импульсного промыва** сороудерживающих решеток затопленных водоприемников состоит в определении максимальной скорости течения воды в самотечном водоводе при промыве. По этой скорости можно косвенно судить об эффективности его применения (например, в сопоставлении с возможно достижимой скоростью течения при промыве обратным током воды). Максимальная скорость течения воды в самотечном водоводе  $v_{\text{max}}$ , м/с, при некоторых принятых значениях  $z_1$ ,  $L$ ,  $D$  и  $d$  (см. рис. 5.48) определяется по формуле

$$v_{\text{max}} = (0,5\pi(z_1 + z_2)/T_1) * (F / \omega)$$

где  $z_1$  и  $z_2$  - полуамплитуды колебания уровня жидкости в вакуум-стояке, м;  $T_1$  - продолжительность первого полупериода колебания уровня жидкости в вакуум-стояке (рис. 5.70), равная

$$T_1 = 1,2 \pi \sqrt{(L/g)(F/\omega)},$$

где  $F$  и  $\omega$  - площади живого сечения вакуум-стояка и самотечного водовода соответственно.

Математическая зависимость  $z_2$  от  $z_1$  и гидравлических характеристик системы описывается уравнением

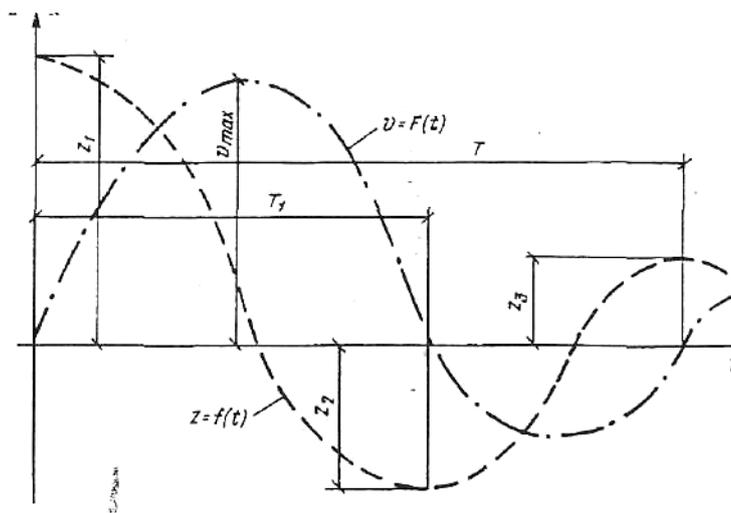
$$mz_2/\theta + \ln(1 - mz_2/\theta) = \ln(1 + mz_1/\theta) - mz_1/\theta, \quad (5.28)$$

где  $\theta$  - характеристика основного гидравлического сопротивления, равная  $\theta = (L/\psi)(\omega/F)$ .

При этом  $\psi$  находят по формуле:

$$\psi = \lambda L / D_c + \sum \zeta + 1$$

где  $\lambda$  - коэффициент гидравлического трения;  $L$  и  $D_c$  - длина и диаметр самотечного водовода, м;  $\sum \zeta$  - сумма коэффициентов местных сопротивлений при движении воды от водоисточника до вакуум-стояка включительно.



**Рис. 5.70.** Схема к расчету импульсного промыва

Дополнительное сопротивление в отверстии для впуска воздуха в вакуум-стояк выражается через основное гидравлическое сопротивление  $h_{доп} = \eta h_{осч}$ . Тогда полное сопротивление составит:

$$H = h_{осч} + h_{доп} = h_{осч} + \eta h_{осч} = (1 + \eta) h_{осч} = m h_{осч}$$

где  $m = 1 + \eta$  - величина, входящая в уравнение (5.28).

Характеристику дополнительного сопротивления  $\eta$  находят по формуле

$$\eta = 0,0004(D/d)^4,$$

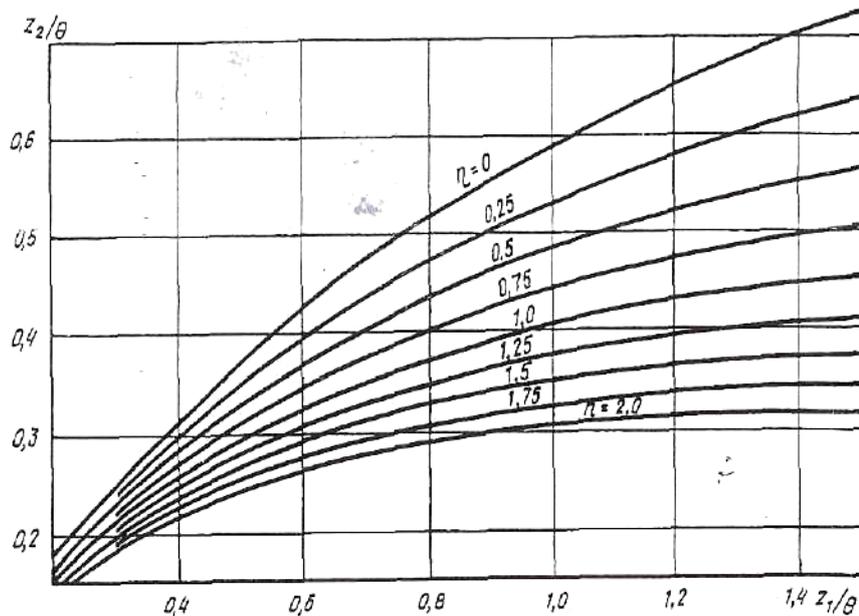
где  $D$  и  $d$  — диаметр соответственно вакуум-стояка и клапана для впуска воздуха.

Уравнение (5.28) прямого решения не имеет. На рис. 5.71 приведены зависимости  $z_2/\theta = f(z_2/\theta; \eta)$ , по которым находят сначала  $z_2/\theta$ , а затем и  $z_2$  для определения  $v_{тах}$ .

**Неразмывающую скорость течения воды**, м/с, при проверке размываемости дна и определении крупности камня для крепления определяют по формуле:

$$v = 4(d_0 H)^{0,25}$$

где  $d_0$  - средневзвешенный диаметр отложений дна русла или каменного крепления, м;  $H$  - глубина потока, м.



**Рис. 5.71. График к расчету импульсного промыва**

**Высоту наката волны**, м, по откосу над уровнем спокойной воды определяют по формуле:

$$h_n = 2k_{ш} h_0 \sqrt{\lambda_0 / h_0} / m$$

где  $k_{ш}$  - коэффициент шероховатости, зависящий от типа покрытия откоса, равный для бетонного покрытия 0,9 м и для наброски из камня 0,5;  $h_0$  и  $\lambda_0$  - высота и длина волны соответственно пологость волны  $h_0/\lambda_0$  может быть принята ориентировочно равной 1:8 - 1:10);  $m$  - коэффициент откоса, равный отношению заложения к высоте ( $m = \lg Q = l/h$ ) для откосов земляного полотна с креплением бетонными плитами, мощением или набросной камня  $m = 2,25$ -3 и более.

## 16.11. ВОДОЗАБОРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ С ВОДОПРИЕМНЫМИ КОВШАМИ

Водоприемным ковшом называют специально обустроенный залив (канал), предназначенный для уменьшения скорости течения воды в нем, в конце которого располагают береговое водозаборное сооружение, как правило, совмещенного типа (см. рис. 5.44). Водоприемные ковши предназначены для защиты водозабора от шуголедовых помех при заборе больших расходов воды из рек тяжелыми с шуголедовыми условиями. Ковш может также применяться для увеличения относительного водоотбора из реки, создания необходимых глубин у места приема воды и предварительного частичного осветления воды от взвешенных наносов.

Ковши бывают полностью или частично выдвинутыми в русло или заглубленными в берег, их различают по направлению втекания воды и по конструктивным особенностям (с самопромывающимся входом, с регулятором, со струнаправляющей стенкой и другими устройствами). Ковш следует располагать на устойчивом, желательно одноруслевом глубоководном участке реки, где не наблюдаются русловые или береговые шугозажоры.

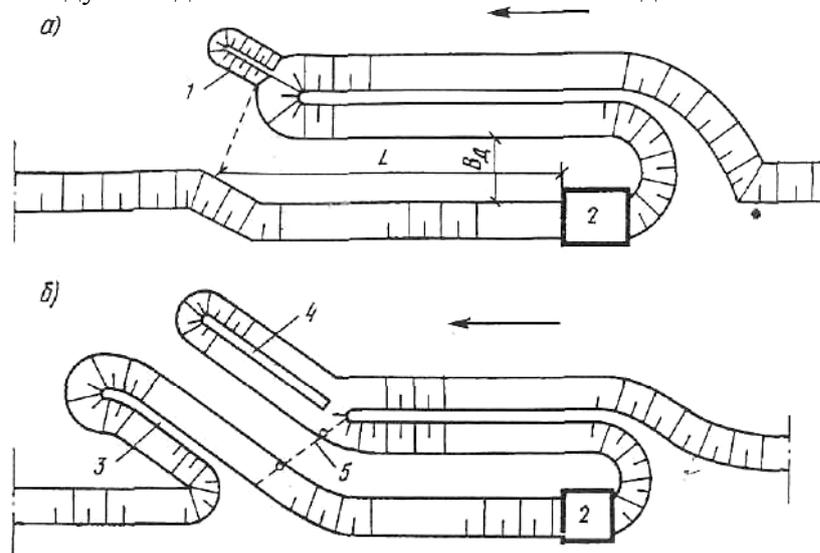
Вследствие малых скоростей течения воды в ковше (5 - 15 см/с) ледяной покров в ковше образуется на 2-3 сут ранее, чем в реке. Ледяной покров существенно уменьшает отдачу теплоты в атмосферу с поверхности воды и обеспечивает поддержание нулевой температуры воды на границе ее контакта с нижней поверхностью льда в ковше. Вследствие этого поступающая из реки в ковш переохлажденная вода с включениями кристаллов льда теряет переохлаждение за счет выделяющейся теплоты кристаллизации, а

кристаллы льда всплывают к поверхности. Поверхностная шуга не должна поступать в ковш, так как его объем не рассчитан для оттаивания и накопления поверхностной шуги. У ковша должны быть обеспечены условия для транзита шуги по руслу, чтобы входная часть ковша не оказалась изолированной от реки шугозажором.

Водоприемный ковш с низовым входом частично выдвинутый в русло реки (рис. 5.72,а) применяют на реках, для которых не характерны образование шугозажоров или особо тяжелые условия весеннего ледохода.

К головной части незаливаемой речной дамбы 1 примыкает заливаемая в половодье верховая шпора 2, расположенная под углом около  $135^\circ$  к направлению течения воды в реке. Переливающийся через гребень шпоры слой воды формирует винтовое течение воды в этом месте, размывающее отложение наносов у входа в ковш. Гребень шпоры не должен затопливаться в периоды шугохода.

Водоприемный ковш на рис. 5.72,б предназначен для поддержания у входа в него увеличенной глубины воды. В этом ковше к незаливаемой верхней дамбе 1 примыкает затопляемая в половодье дамба 5, формирующая винтовое течение на участке ковша между этой дамбой и незатопляемой нижней дамбой 4.



**Рис. 5.72.**  
**Водоприемный ковш**  
*а* - с наносозащитной шпорой, *б* - с самопромывающимся входом; 1 - наносозащитная шпора; 2 - насосная станция; 3 - низовая дамба затопляемая в половодье; 4 - верховая дамба, затопляемая; 5 - регулятор

Гидравлические расчеты ковшей изложены в трудах А.С. Образовского. Расчетами определяют основные размеры ковша; при этом длину ковша находят из условия оттаивания в ковше ледяной взвеси, а скорость течения воды в ковше (5-15 см/с) - в зависимости от скорости течения воды на расположенном выше перекате (0,6-1,5 м/с). Сечение ковша и ширину его по дну определяют по скорости течения воды в нем при минимальном уровне воды в период шугохода с учетом льда и наносов в ковше; при этом ширина ковша не должна быть менее ширины (5-8 м), обеспечивающей передвижение по ковшу земснаряда для очистки ковша от наносов. Ширину гребней дамб принимают 4-5 м, ширину берм 1,5-2 м, если они не предназначены для проезда машин и экскаваторов.

На шугоносных реках с достаточными глубинами отбор расходов воды до  $2-3 \text{ м}^3/\text{с}$  возможен с использованием русловых затопленных водоприемников; с недостаточными глубинами применяют ковши при  $Q_{\text{в}} > 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ . При этом следует учитывать, что в периоды минимального стока относительный водоотбор в ковш из открытого русла может быть в 2-3 раза больше, чем в водоприемники других типов. При заборе в ковш больших расходов воды желателен подвод к ковшу отработавшей теплой воды. Проектированию водоприемных ковшей часто предшествует проведение гидравлических исследований на моделях.

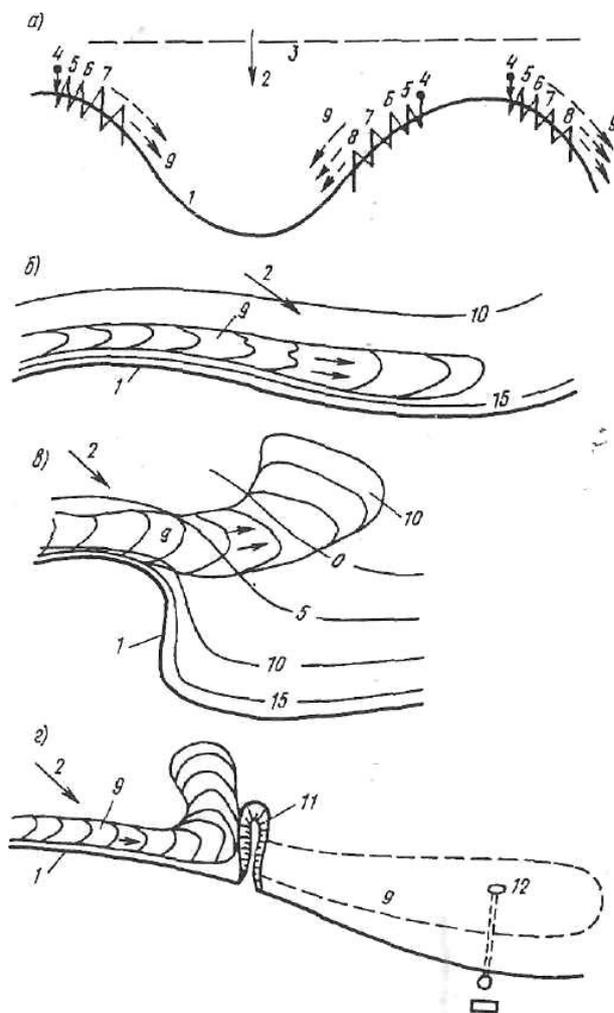
## 16.12. ВОДОХРАНИЛИЩНЫЕ ВОДОЗАБОРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Многие реки в настоящее время превращены в каскады водохранилищ комплексного назначения. При проектировании водозаборов из водохранилищ необходим учет волнения и течений, им возбуждаемых, движения наносов и переформирования побережья, особенностей шуголедовых явлений и биологических факторов.

Основным течением в водохранилище является транзитное. Структура его достаточно сложная, обусловленная изменением течений вследствие суточного и недельного регулирования мощности ГЭС, а также различной шероховатостью русла и пойм, меньшими глубинами воды на поймах. Транзитное течение сопровождается циркуляционными течениями на поймах, в бухтах, заливах и других местах. Структура этих течений может еще более усложниться в летний период, когда плотность верхних слоев уменьшается при их нагреве, а транзитные и циркуляционные течения могут стать плотностными, размещаясь в придонных более холодных и плотных слоях воды (стратифицированные течения воды).

Стратификация воды характеризуется температурным скачком на глубине 8-10 м. Забор более холодной воды для тепловых электростанций позволяет уменьшить расход забираемой воды и увеличить выработку энергии. Такой водозабор именуют глубинным или селективным; для его осуществления применяют водоприемники специальных конструкций, в том числе водоприемники с большой длиной и переменной высотой водоприемных отверстий (для обеспечения одинакового отбора воды по длине водоприемного «фронта»), водоприемники с горизонтальными козырьками над водоприемными отверстиями и др.

Волнение в водохранилище приводит к образованию ветроволнового течения, которое накладывается на уже перечисленные течения. Кроме того, в прибойной зоне при косом подходе волн к берегу возникает вдольбереговое течение (рис. 5.73,а). При разрушении волн на мелководье и переохлаждении воды в предледоставный период возможно образование кристаллов льда с включениями песчаных частиц из взвешенных волнением наносов. Вдольбереговые течения с облаками из утяжеленной песчаными частицами шуги могут следовать искривлениями линии берега (рис. 6.13,б), но при резком искривлении берега могут отклониться и вынести шугу в глубоководную часть водохранилища (рис. 5.73,б), где отмечались случаи закупорки такой шугой отверстий глубоко расположенных водоприемников (слоев внутриводного льда до 7 м). На рис. 5.73,г изображена одна из схем управления вдольбереговым течением с помощью криволинейной струенаправляющей дамбы.



**Рис. 5.73. Вдольбереговое течение**

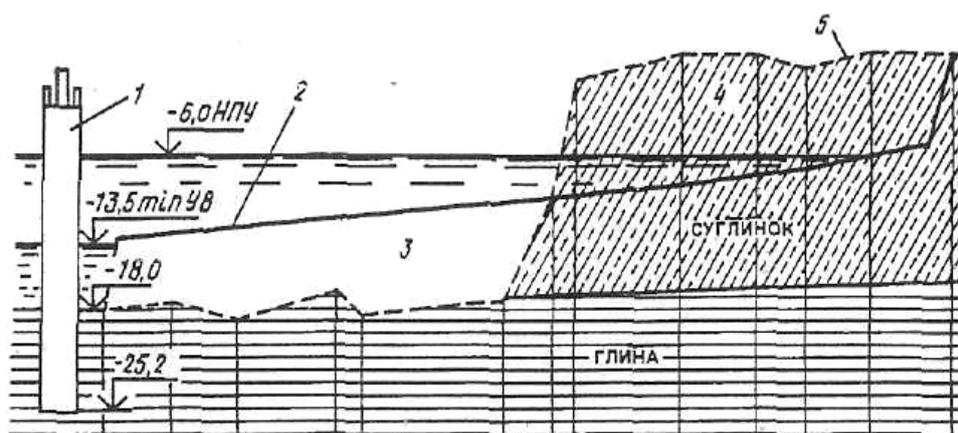
*а* - перемещение частиц наносов при волнении и формирование вдольберегового течения, *б* - то же, при плавных очертаниях выступов берега, *в* - то же, при резком искривлении линии берега, *г* - управление вдольбереговым течением с помощью криволинейной шпору, *1* - линия берега, *2* - направление луча волнения; *3* - линия гребня волны; *4-8* - последовательное положение частицы наносов; *9* - вдольбереговое течение, *10* - шлейф плотностного течения, *11* - шпора, *12* - водоприемник водозаборных сооружений

Ориентировочно можно считать, что разрушение волн происходит на глубине, называемой критической и равной 1,5-2,5 высоты волны, и что в зоне побережья с меньшими глубинами волновое воздействие на дно особенно интенсивно (последнее необходимо учитывать при выборе места расположения водоприемника).

При нагоне и подъеме воды у берега наблюдается градиентное течение у дна в сторону водоема; при сгоне - течение у дна из водохранилища в сторону берега.

Отмечены случаи закупорки водоприемных отверстий водоприемников, располагавшихся на глубине около 16 м и почти 30 м при ветре и волнении, вызвавших разрушение тонкого ледяного покрова в водохранилище, переохладение воды и образование внутриводного льда. Шуга ветром была перенесена с акватории водохранилища к наветренному берегу и водолазы при погружении в воду для очистки решеток от шугольда обнаружили скопления шуги на всей глубине их погружения.

Волнение и вдольбереговые течения приводят к размыву мысов и заносу бухт. На отмелях берегах выравнивание береговой линии происходит за счет аккумуляции наносов. На приглубых берегах контур берега может стать стабильным только после образования пологого подводного склона и пляжа достаточной ширины для гашения энергии волн. Переработка берегов водохранилищ - процесс длительный, требующий внимательного изучения и учета при проектировании водозаборных сооружений. На рис. 5.74 показано расположение водозаборного сооружения островного типа за пределами зоны переработки берега.



**Рис 5.74. Профиль берега в створе водозаборных сооружений**

1 - водозаборное сооружение; 2 - профиль устойчивого берега (расчетный); 3 и 4 - зоны аккумуляции и размыва берега; 5 - профиль берега до заполнения водохранилища

Водохранилище является отстойником значительных размеров, вследствие чего мутность воды в нем, как правило, меньше мутности в реке. Но в прибрежной зоне вследствие взмучивания отложений при волнении она может быть значительной; мутность уменьшается при удалении от зоны разрушения волн, но при длительном и сильном волнении она остается значительной даже на расстоянии 2 - 3 км.

Замедление стока в водохранилищах способствует развитию в них различных организмов, в том числе фитопланктона, который в период прогревания воды вызывает ее «цветение». При штилевой погоде фитопланктон концентрируется в верхнем слое воды. Большая часть планктона состоит из сине-зеленых водорослей. При разложении планктона отмечается неприятный специфический запах. В водохранилищах на реках Днепр, Дон, Волга эксплуатация водозаборных сооружений осложняется вследствие обрастания решеток, сеток и водоводов ракушей и моллюсками дрейссены.

На водохранилищах возникают особые условия для смешения и распространения канализационных сточных вод, загрязнения ими водоема и его самоочищения; загрязнения могут распространяться в обе стороны от места их выпуска (даже при глубинном выпуске независимо от расхода сточных вод).

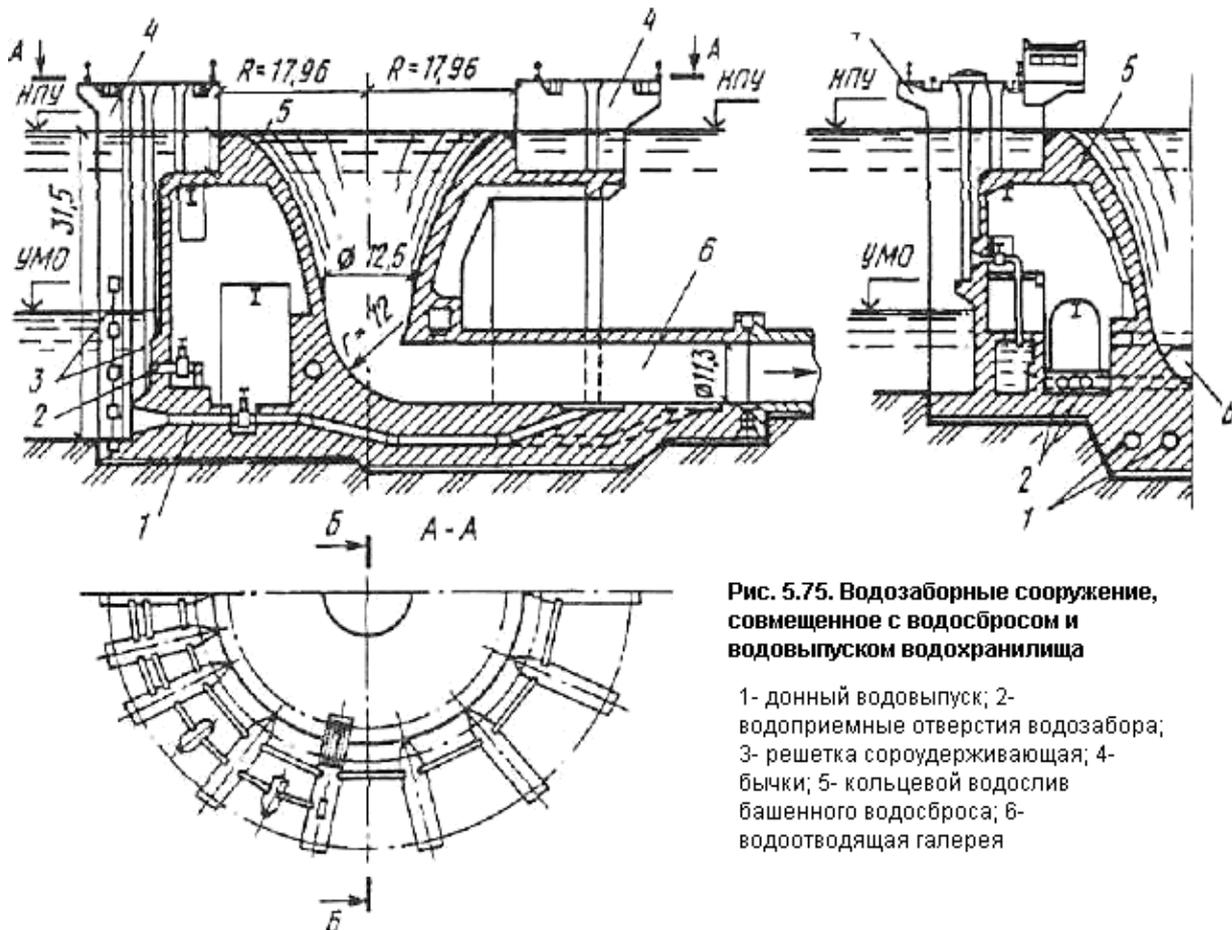
Выбор типа водозаборных сооружений определяется топографическими, гидрологическими, геологическими и гидрогеологическими, а также санитарными условиями, которые зависят от места расположения водозабора в приплотинной, средней зоне водохранилища или в его верховьях, в уширенной части водохранилища или в узком проливе, а также от климатических данных.

Приплотинные водозаборные сооружения можно совместить с башней донного водоспуска или с сооружениями водосброса, водоприемник может находиться в теле бетонной плотины. При строительстве водозабора в верховьях водохранилища необходимо учитывать отложение наносов и возможность переформирования ложа водотока. Водозаборные сооружения комбинированного типа состоят из береговых сооружений совмещенного типа для приема воды при высоких уровнях воды в водохранилище и дополнительно затопленных водоприемников, вынесенных в водохранилище и предназначенных для приема воды при низких уровнях.

При расположении водозабора в средней части водохранилища применяют рассмотренные выше речные водозаборные сооружения всех типов: отдельного и совмещенного (в составе затопленного водоприемника, самотечных и сифонных водоводов, берегового сеточного колодца и насосной станции, отдельно стоящей или совмещенной с сеточным отделением); комбинированного (с береговым и глубинным приемом воды); берегового с водоприемным ковшом или подводным каналом, а также островного (незатопляемый водоприемник, расположенный в акватории водохранилища,

совмещают с насосной станцией). Водозаборное сооружение последнего типа характеризуется сложностью строительства, но и большей бесперебойностью подачи воды, позволяя осуществлять различные эксплуатационные мероприятия. При эксплуатации берегового водозабора осложнения могут возникнуть вследствие отложений наносов, транспортируемых вдольбереговыми течениями, и нагона к водозабору волнением и ветром планктона, сора, шуги, битого льда, а также нагромождения льда в период ледохода.

На рис. 5.75 изображены сооружения башенного водосброса и донного водовыпуска водохранилища, совмещенные с водозабором.



**Рис. 5.75. Водозаборное сооружение, совмещенное с водосбросом и водовыпуском водохранилища**

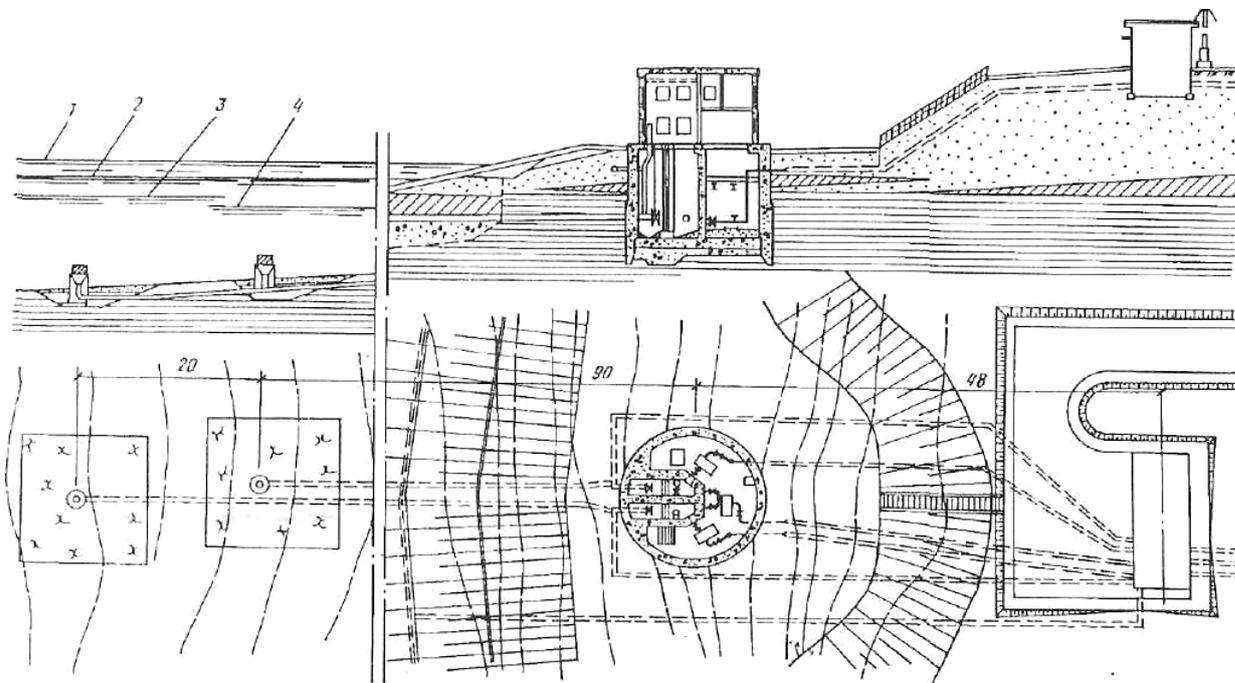
- 1- донный водовыпуск; 2- водоприемные отверстия водозабора; 3- решетка сороудерживающая; 4- бычки; 5- кольцевой водослив башенного водосброса; 6- водоотводящая галерея

Водозаборное сооружение (рис. 5.76) малой пропускной способности располагается на берегу водохранилища и состоит из двух затопленных водоприемников, самотечных водоводов и береговой насосной станции, совмещенной с сеточным отделением. Водоприемники располагаются в 90 и 110 м от уреза воды при нормальном подпорном уровне (НПУ) на глубине 11 и 12 м и имеют порог водоприемных отверстий высотой 2,5 м над дном (высота гряд наносов до 2 м). Водоприемники с круговым приемом воды, бетонные в металлических кожухах с плоскими рыбозащитными сетками из нержавеющей стали с ячейками 5x5 мм при скорости течения воды в ячейках 0,05 м/с. Промыв РЗУ предусмотрен обратным током воды и импульсный. Для борьбы с дрейссеной к водоприемникам подведена хлорная вода.

Верхняя часть водоприемника с круговым втеканием воды (рис. 5.77) съемная, восьмигранной формы в плане, разделена перегородками на восемь отсеков, предупреждающих сбой струй и неравномерность втекания воды в восемь водоприемных отверстий. Рыбозащитные сетки съемные с козырьками; промыв сеток - обратным током воды. Заглубление водоприемных отверстий на 12 м от НПУ, т.е. ниже зоны ветроволнового перемешивания воды. Такое заглубление будет способствовать

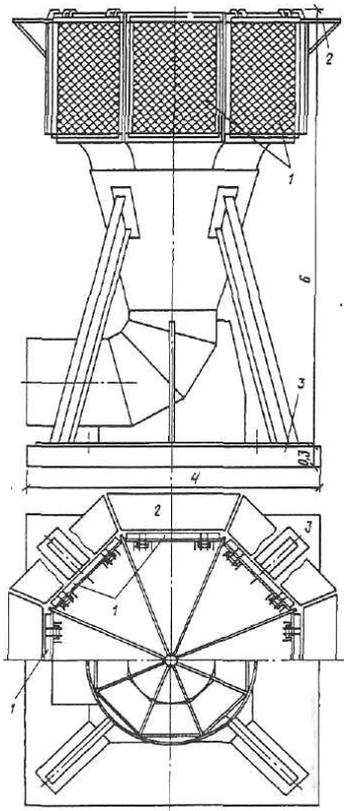
забору воды в летнее время из придонных слоев воды без планктона рыбной молоди, а в осенний период без шуги и снежуры.

Для забора воды при НПУ и при сработке водохранилищ, иногда применяют также двухступенчатые водозаборные сооружения, осуществляемые в одном блоке или в виде двух водозаборных сооружений, одно из которых подаст воду во второе при низких уровнях воды.



**Рис. 5.76. Водохранилищные водозаборные сооружения**

1 - максимальный уровень воды; 2 - НПУ; 3 - уровень предполоводной сработки; 4 - минимальный уровень воды (предельная сработка водохранилища)



**Рис. 5.77. Водоприемник с круговым приемом воды**  
 1 - сетки рыбозащитные; 2 - козырем; 3 - железобетонная плита основания

Водозаборные сооружения на озерах устраивают аналогично водозаборам на водохранилищах. Следует отметить, что озера бывают мелководными (например, Арал) и глубоководными: (например, Байкал). На мелководных озерах водозаборные сооружения устраивают по схеме с самотечными линиями на глубоководных с выходом скальных пород - чаще по схеме берегового водозабора.

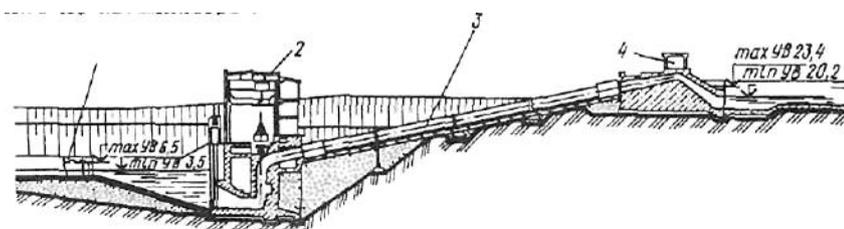
## **Глава 17. ОСОБЕННОСТИ ЗАБОРА ВОДЫ В СПЕЦИФИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

### **17.1. ВОДОЗАБОРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ НА КАНАЛАХ**

Весьма часто потребители воды находятся на значительном удалении от источников водоснабжения. В этом случае вода может транспортироваться к месту ее использования по открытым каналам, которые из-за большой протяженности и значительных размеров носят название магистральных. Для перекачки воды из водоисточника в канал, а также преодоления препятствий, встречающихся на трассе канала, сооружают насосные станции, оборудованные водоприемными сооружениями. В целом все сооружения по транспортированию воды представляют сложные гидротехнические системы.

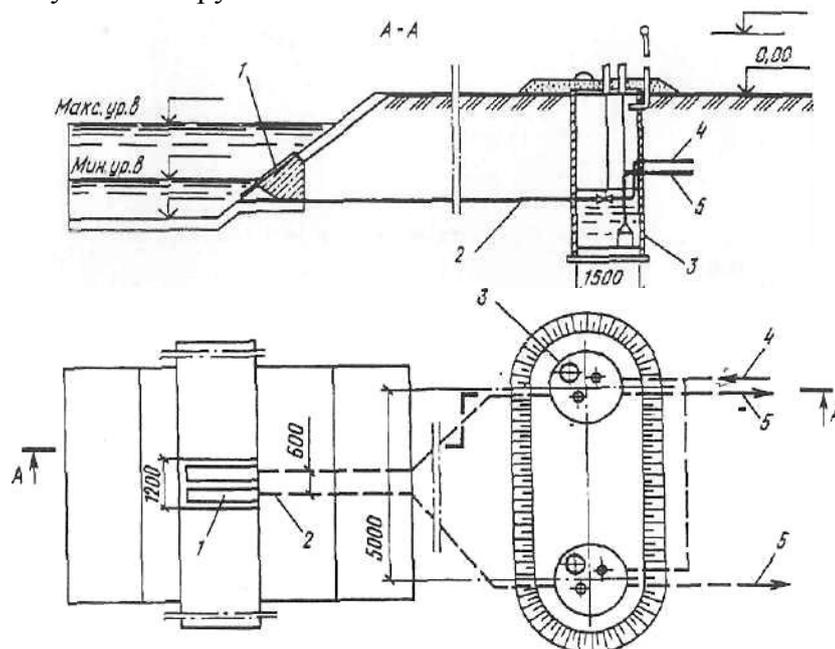
Схема водозаборного сооружения, характерного для большинства магистральных каналов, приведена на рис. 5.78. При подходе к насосной станции канал расширяется и образует аванкамеру. Вынесенные вперед сороудерживающие решетки образуют отдельно стоящее сооружение, которое обеспечивает нормальную работу всех насосов независимо от засорения одной из решеток. Кроме того, их обслуживание возможно в любой период. Благодаря оборудованию плоскими щитами насосы в случае необходимости позволяют осушать аванкамеры и производить их очистку от наносов и ремонтные работы.

При заборе воды (менее  $0,3 \text{ м}^3/\text{с}$ ) из тупиковых каналов можно применять простейшее водозаборное сооружение, в котором аванкамера представляет собой ковш с откосными стенками. Всасывающие трубы насосов располагают на торцевом откосе аванкамеры. Сороудерживающие решетки делают выносными и располагают в начале аванкамеры.



**Рис. 5.78. Водозаборное сооружение на магистральном канале**

1 - сороудерживающие сооружения; 2 - насосная станция 3 - напорные водоводы, 4 - водовыпускное сооружение



**Рис. 5.79. Водозаборное сооружение на транзитном канале**

Камерные водоприемники устраивают обычно при заборе воды, большем  $0,3 \text{ м}^3/\text{с}$ . Они бывают совмещенными со зданием станции применяют, как правило, для станций, оборудованных вертикальными или горизонтальными центробежными и осевыми насосами; отдельную - для станций камерного и незаглубленного типов с горизонтальными центробежными насосами.

Водоприемники оборудуют сороудерживающими решетками, установленными в пазы, и ремонтными затворами. Решетки устанавливают либо в вертикальном положении, либо под углом  $70-80^\circ$  к горизонту. В наклонном положении решетки устанавливают при малых амплитудах колебаний уровней воды в канале для станций малой и средней пропускной способности. Площадь сороудерживающей решетки определяется по допустимой скорости течения воды при подходе к ней. Допустимая скорость течения зависит от степени механизации очистки решеток и степени засоренности воды.

В случае забора воды из транзитного канала водозаборные сооружения располагают непосредственно на его берегу. В общем случае они состоят из ковша, сопрягающего канал с водоприемником, и самого водоприемника, из которого вода забирается всасывающими трубами насосов. Такие водозаборы применяют для станций малой и средней пропускной способности.

Водозаборное сооружение на транзитном канале пропускной способностью  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$  (рис. 5.79) состоит из двух самостоятельно работающих секций, каждая включает в себя водоприемник 1, береговой железобетонный водоприемный колодец 3 и соединяющий их самотечный трубопровод 2. Вода из берегового колодца забирается всасывающими трубами 5 насосов и подается к потребителю. Водоприемник промывается обратным током воды по трубопроводу 4. Этот водозабор допускает амплитуду колебания воды до 2 м.

## 17.2. ЗАБОР ВОДЫ ИЗ ГОРНЫХ И ВЫСОКОМУТНЫХ РЕК

В некоторых районах Российской Федерации источниками водоснабжения являются горные и высокомутные реки. Они характеризуются большими скоростями течения и малыми глубинами. При прохождении ливней в этих реках происходит быстрое нарастание паводка. Они транспортируют большое количество наносов как донных, так и взвешенных. В зимний период появляются шуга и донный лед. Часто возникают селевые потоки. На предгорных участках нередко наблюдается изменение русла рек. Все это осложняет забор воды. Поэтому, когда есть возможность, забор воды в предгорных районах осуществляют из подземных источников.

Для водоснабжения небольших поселков и промышленных предприятий, базирующихся на малых реках с непостоянно открытым потоком воды, при наличии подруслового потока может применяться комбинированный водозабор. Он представляет собой комбинацию водозаборного сооружения из открытого потока и водозабора подруслового типа.

В период, когда в реке транспортируется небольшое количество наносов, вода забирается из поверхностного потока. Во время паводков при большой мутности воды, а также в моменты пересыхания или замерзания русла вода забирается из подруслового потока. Устройство таких водозаборов возможно на участках, имеющих достаточно водопроницаемые грунты мощностью 7-8 м. Их устраивают путем заполнения траншеи, разработанной по всей ширине долины реки, суглинком или забивки металлического шпунта.

На небольших горных реках с постоянным током воды (при расходах в межень до 0,5-1,0 м<sup>3</sup>/с и максимальным до 200- 300 м<sup>3</sup>/с) применяют различные водозаборные гидроузлы. К ним относятся водоприемники с забором воды через донную решетку, плотинные гидроузлы с карманом, гидроузлы с криволинейным каналом (карманом) и др.

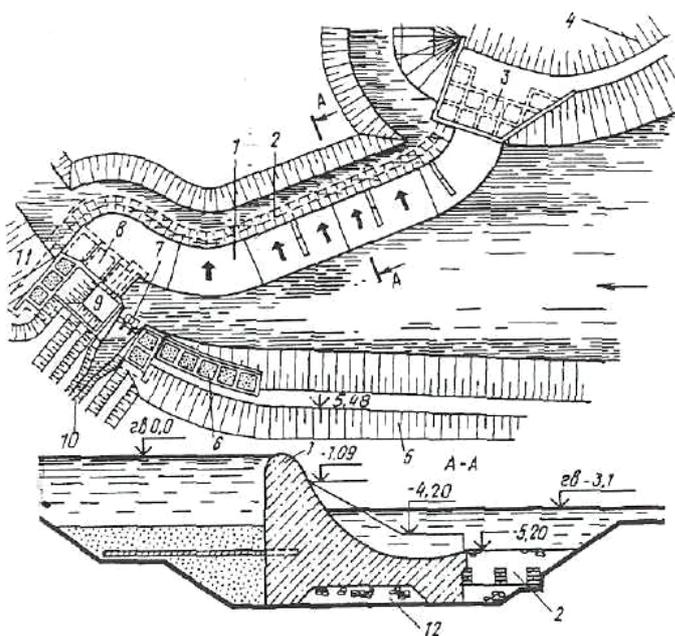
Водозабор с донной решеткой простейшего типа представляет собой водосливной порог, перегораживающий русло и возвышающийся над дном реки. В порог врезана водоприемная галерея, перекрытая сверху решетками. Вода, пройдя решетку, поступает в наклонную водоприемную галерею, откуда попадает в камеру с промывным устройством. Из камеры она отводится к отстойнику, а затем водопотребителю.

Для донных водозаборов характерны: малое стеснение русла реки; возможность забора при всех ее горизонтах; беспрепятственный пропуск максимальных паводков, плавника и крупных дойных наносов. К их недостаткам следует отнести: захват большей части наносов в водопроводящий тракт; засоряемость и обледенение решеток; большие расходы воды на промывку камер и удаление наносов за пределы водозаборного узла; образование отмелей из наносных отложений перед водоприемником. Донные водозаборы находят применение при расходах воды 0,1-8 м<sup>3</sup>/с.

Надежное водоснабжение из рек с постоянным током воды можно обеспечить путем устройства плотинных водозаборов, отличающихся разнообразием решений. Усовершенствованная схема водозаборного сооружения представляет собой гидроузел, в котором помимо плотины имеется криволинейный канал. При движении воды по этому каналу на изгибе потока возникает поперечная циркуляция воды, которая способствует движению донных наносов, находящихся в потоке, к выпуклой части берега. Сброс наносов в нижний бьеф осуществляется наносоулавливающими траншеями. Водоприемник располагают на вогнутой стороне этого канала за наносоулавливающими траншеями.

На предгорных участках рек с максимальным расходом более 300-500 м<sup>3</sup>/с может быть применена схема водозаборных сооружений (рис. 5.80), разработанная СоюзводоканалНИИпроект. Гидроузел обеспечивает пропуск внезапных паводковых вод.

гарантирует водозабор в межень, исключает попадание в канал крупных фракций наносов. Защита водозабора от наносов осуществляется благодаря поперечной циркуляции потока.



**Рис. 5.80. Водозаборное сооружение на предгорных участках рек**

1 - водосливная плотина; 2 - железобетонный сборный зуб, загруженный намнем; 3 - правобережный коробчатый устой; 4, 5 - сопрягающая дамба, соответственно право- и левобережная; 6 - левобережный коробчатый устой; 7 и 8 - водозаборный и промывной шлюзы; 9 - устой, сопрягающий водозаборный шлюз с промывным; 10 - водозаборный канал; 11 - струенаправляющая дамба у промывного шлюза; 12 - дренаж из камня

Циркуляция возбуждается путем бокового сброса воды через водосливную плотину. Узел водозаборных сооружений состоит из двух струенаправляющих дамб, водосливной плотины, промывного и водозаборного шлюзов и струенаправляющей дамбы в нижнем бьефе. Струенаправляющие дамбы в верхнем бьефе сжимают реку до устойчивой ширины и сопрягают сооружения гидроузла с берегом поймы реки. Водосливная плотина, имеющая криволинейное очертание в плане и прямой продольный уклон гребня, соответствующий уклону реки, предназначена для сброса максимальных расходов воды и возбуждения поперечной циркуляции потока. Струенаправляющая дамба в нижнем бьефе, примыкая к устью промывного шлюза, направляет поток в основное русло реки и защищает от размыва ее левый берег. Такие водозаборные узлы рассчитаны на забор воды до  $5 \text{ м}^3/\text{с}$ . Размеры всех основных элементов водозабора в соответствии с требованиями СНиПа назначают в зависимости от допустимых скоростей входа воды. Воду от водозабора подают самотеком, либо с помощью насосной станции, включенной в его состав.

В зависимости от местных условий и требуемой степени обеспеченности водоподачи применяют дублирование водозабора с несколькими водоприемниками разного типа или в систему сооружений включают резервные емкости, содержащие запас воды на время возможного перерыва в работе.

Для высокомутных водотоков существует закономерность суточного и часового изменения содержания взвешенных частиц в десятки раз. В этих случаях для возможности обеспечения работоспособности водозаборов и облегчения процесса очистки устраивают ковши и каналы на подходах к водоприемникам, которые играют роль отстойников и непрерывно восстанавливаются. В южных районах широко применяют водозаборы плавучего типа с тонкослойными модулями.

### **17.3. ЗАБОР ВОДЫ В РАЙОНАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ**

Гидрологический режим поверхностных источников водоснабжения Севера и Востока России определяется распространением мерзлоты, малым годовым количеством

осадков, низкими среднегодовыми температурами, длительным ледоставом, весенними разливами, летними паводками, тяжелым штурмовым режимом, возникновением заторов льда, образованием наледей. Роль многих факторов, влияющих на формирование режима поверхностных источников, полностью не изучена. Качество воды в источниках также отличается большим разнообразием. Все это чрезвычайно осложняет проблему надежного обеспечения потребителей водой. Не все реки в одинаковой степени пригодны для водоснабжения. На крупных реках забор воды возможен в любое время года без осуществления каких-либо дополнительных мероприятий по регулированию стока. Из средних рек, не замерзающих зимой, забор воды возможен без регулирования стока, но при выполнении некоторых дополнительных мероприятий. Реки, замерзающие на отдельных участках или на всей протяженности, могут использоваться для водоснабжения, если сохраняются круглогодичные талики и предусматриваются меры по регулированию и восполнению запасов подрусловых вод. Использование малых рек, замерзающих вместе с подстилающим аллювием, возможно лишь при регулировании стока. Большинство незамерзающих рек имеет малые глубины под мощным ледяным покровом.

Для водоснабжения в районах мерзлоты могут использоваться специально создаваемые водохранилища с регулированием стока замерзающих ручьев и рек; озера, как находящиеся в естественном состоянии, так и подпитываемые за счет летнего стока замерзающих рек, а также углубленные озера.

Источники водоснабжения в условиях вечномерзлых грунтов должны удовлетворять ряду специфических требований: обеспечивать захват воды с максимальной температурой; допускать забор требуемых расходов воды при любых гидрологических режимах; позволять водоприем без сложных и дорогостоящих мероприятий по руслорегулированию; быть близко расположенными к потребителю; иметь запас воды, достаточный для водоснабжения с учетом потерь на льдообразование, испарение и т.д. Выбор источника производится на основе оценки всех факторов, определяющих условия водоснабжения. При прочих равных условиях забор воды из природных поверхностных источников экономичнее создание водохранилищ на замерзающих водотоках. Последнее, как правило, является вынужденным решением. Особенностью подачи воды является транспортирование ее при больших скоростях, чем в обычных условиях эксплуатации, ее подогрев в месте водозабора.

Результаты исследований режима поверхностных вод Севера и их запасов в настоящее время до конца не обобщены, что затрудняет выбор источника водоснабжения.

Относительно малое водопотребление населенных пунктов позволяет использовать подрусловые (над- и межмерзлотные) воды. Для хозяйственно-питьевого водоснабжения в первую очередь используют подрусловые надмерзлотные воды, расположенные по долинам в виде разбросанных или сплошных бассейнов в пределах пойм замерзающих рек.

Водоохранилища используют при отсутствии или маломощности поверхностных и таликовых вод. При их использовании обеспечиваются высокие температуры воды (до 3-4 °С) и упрощается забор воды. Однако их строительство очень дорого.

Для небольших поселков в маловодных районах в качестве источника воды используют искусственно создаваемые запасы снега и льда. В Якутии и Магаданской области водоснабжение ряда населенных пунктов организуют из прудов-копаней вместимостью 300 - 800 тыс. м<sup>3</sup> и глубиной 6 - 8 м. Летом в копани закачивают воду из рек, замерзающих зимой. Их недостатком является малый полезный объем из-за потерь на льдообразование.

Подмерзлотные воды в настоящее время используют мало из-за недостаточной их изученности, сложности защиты скважин от замерзания, больших затрат на бурение. Подмерзлотные воды (пластовые, карстовые, трещинные) находятся на большой глубине (до 500 м и более).

При отсутствии источника, пригодного к использованию в естественном режиме, улучшения условий водозабора достигают регулированием стока, подпиткой озер водой из близлежащих источников, пополнением запасов подземных вод и др.

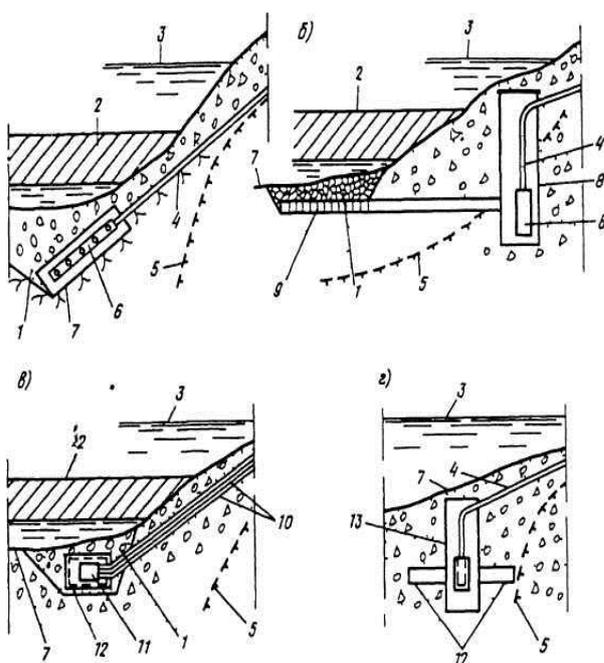
В условиях разнообразия забора вод типизация водозаборов затруднена. Существует большое разнообразие типов водозаборных сооружений, компоновочных схем и конструктивных решений водозаборов, а также мероприятий по обеспечению надежности водоприема. Водоприемники в условиях мерзлотных явлений должны обеспечивать защиту водоприемных устройств от шуги, донного льда, сора, от механического воздействия ледоходов, исключать перемерзания самотечных и сифонных линий, проходящих в береговой мерзлоте.

Водоприемники рекомендуется располагать в местах, где источники не промерзают или сохраняют непромерзающий подруслый талик, грунты остаются талыми, не образуются наледи, русло устойчиво, отсутствует влияние сооружений и коммуникаций, способных вызывать образование наледей, вероятность изменения теплового и гидрологического режима источника мала, возможно осуществление забора несколькими способами.

Береговые сооружения водозаборов целесообразно располагать на пологих берегах, где мерзлотно-грунтовые условия более благоприятны.

Русловые и береговые водоприемники, используемые для забора воды из рек средних широт, в условиях мерзлоты зачастую разрушаются ледоходами, обмерзают, заносятся наносами. Надежность их работы повышают, используя вихревые камеры и фильтрующие обсыпки, размещая водоприемники под руслом, улучшая промывку, развивая фронт водоприемника на уровне дна реки. Порог водоприемника заглубляют до дна или ниже дна реки с целью борьбы с шугой и забора воды при минимальных глубинах.

Забор воды из крупных рек со значительными колебаниями уровней может осуществляться водозаборными сооружениями, оборудованными погружными насосами. Примером такого решения могут сложить водозаборы с наклонным размещением насосов (рис 5. 81,а), построенные на реках Аляски и Канады. Примером другого решения являются водозаборы, в которых приемный колодец с погружными насосами размещают на затопливаемой большими водами площадке (рис 5 81,б) При этом значительно удешевляется строительство и сокращаются объемы работ.



**Рис. 5. 81 Водозаборные сооружения на реках с большими колебаниями уровня воды**

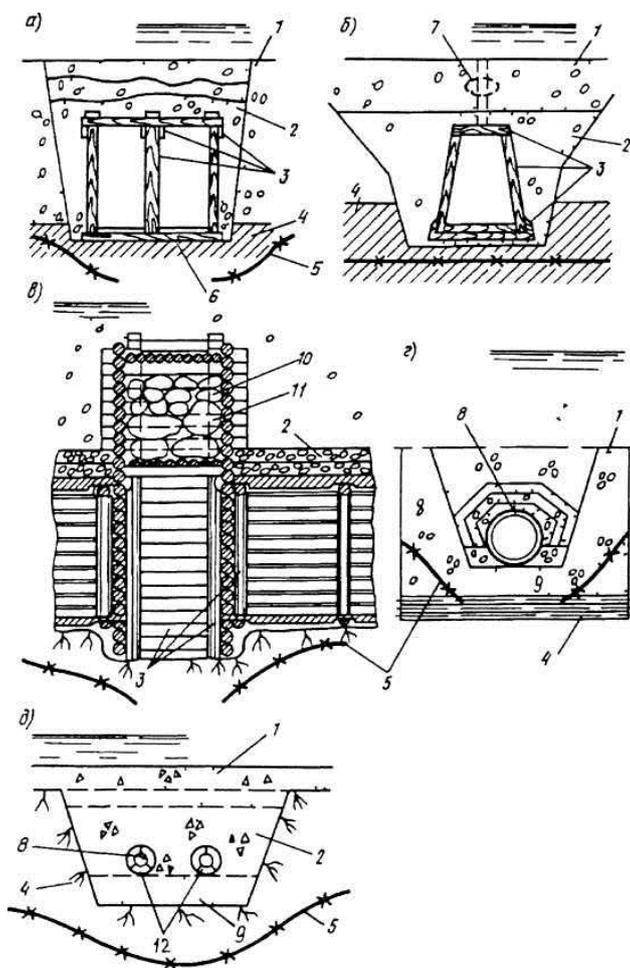
- 1 - фильтр
- 2 - лед;
- 3 - максимальный уровень реки;
- 4 - напорный водовод;
- 5 - граница мерзлоты;
- 6 - погружной насос;
- 7 - поверхность дна;
- 8 - береговой колодец;
- 9 - рабочая часть галереи;
- 10 - трубопроводы к гидроэлеватору;
- 12 - фильтрующие дрены (галереи);
- 13 - водозаборная камера

При больших колебаниях уровней воды и малых количествах отбираемой воды (2 - 5 тыс. м<sup>3</sup>/сут) целесообразно устройство водозаборов без дорогостоящих береговых

(сооружений. К ним можно отнести водоприемник с гидроэлеваторной (водоструйной) установкой, размещенной в русловом водоприемнике или в подрусовой фильтрующей дрене (рис 5. 81, в) и водозабор с гидроэлеватором (эрлифтом), размещенным непосредственно в затопляемом водоприемнике (рис 5. 81, г). Напорные трубопроводы этих водозаборов защищают от промерзания теплогидроизоляцией, греющим кабелем и др.

Воду из малых и перемерзающих рек можно забирать лишь при совместном заборе поверхностных и подрусовых вод. Для этих целей применяют фильтрующие и инфильтрационные водоприемники - галереи, дрены, фильтрующие траншеи. Виды их разнообразны, но общим является то, что они позволяют осуществлять прием воды летом - из открытых потоков, зимой - из подрусовых. Они находят наиболее широкое применение. Примеры комбинированных (инфильтрационно-фильтрующих) водоприемников приведены на рис 5. 82. Они обеспечивают защиту водозаборов от мусора, наносов и шуги. Гидравлический режим этих водоприемников отличается резко меняющимися параметрами поверхностных и подрусовых потоков. Методы расчета и проектирования их требуют дальнейшего совершенствования. Для исключения перемерзания водоприемников и водопроводящих систем - производят их утепление и обогрев различными способами.

Способы забора воды из озер и водохранилищ в районах мерзлоты относительно мало отличаются от применяемых в районах с умеренным климатом.



**Рис. 5.82** Примеры водозабора из малых м перемерзающих рек

*а и б* – подрусовые галереи; *в* - фильтрующий колодец; *г и д* – подрусовые дрены.

*1* – галереи; *2* – фильтр; *3* – конструкция галереи; *4* - ; *5* – граница мерзлоты; *6* - ; *7* - шпунтовая стена; *8* – дрена; *9*- подготовка; *10* - пригрузки; *11* – утепление колодца, *12* – горячая вода

## РАЗДЕЛ 6. НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

### Глава 18. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ

## ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Теория надежности - это наука, изучающая закономерности возникновения отказов технических систем. Отказы относятся к малоизученным явлениям в связи с тем, что причины возникновения отказов зависят от большого числа случайных факторов. Поэтому математическим аппаратом теории надежности является теория вероятностей и математическая статистика,

В соответствии с ГОСТ 27.002-83 надежность как техническое понятие может быть сформулировано следующим образом: «Свойство устройств, сооружений, систем и объектов в целом, а также изделий (продуктов) выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения нормируемых (расчетных) эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования».

Надежность характеризуется следующими свойствами:

безотказность - свойство сооружений и систем сохранять работоспособность в течение определенного времени;

долговечность - свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния;

ремонтпригодность - свойство сооружений и систем к предупреждению и обнаруживанию причин возникновения отказов, поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов;

сохраняемость - свойство сооружений и систем сохранять значение показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения или транспортирования,

Для количественной оценки перечисленных свойств существуют основные показатели.

1. Вероятность безотказной работы - вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ системы не возникнет. При использовании статистических и опытных данных вероятность безотказной работы может быть определена как отношение числа элементов ( $N - n$ ), проработавших безотказно до момента  $t$ , к числу  $N$  элементов, работоспособных в начальный момент  $t = 0$ :

$$P(t) = (N - n)/N = 1 - n/N,$$

где  $n$  - число отказавших элементов за этот интервал времени.

Вероятность отказа

$$Q(t) = 1 - P(t) = n/N.$$

В случае экспоненциального закона функция распределения наработки между отказами (вероятность отказа) будет

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t},$$

а вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-\lambda t}$$

где  $\lambda$  - параметр потока отказов или интенсивность отказов.

2. Параметр потока отказов является одним из важнейших показателей надежности элементов систем водоснабжения, в частности участков водопроводных сетей. Величина, обратная параметру потока отказов, называется наработкой на отказ, год, ч

$$T = 1/\lambda_{cp}.$$

3. Средний ресурс - средняя длительность работы изделия до предельного состояния или между капитальным и средним ремонтом. В результате наблюдения за эксплуатацией изделий определенного вида (механизмы и арматура водоснабжения) могут быть накоплены статистические материалы о фактических ресурсах этих изделий  $x$ . Тогда величина среднего ресурса

$$x = 1/n \sum_{i=1}^n x_i,$$

где  $n$  - число наблюдавшихся изделий данного вида.

4. Восстанавливаемый элемент системы водоснабжения может находиться либо в работоспособном состоянии, либо в неработоспособном. Периоды неработоспособности включают все операции связанные с обнаружением аварии, ожиданием ремонта и ликвидацией повреждения. Практика эксплуатации позволила получить статистические данные по времени восстановления

$$F_r(t) = 1 - e^{-\mu t},$$

где  $\mu$  - параметр времени восстановления.

Среднее время восстановления может быть получено по формуле:

$$T_{в\ ср} = \sum \tau_i / m,$$

где  $\tau_i$  - фактически наблюдаемые длительности восстановления

Для системы водоснабжения как системы массового обслуживания определить понятие отказа весьма сложно. Повреждение любого элемента системы сказывается на функционировании системы в целом. Так как в системе подачи и распределения воды широко используется принцип резервирования, то отказ какого-то элемента вызывает лишь временное снижение уровня ее работоспособности.

СНиП 2.04.02-84 определил нормативы такого снижения:

**для первой категории водообеспечения** (населенные пункты с числом жителей более 50 тыс. чел.) - допускается снижение подачи воды на хозяйственно-питьевые нужды не более 30 % расчетного расхода; длительность снижения воды ниже указанного предела допускается на время выключения поврежденных и включения резервных элементов системы, но не более чем на 10 мин;

**для второй категории водообеспечения** (населенные пункты с числом жителей от 5 до 50 тыс. чел.) - допускаемое снижение подачи воды то же, что и при первой категории; длительность снижения подачи не должна превышать 10 сут. Перерыв в подаче воды или снижение ниже указанного предела допускается на время не более 6 ч;

**для третьей категории водообеспечения** (населенные пункты с числом жителей до 5 тыс. чел.) - допускаемое снижение подачи воды то же, что и при первой категории; длительность снижения подачи не должна превышать 15 сут. Перерыв в подаче воды или снижение подачи ниже указанного предела допускается не более чем на 24 ч.

Следует отметить, что требования СНиП 2.04.02-84 касаются лишь снижения подачи воды и продолжительности такого снижения. Вместе с тем снижение напоров в системе, как и снижение качества воды, также будут приводить к отказу системы. Если качество воды регламентировано ГОСТ 2874-82 и снижение этих требований можно рассматривать как отказ системы, то в отношении снижения напоров никаких ограничений нет. По всей видимости понятие отказа должно основываться на противопожарных требованиях, т.е. напор в сети должен составлять не менее 10 м. Требования к надежности системы водоснабжения должны не только содержать ограничения по основным параметрам

системы (снижение напора, расхода, качества воды), но и нормировать вероятностные показатели надежности.

**Надежность водисточников.** Водисточник является одним из основных элементов системы водоснабжения. В случае отказа водисточника (т.е. невозможности получения из него воды в требуемом количестве) наступает отказ всей системы и никакие мероприятия по повышению надежности в последующих технологических элементах системы (насосные станции, очистные сооружения, водоводы, сеть) не исправят положения. Отказ водисточника может произойти в результате недопустимого снижения его дебита.

Вопросы бесперебойного водоснабжения становятся все острее не только в связи с увеличением водопотребления при неизменных водных ресурсах данного района, но и в связи с неравномерностью распределения стока в году. Так, даже в центральных районах (зонах достаточного увлажнения) меженные периоды с наименьшим стоком, составляющим 15 - 20 % годового, могут длиться 3 - 4 мес в зимний или летне-осенний сезон, т.е. периоды ограниченного водоснабжения могут быть достаточно длительными.

Систематические наблюдения за режимом и состоянием поверхностных источников России ведутся с прошлого века. В результате обобщений данных о той или иной характеристике стока составлена карта изолиний с показом их пространственного распределения по территории (рис. 6.1). Это позволяет довольно легко определить искомую величину стока в заданном районе. На карте изолиний выделено 14 районов летне-осеннего сезона. Границы районов проводились по водоразделам рек и границам резкой смены гидрогеологических условий. Площадь бассейна, отражая степень влияния гидрогеологических условий на сток, одновременно характеризует влияние на величину минимального стока и некоторых физико-географических факторов по сезонам (доля участия водоносных пластин в питании рек, водность сезона и др.).

В конце 20-х гг. Д.И.Кочерин установил, что величина минимального стока рек распределяется по территории в соответствии с климатическими поясами, т.е. подчиняется закону географической зональности. Это позволило ему построить первую карту минимального стока рек России.

В водном режиме рек наблюдаются две основные фазы - резкие колебания водности в форме половодья и паводков и относительно устойчивые периоды малой водности (межень или минимальный сток). Эти периоды обуславливаются сочетаниями многих физико-географических факторов и их влияние на режим источника можно рассматривать как случайные события.

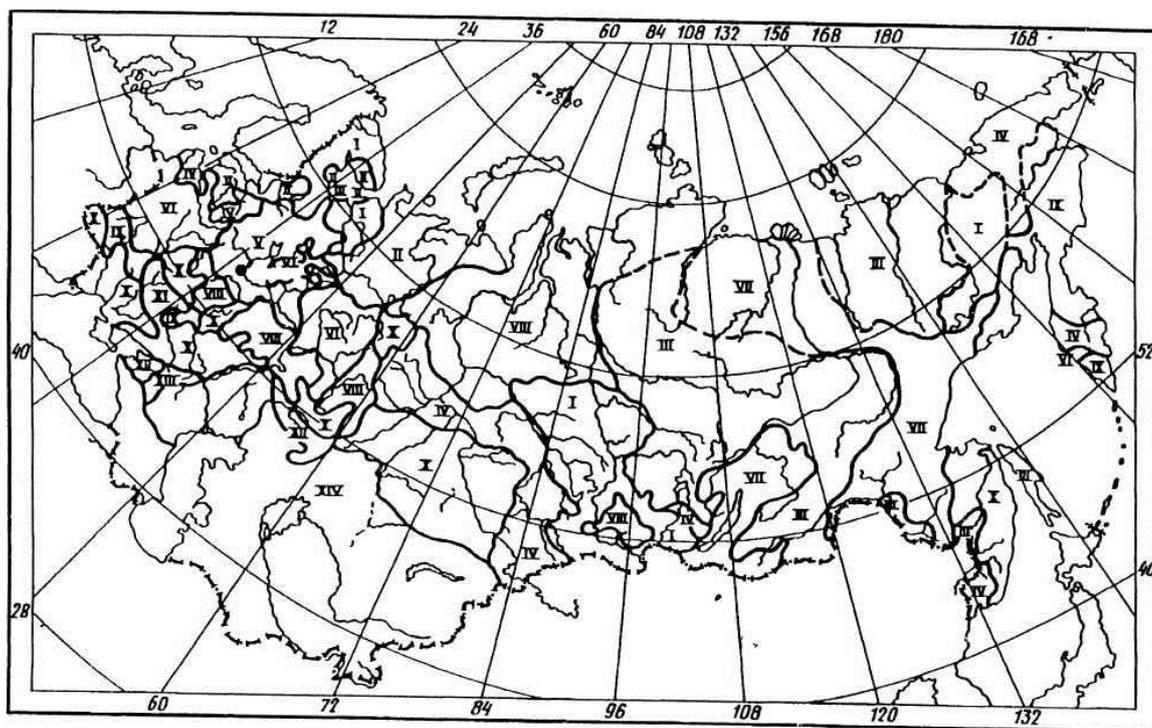
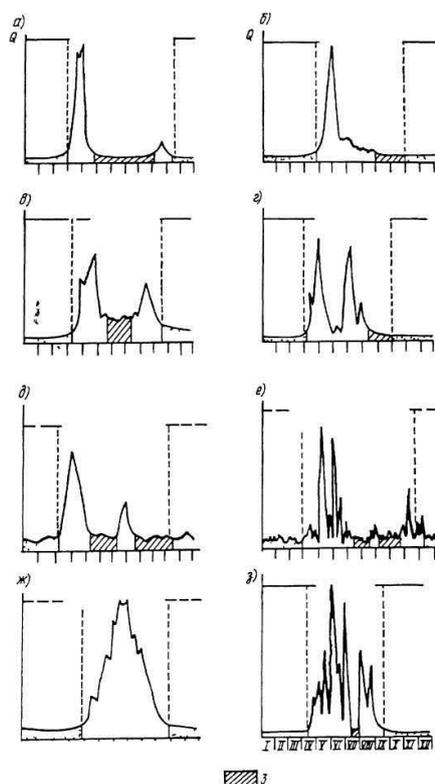


Рис. 6.1. изолинии районов с близкими значениями площади бассейнов в летнее осенний сезон

Поэтому вероятность получения численных значений колебаний уровней воды определяется на основании длительных наблюдений за фактическим режимом реки. Характер изменения расходов реки  $Q$  за определенный период представляется кривой, называемой гидрографом (рис. 6.2). Здесь показаны характерные гидрографы стока рек с различным типом меженного периода, который разделен на три зоны: первая - меженный период продолжителен и устойчив; вторая - меженный период непродолжителен и прерывист. Характеризуется повышенным питанием рек за счет поверхностного стока; третья - меженный период выражен нечетко.



**Рис. 6. 2 Гидрографы рек, характерные для районов с различными условиями формирования меженного стока**

1 - граница холодного и теплого сезонов; 2 - зимний меженный период 3 - летний, осенний зимний меженный период

К первой зоне относятся реки бассейнов Ладожского озера и Финского залива, Прибалтики, Дона, Волги, Урала, Тобола, Ишима, Иртыша, Вилюя, Онона (см. рис. 6.2,а,б). Ко второй зоне относятся реки Великая, Западная Двина, Неман, Днепр, Днестр. Для климатических условий этой зоны характерно наличие оттепелей в зимний сезон (см. рис. 6.2,в,д). К третьей зоне относятся районы, в которых почти ежегодно наблюдаются оттепели (Карпаты) или значительные дождевые паводки - Кавказ, Средняя Азия (см. рис. 6.2,г,ж,е,з).

Обеспеченность среднемесячных расходов воды поверхностных источников (табл. 6.1) должна приниматься по СНиП 2.04.02 - 84 в зависимости от категории системы водоснабжения (по степени обеспеченности подачи воды).

Если для системы водоснабжения I категории обеспеченность минимальных среднемесячных расходов воды составляет 95 %, то это означает, что вероятность появления меньших расходов не должна превышать 5 %. По кривой обеспеченности минимальных расходов воды в данном источнике (составленной в результате гидрометрических исследований) может быть определена вероятность превышения минимального расхода. Если эта вероятность не меньше 95 %, то источник может быть использован. В случае недостаточного расхода воды в поверхностном источнике надлежит предусматривать регулирование естественного стока воды в пределах одного гидрологического года (сезонное регулирование) или многолетнего периода (многолетнее регулирование), а также переброску воды из других, более многоводных поверхностных источников (п. 3.10 СНиП 2.04.02-84):

*Таблица 6.1*

Категория системы водоснабжения	Обеспеченность минимальных среднемесячных расходов поверхностных источников, %
I	95
II	90
III	85

Оценку ресурсов подземных вод надлежит производить на основании материалов гидрологических поисков, разведки и исследований в соответствии с «Классификацией эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод» и «Инструкции по применению классификационных запасов подземных вод к месторождениям пресных вод».

Для установления соответствия фактического дебита водозабора подземных вод принятому в проекте надлежит предусматривать пробные откачки.

**Надежность водозаборных сооружений.** Водозаборы из поверхностных источников по степени обеспеченности подачи воды подразделяют на три категории (табл. 6.2).

Таблица 6.2

Категория водозаборов	Обеспеченность расчетных уровней воды, % в поверхностном источнике	
	максимальная	минимальная
I	1	97
II	3	95
III	5	90

Водозаборы из поверхностных источников имеют достаточный резерв в виде двух самотечных линий, окон для приема воды, нескольких насосных агрегатов и т.д. Для всех этих элементов есть статистика из выхода из строя, что позволяет просчитать необходимые показатели надежности.

СНиП 2.04.02-84 рекомендует необходимое число резервных водозаборных скважин в зависимости от числа рабочих скважин (табл. 6.3).

Таблица 6.3

Число рабочих скважин	Число резервных скважин на водозаборе при его категории		
	I	II	III
1 - 4	1	1	1
5 - 12	2	1	-
13 и более	20 %	10 %	-

Для насосных станций I и II подъемов Ю.А.Ильиным собраны достаточные статистические данные по повреждаемости оборудования. Показатели надежности водопроводно-канализационного оборудования по данным эксплуатации, ТУ и ГОСТ приведены в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Оборудование	интенсивность отказов при доверительной вероятности $\delta$ $= 0,95 \cdot 10^4$ 1/(ч•км)		
	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\text{ср}}$	$\lambda_{\max}$
Водоприемники:			
раструбные	-	0,02	-
ряжевые	-	0,02	8
железобетонные	-	0,01	-
Самотечные линии из стальных труб	0,1	0,25	0,4
Насосы типов:			
НДн	1,8	2	3,9
НДс	1,6	2	3,2
Д	-	2,2	-
В	2	3,5	4,6
ЭЦВ 4	1	1,25	1,6
ЭЦВ 6	0,8	1,2	5,6

Оборудование	интенсивность отказов при доверительной вероятности $\delta = 0,95 \cdot 10^4$ 1/(ч·км)		
	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\text{ср}}$	$\lambda_{\max}$
ЭЦВ 8	0,9	2,1	4,6
ЭЦВ 10	0,9	1,5	3,2
Фильтры водозаборных скважин:			
проволочные	0,5	1,25	2
каркасно-стержневые	0,2	0,3	0,5
Обсадные трубы	0,06	0,15	0,3
Блоки управления	-	0,93	-
Водоприемные камеры, резервуары	0,01	0,03	0,1
Задвижки с электроприводом	0,1	0,6	1
Обратные клапаны	0,04	0,08	1

Рекомендации СНиП по числу резервных агрегатов в зависимости от числа рабочих агрегатов одной группы приведены в табл. 6.5.

На рис. 6.3 приведены осредненные значения функции распределения  $F(t)$  наработки на отказ (среднее время между отказами) для насосов марок К, В и Д, а на рис. 6.4 - для насосов ЭЦВ.

Рассмотрим вариант работы насосной станции из трех однотипных насосов. По условиям надежности отказ наступит в случае выхода из строя двух насосов, т.е. в неработоспособном состоянии может находиться только один насос. Обозначив вероятность безотказной работы насосов через  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$ , получим вероятность безотказной работы системы для работающих насосов:

трех

$$F_3 = P_{(H2)} = f_1 f_2 f_3$$

двух

$$F_2 = P_{(H3)} = (f_1 f_2 + f_1 f_3 + f_2 f_3) - 3 f_1 f_2 f_3$$

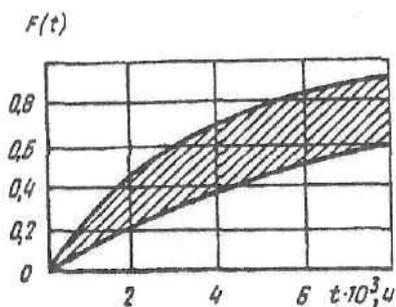


Рис. 6.3. Осредненные значения функции распределения наработки на отказ насосов К, НД, В и ЦНС

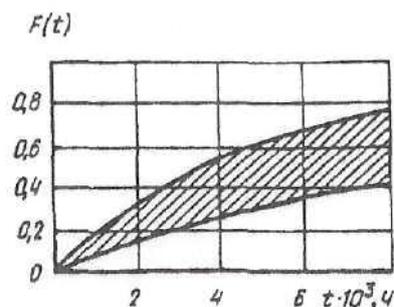


Рис. 6.3. Осредненные значения функции распределения наработки на отказ насосов ЭЦВ и АН

Полная вероятность безотказной работы системы составит:

$$F = F_3 + F_2 = (f_1 f_2 + f_1 f_3 + f_2 f_3) - 2 f_1 f_2 f_3$$

Поскольку насосы однотипные, т.е.  $f_1 = f_2$  то  $F = 3 f_1^2 - 2 f_1^3$ .

Таблица 6.5

Число рабочих	Число резервных скважин на водозаборе при его категории
---------------	---

агрегатов	I	II	III
До 6	2	1	1
От 6 до 9	2	1	-
Свыше 9	2	2	-

**Надежность станций водоподготовки.** Качество воды, подаваемой в системы водоснабжения, регламентирует ГОСТ 2874- 82. Этот документ устанавливает характеристики как нормального уровня качества воды, так и допустимые пределы его временного снижения.

Отказ станции водоподготовки происходит в случае недопустимого снижения расхода или снижения качества воды ниже допустимых пределов.

Снижение расхода воды имеет малую вероятность ввиду большого числа однотипных сооружений. Кроме того, предусмотрено отключение сооружений для профилактического осмотра, текущего и капитального ремонтов. Таким образом, в сооружениях уже заложен резерв для сохранения производительности станции.

Снижение качества воды может наступить либо из-за резкого снижения качества обрабатываемой воды (залповый сброс загрязнений промышленными предприятиями; сезонное ухудшение качества воды), либо из-за нарушения правил технической эксплуатации сооружений. Хотя все эти причины и могут иметь место, но относятся они к неквалифицированной работе соответствующих организаторов производства.

Надежность водоводов и водопроводных сетей. Несмотря на то, что водоводы и сети обладают достаточным резервом (водоводы в две нитки, кольцевание сетей), этот элемент в системе водоснабжения является наиболее уязвимым в отношении надежности. И дело не только в том, что сети имеют очень большое количество элементов, которые могут выйти из строя, но и в том, что сети наиболее близко расположены к потребителю и являются последним звеном, определяющим надежность системы.

Требования СНиП 2.04.02-84 позволяют при выключении одного участка снижать подачу на 30 % (для наиболее неблагоприятно расположенных мест водоотбора - на 75 % расчетного расхода воды). Свободный напор при этом диктуется противопожарными требованиями - не менее 10 м.

Длительность такого снижения определяется временем ликвидации аварии (или временем восстановления участка) и также регламентируется СНиП (табл. 6.6).

Таблица 6.6

Диаметр труб, мм	Расчетное время ликвидации аварии, ч, при глубине заложения труб	
	До 2	Более 2
До 400	8	12
От 400 до 1200	12	18
Свыше 1200	18	24

Статистические данные о повреждениях на трубопроводах систем водоснабжения собраны различными исследователями по городам России. Наиболее богатым рядом располагает Москва. На основании этих статистических данных (за 50 лет наблюдений) определены основные показатели надежности трубопроводов (табл. 6.7).

Таблица 6.7

Трубопроводы	$\lambda$ , 1 / (год•км)	1 / $\lambda$
Магистраль из чугунных труб диаметром, мм		
400	0,46	2,18
600	0,59	1,70
900	0,95	1,05
Магистраль из стальных труб диаметром, мм	0,92	1,09

400		
600	0,53	1,89
900	0,56	1,78
Водоводы из стальных труб диаметром 100 - 1400 мм	0,89	1,12

Основным методом повышения надежности является резервирование, т.е. устройство параллельных элементов системы. Рассмотрим варианты прокладки водоводов в две, три и четыре нитки. Оптимальным будет наиболее экономичный вариант при приемлемых надежностных показателях или вариант, обеспечивающий наиболее высокую надежность при относительно близких экономических показателях альтернативных вариантов. В основу оценок надежности систем принимаются статистические данные по повреждаемости трубопроводов (см. табл. 6.7).

Как стоимостные, так и надежностные показатели системы водоводов зависят от допустимого уровня снижения подачи воды в результате возможных аварий и общего числа параллельных водоводов. Согласно СНиП 2.04.02-84, при отключении одного водовода подачу воды объекту допускается снижать не более чем на 30 % расчетного расхода.

При прокладке двух водоводов каждый рассчитывается на расход  $Q_{ав} = 0,7Q$ , нормальная суммарная подача составляет  $1,4Q$ . Для работы в аварийных условиях достаточно одного из двух водоводов. Отказ системы может наступить только в результате одновременного отключения обоих водоводов (т.е. второй водовод откажет в период ремонта первого). Для водоводов диаметром 900 мм при длине 5 км интенсивность отказов будет равна  $2\lambda^2 I_B = 24,75^2 \cdot 0,002 = 0,090$  1 /год. Среднее время безотказной работы системы  $T_{cp} = 1 / \lambda = 11,1$  года.

При прокладке трех водоводов, каждый из которых пропускает расход  $0,35Q$ , т. е. при аварии одного водовода, два других обеспечат требование  $Q_{ав} = 0,7Q$ . Наивыгоднейший диаметр водоводов для этой системы 600 мм. Тогда интенсивность отказов  $6\lambda^2 I_B = 6 \cdot 2,95^2 \cdot 0,002 = 0,104$  1/год. Среднее время безотказной работы  $T_{cp} = 1 / \lambda = 9,6$  года. При прокладке четырех водоводов (два основных и два резервных) отказ системы наступает в случае выхода из строя двух водоводов. При диаметре водоводов 400 мм интенсивность отказов будет  $9\lambda^3 I_B = 92,3^3 \cdot 0,000004 = 0,00043$  1/год. Среднее время безотказной работы  $T_{cp} = 1 / \lambda$  практически бесконечно.

С точки зрения надежности третий вариант (прокладка четырех водоводов) имеет самые высокие показатели, а первый и второй варианты приблизительно одинаковые. Вопрос выбора предпочтительного варианта будет диктоваться стоимостью труб и их прокладки.

## РАЗДЕЛ 7. УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ

### Глава 19. СОСТАВ ПРИРОДНЫХ ВОД, ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ИХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ

#### 19.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ВОДЫ ПРИРОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ РАЗЛИЧНЫМИ ВОДОПОТРЕБИТЕЛЯМИ

В качестве источников централизованного водоснабжения используют поверхностные и подземные воды, а в безводных и засушливых районах - атмосферные осадки в виде дождя и снега. Состав поверхностных вод, рек, озер, водохранилищ, морей определяется климатическими и геоморфологическими факторами, почвенно - геологическими условиями, а также гидромелиоративными мероприятиями. Состав подземных вод (межпластовых, артезианских, карстовых и др.) зависит от условий их формирования.

В состав воды входят: соли, преимущественно в виде ионов, молекул и комплексов; органические вещества - в молекулярных соединениях и коллоидном состоянии; газы - в виде молекул и гидратированных соединений; диспергированные примеси; гидробионты (планктон, бентос, нейстон, пагон); бактерии и вирусы. Во взвешенном состоянии в природных водах содержатся глинистые, песчаные, гипсовые и известковые частицы; в коллоидном - различные вещества органического происхождения, кремнекислота, гидроксид железа (III), фульвокислоты, гуматы; в истинно растворенном состоянии находятся в основном минеральные соли, обогащающие воду ионами.

Химический состав природных вод, под которым понимается сложный комплекс минеральных и органических веществ в разных формах ионно - молекулярного и коллоидного состояния, подразделяется на пять групп: главные ионы, содержащиеся в наибольшем количестве (натрий  $\text{Na}^+$ , калий  $\text{K}^+$ , кальций  $\text{Ca}^{2+}$ , магний  $\text{Mg}^{2+}$ , сульфаты  $\text{SO}_4^{2-}$ , карбонаты  $\text{CO}_3^{2-}$ , хлориды  $\text{Cl}^-$ , гидрокарбонаты  $\text{HCO}_3^-$ ; растворенные газы (азот  $\text{N}_2$ , кислород  $\text{O}_2$ , диоксид углерода  $\text{CO}_2$ , метан  $\text{CH}_4$ , сероводород  $\text{H}_2\text{S}$  и др.); биогенные элементы (соединения фосфора, азота, кремния); микроэлементы (соединения всех остальных химических элементов); органические вещества.

Размеры взвешенных веществ изменяются от размеров коллоидных частиц до размеров грубодисперсных частиц (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Взвешенные вещества	Размер частицы, мм	Гидравлическая крупность, мм/с	Время осаждения частицы на глубину 1 м
Коллоидные частицы	$2 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	4 года
Тонкая глина	$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4} - 17 \cdot 10^{-5}$	0,5 - 2 мес.
Глина	$27 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	2 сут
Мелкий ил	$1 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-2} - 17 \cdot 10^{-3}$	4 - 18 часов
Ил	$5 \cdot 10 - 27 \cdot 10$	1,7 - 0,5	10 - 30 мин.
Песок: мелкий	0,1	7	2,5 мин.
средний	0,5	50	20 с
крупный	1,0	100	10 с

Содержание взвешенных веществ в поверхностных водоисточниках изменяется от нескольких единиц до десятков тысяч мг/л. Как правило, южные реки характеризуются большим содержанием взвешенных веществ. Так, в низовьях Сырдарьи их содержание достигает 12 - 14 г/л. Содержание солей в речных водах составляет 1,5 г/л и более. Минимальное содержание солей характерно для северных рек с поверхностным питанием (Печора, Сев. Двина, Кола), а максимальное - для южных, которые питаются подземными водами (Кура, Терек, Риони). Содержание органических веществ в речных водах достигает 150 мг/л и более (северные реки с поверхностным питанием). В воде озер содержание солей изменяется от 30 (Онежское) до 5820 мг/л (Иссык - Куль) и выше. Состав воды водохранилищ зависит от условий формирования (подготовка ложа и т.п.) и источников питания. Как правило, вода водохранилищ отмечается значительным содержанием органических веществ, наличием планктона и повышенной минерализацией в придонных слоях.

В отличие от поверхностных подземные воды характеризуются небольшим количеством органических веществ и значительным содержанием минеральных солей, а иногда и растворенных газов ( $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ). При наличии гидравлической связи между поверхностными и подземными водами последние имеют повышенную окисляемость. Наблюдается прямая зависимость между глубиной залегания подземных вод и степенью минерализации. Подземные воды часто характеризуются значительной жесткостью и повышенным содержанием железа, бора, марганца, брома и фтора. Л.А.Кульским предложена классификация примесей воды, основанная на их фазовом состоянии и дисперсности. Примеси воды разделены на четыре группы.

**Примеси первой группы** попадают в воду вследствие эрозии слагающих ложе водоема пород и смыва с поверхности почв. Они представляют собой нерастворимые в воде суспензии и эмульсии (а также планктон и бактерии), кинетически неустойчивые и находящиеся во взвешенном состоянии благодаря гидродинамическому воздействию водного потока. В состоянии покоя эти взвешенные вещества выпадают в осадок.

**Примеси второй группы** представляют собой гидрофобные и гидрофильные органические и минеральные коллоидные частицы, вымытые водой из грунтов и почв, а также нерастворимые и недиссоциированные формы гумусовых веществ, детергенты и вирусы, которые по своим размерам близки к коллоидным примесям.

**Примеси третьей группы** - это молекулярно растворимые вещества (органические соединения, растворимые газы и т.п.).

**Примеси четвертой группы** представляют собой вещества, диссоциированные на ионы. В результате процесса гидратации кристаллическая структура этих веществ разрушается. Устойчивость образующихся гидроксидов металлов прямо пропорциональна их заряду и обратно пропорциональна радиусу.

Концентрация отдельных примесей в воде определяет ее свойства, т.е. качество воды. Различают показатели качества воды физические (температура, взвешенные вещества, цветность, запах, вкус и др.), химические (жесткость, щелочность, активная реакция, окисляемость, сухой остаток и др.) биологические (гидробионты) и бактериологические (общее количество бактерий, коли - индекс и др.).

Для определения качества воды производят физические, химические, бактериологические, биологические и технологические анализы в наиболее характерные для данного водоисточника периоды года. Порядок отбора проб (ГОСТ 18963 - 73) и оценка качества воды регламентированы ГОСТ 17Л.3.03 - 77 (СТСЭВ 1924 - 79).

Для получения надежных данных по качеству воды источника необходимо: не менее двух анализов проб, взятых с интервалом в сутки, - для артезианских вод, предусматривая их предварительную откачку в течение суток; не менее четырех анализов по сезонам года - для подземных вод, лишенных водоупорной кровли и вскрываемых колодцами, а для ключевой воды необходим еще анализ воды, отобранной после сильного дождя; не менее четырех анализов проб воды по сезонам года (весенний и осенний паводки, межень и ледостав) - для

поверхностных источников, а для устьев рек, впадающих в море, - еще во время нагона воды с моря; не менее четырех анализов проб воды по сезонам года, а дополнительно после длительного волнения - для озер и водохранилищ.

Температура **воды** подземных источников характеризуется постоянством (8 - 12 °С), при этом с возрастанием глубины залегания вод сезонные колебания температуры уменьшаются. Температура воды поверхностных источников существенно меняется по сезонам года (от 0,1 до 30 °С) и зависит от поступления в них подземных вод, а также сбросов использованной охлаждающей воды. Оптимальная температура воды для хозяйственно-питьевого водоснабжения 7 - 11 °С.

**Прозрачность, мутность и взвешенные вещества** характеризуют наличие в воде суспензированных частиц песка, глины, ила, планктона, водорослей, которые попадают в нее в результате эрозии берегов, с дождевыми и талыми водами, взмучивания осадка со дна и т.п.

**Мутность воды** (понятие, обратное прозрачности), мг/л, определяют на мутномерах или на фотоэлектрокалориметрах (ФЭК). По ГОСТ 2874 - 82 мутность питьевой воды не должна превышать 1,5 мг/л.

**Цветность воды**, т.е. ее окраска, обусловлена присутствием в воде гумусовых и дубильных веществ, белково - и углеводородных соединений, жиров, органических кислот и других органических соединений, входящих в состав живых и растительных организмов, населяющих воду, и являющихся продуктами их жизнедеятельности или распада. Наряду с этим окраска воды может быть вызвана присутствием соединений железа, марганца, сточных вод некоторых производств или «цветением» водоемов. При массовом развитии водорослей из группы протококковых вода приобретает светло - зеленую окраску, диатомитовых - зеленовато - бурую, пиридиниевых - темно - бурую, сине - зеленых - изумрудно - зеленую.

Цветность природных вод обычно обусловлена гумусовыми веществами. При этом нерастворимые гумусовые вещества почвы в природных водах находятся лишь во взвешенном состоянии, а в коллоидно - и истинно растворенном состоянии присутствуют фульво - и гуминовые кислоты, преимущественно в виде солей щелочных и щелочно - земельных металлов.

Цветность воды измеряется в градусах платино - кобальтовой шкалы, для питьевой воды она не должна превышать 20 град. Цветность определяют колориметрически или применяют фото - электроколориметры и спектрофотометры (СФ). основанные на изменении оптической плотности воды.

**Привкусы и запахи**, встречающиеся в природных водах, могут быть естественного (присутствие железа, марганца, сероводорода, метана) или искусственного (сброс промышленных стоков) происхождения. По ГОСТ 3351 - 84 различают четыре основных вкуса воды - соленый, горький, сладкий, кислый. Многочисленные оттенки вкусовых ощущений, складываемые из основных, называются привкусами. Соленый вкус воды обычно обусловлен присутствием хлорида натрия; горький - сульфата магния; кислый вкус в большинстве случаев объясняется избытком растворенной углекислоты (минеральные воды); железистый привкус придают воде растворенные соли железа и марганца; щелочной - поташ, сода, щелочи; вяжущий - сульфат кальция, перманганат калия.

К запахам естественного происхождения относят: землистый, рыбный, гнилостный, сероводородный, ароматический, болотный, глинистый, тинистый и др.; искусственного происхождения - хлорный, камфорный, аптечный, фенольный, хлорфенольный запах нефтепродуктов.

Возникновение в поверхностных водоемах запахов естественного происхождения часто объясняется массовым развитием водорослей; диатомовых, сине - зеленых, хризомонады и т.д. В процессе жизнедеятельности водоросли продуцируют в воду специфические ароматические органические вещества. После отмирания они осаждаются

и гниют на дне, вызывая различные привкусы и запахи. Различные плесени и лучистые грибки (например, актиномицеты) также вызывают привкусы и запахи естественного происхождения.

Интенсивность и характер запахов и привкусов воды определяют органолептически, т.е. с помощью органов чувств, по 5 - балльной шкале или по «порогу разбавления» испытуемой воды дистиллированной водой. При этом устанавливают кратность разбавления, необходимую для исчезновения запаха или привкуса. Запах и вкус определяют непосредственным дегустированием при комнатной температуре, а также при 60 °С, что вызывает их усиление. По ГОСТ 2874 - 82 привкус и запах, определяемые при 20 °С, не должны превышать 2 баллов.

**Общий, сухой, прокаленный остаток** - понятия, позволяющие судить о количестве солей и концентраций примесей, содержащихся в природных водах. Общий или плотный остаток характеризует содержание в воде в основном примесей неорганического происхождения.

Сухой или растворенный остаток характеризует содержание минеральных солей и нелетучих органических соединений; прокаленный - содержание в испытуемой воде неорганических примесей. Согласно ГОСТ 17.1.3.03 - 77 растворенный остаток в воде источника питьевого назначения не должен превышать 1 г/л. При употреблении человеком воды с повышенным содержанием солей наблюдается гиперминерализация организма, что вызывает различные функциональные заболевания. В случае несоблюдения этого условия вода должна подвергаться опреснению.

Значение растворенного остатка лимитируется для воды, используемой при производстве кино - и фотопленки, капрона, капролактама, каучука, а также для питательной воды паровых котлов. Так, котлы высокого давления требуют воду, значение растворенного остатка которой близко к нулю.

**Хлориды и сульфаты**, мг/л или мг-экв/л, благодаря своей высокой растворимости присутствуют во всех природных водах обычно в виде натриевых, кальциевых и магниевых солей. При значительном содержании в воде хлориды и сульфаты являются причиной ее агрессивности по отношению к бетону. Воды, содержащие свыше 250 мг/л сульфат-ионов, оказывают разрушающее действие на бетонные конструкции вследствие образования гипса (результат реакции между сульфатами и известью цемента), что вызывает увеличение объема и образование трещин в бетоне. В свою очередь присутствие в воде значительных количеств хлор - иона приводит к выщелачиванию и разрушению бетонного камня вследствие образования с известью растворимых хлористого магния и кальция.

Наличие в воде значительных концентраций хлоридов и сульфатов свидетельствует о повышенном растворенном остатке воды, что служит препятствием для использования подобной воды не только для питания паровых котлов, но и для производства ряда полимеров, синтетического каучука, некоторых сортов бумаги и др. Присутствие в питьевой воде значительных количеств сульфата и хлорида натрия нарушает деятельность желудочно - кишечного тракта, в то время как сульфаты и хлориды магния и кальция обуславливают некарбонатную жесткость воды. Сульфаты в количестве свыше 500 мг/л придают воде горький вкус.

**Щелочность воды**, мг-экв/л, определяется суммой содержащихся в воде гидроксильных ионов и анионов слабых кислот - угольной, органических, а также бикарбонатных и карбонатных ионов. Различают бикарбонатную, карбонатную и гидратную щелочность.

**Щелочные металлы**, мг/л, в природных водах обычно представлены ионами калия и натрия с преобладанием последнего.

**Жесткость воды** обусловлена наличием в ней кальция и магния. Жесткость воды выражают и мг-экв/л (1 мг-экв/л жесткости или 12,16 мг/л ионов магния). Различают карбонатную, некарбонатную и общую жесткость воды. Карбонатная жесткость

обусловлена содержанием в воде карбонатных и бикарбонатных солей кальция и магния. Не карбонатная жесткость обусловлена кальциевыми и магниевыми солями серной, соляной, кремниевой и азотной кислот. Сумма карбонатной и некарбонатной жесткости определяет общую.

Жесткость природных вод не является вредной для здоровья человека, а скорее наоборот, так как кальций способствует выводу из организма кадмия, отрицательно влияющего на сердечно - сосудистую систему. Однако повышенная жесткость делает воду непригодной для хозяйственно - бытовых нужд, поэтому согласно ГОСТ 2874 - 82 норма общей жесткости 7 мг-экв/л, а допустимое значение - 10 мг-экв/л. Жесткость воды ограничивается в питательной воде котлов, так как соли кальция и магния образуют накипь на стенках котлов, что приводит к снижению их экономичности, а иногда к авариям. Жесткость воды лимитируется при использовании ее на предприятиях бумажной и текстильной промышленности, при производстве искусственного волокна, в добавочной воде оборотных систем водоснабжения и т.п.

**Железо и марганец** присутствуют в природных водах в формах, зависящих от величины рН, окисляемости и содержания кислорода. Так, железо может находиться в форме двух - и трехвалентных ионов, органических и неорганических коллоидов, комплексных соединений, в форме тонкодисперсной взвеси, сульфида железа, гидроксида железа (II). В подземных водах при отсутствии кислорода железо и марганец встречаются обычно в форме двухвалентных солей. В поверхностных водах железо и марганец встречаются в виде органических комплексных соединений, коллоидов или тонкодисперсных взвесей. Обычно содержание железа и марганца в природных водах не превышает нескольких десятков мг/л, а в шахтных водах достигает нескольких сотен мг/л и более. Длительное употребление человеком воды с повышенным содержанием железа может привести к заболеванию печени (гемосидерит), увеличивает риск инфарктов, негативно влияет на репродуктивную функцию организма. Такая вода неприятна на вкус, причиняет неудобства в быту, избыток марганца вызывает окраску и вяжущий привкус, заболевание костной системы, поэтому содержание железа в питьевой воде должно превышать 0,3 мг/л, а марганца - 0,1 мг/л.

Присутствие в воде железа и марганца может способствовать развитию в трубах и теплообменных аппаратах железистых и марганцевых бактерий, продукты жизнедеятельности которых вызывают уменьшение сечения, а иногда их полную закупорку. Содержание железа и марганца строго ограничено в воде, используемой при производстве пластмасс, кино - и фотопленки и бумаги, и текстильной, пищевой промышленности и т.п.

**Стронций** в концентрации свыше 7 мг/л вызывает урскую болезнь, рахит, ломкость костей.

**Кадмий** в питьевой воде при содержании свыше 0,001 мг/л вызывает болезнь "Итай - итай".

При избытке **ртути** в питьевой воде (свыше 0,0005 мг/л) возникает болезнь Минамата.

**Цинк** в концентрациях свыше 5,0 мг/л угнетает окислительные процессы в организме, вызывает анемию.

**Медь** в питьевой воде в концентрации свыше 1 мг/л вызывает заболевание печени, гепатит и анемию.

**Молибден** при содержании в питьевой воде свыше 0,25 мг/л вызывает подагру и молибденовую болезнь.

**Активная реакция воды** является показателем ее щелочности или кислотности, количественно характеризуется концентрацией водородных ионов. Для нейтральной воды  $pH = 7$ , для кислой - менее 7 и для щелочной - более 7. Природные воды по величине pH можно классифицировать как: кислые -  $pH = 1..3$ , слабокислые -  $pH = 4..6$ , нейтральные -

pH = 7, слабощелочные - pH = 8..10, щелочные - pH = 11..14. Активная реакция природных вод обычно варьируется в пределах 6,5 - 8,5, что соответствует лимитам питьевой воды.

**Окисляемость, воды** (т.е. количество кислорода в мг/л, эквивалентное расходу окислителя, необходимого для окисления примесей в данном объеме) обуславливается присутствием органических и некоторых легкоокисляющихся неорганических примесей, таких, как железо (II), сульфиты, сероводород и др. В зависимости от применяемого окислителя различают окисляемость перманганатную и бихромную. При этом окисляемость в 1 мгО<sub>2</sub>/л соответствует окисляемости 0,253 мгKMnO<sub>4</sub>/л.

Артезианские поды характеризуются низкой окисляемостью (около 2 мгО<sub>2</sub>/л), а окисляемость грунтовых вод зависит от глубины их залегания. Воды озер в среднем имеют окисляемость около 5 - 8 мгО<sub>2</sub>/л, воды рек характеризуются окисляемостью до 60 мгО<sub>2</sub>/л и более, а окисляемость болотных вод достигает 400 мгО<sub>2</sub>/л.

Для питьевой воды окисляемость не лимитируется. Однако она ограничивается для питательной воды котлов (из-за вспенивания воды), для охлаждающей воды (из-за возможного биообрастания труб и аппаратуры), а также для воды, используемой при изготовлении синтетических волокон и некоторых пластмасс. Повышенное значение отношения цветности к окисляемости указывает на преобладание в воде устойчивых гумусовых веществ болотного происхождения, а пониженное - гумусовых веществ планктонного происхождения. Промежуточное значение этого отношения указывает на преобладание почвенного гумуса. Характерно, что окисляемость поды после коагулирования, отстаивания и фильтрования снижается меньше, чем цветность.

Азотсодержащие вещества (ионы аммония, нитратные и нитритные) образуются в воде в результате восстановления нитритов и нитратов железом (II), сероводородом, гумусовыми веществами и т.п. либо разложения белковых соединений, вносимых в водоем со сточными водами. В последнем случае вода опасна в санитарном отношении. В артезианских водах содержание нитратов достигает десятых долей мг/л, а в поверхностных содержание нитратов - до тысячных долей мг/л. Наличие в питьевой воде более 45 мг/л нитратов приводит к нарушению окислительной функции крови, известной под названием метгемоглобинемии, способствует образованию злокачественных опухолей, поэтому по ГОСТ 2874 - 82 содержание нитратов в питьевой воде не должно превышать 45 мг/л.

Соединения кремния встречаются в природных водах в форме органических и минеральных соединений. Количество кремния в воде поверхностных источников невелико и изменяется от десятых долей до нескольких мг/л, напротив, - в подземных водах оно достигает десятков мг/л. Содержание кремния в питьевой воде не лимитируется, но в питательной воде котлов высокого давления оно недопустимо из-за возможности образования плотной силикатной накипи.

Соединения фосфора встречаются в природных водах в виде суспендированных частиц минерального и органического происхождения, в виде ионов ортофосфорной кислоты или сложного органического комплекса. В природных водах соединения фосфора присутствуют в малых количествах, но оказывают существенное влияние на водную растительность. Концентрация соединений фосфора в питьевой воде не регламентирована.

Фтор в природных водах содержится до 20 мг/л (артезианские воды) и более. Однако подавляющее большинство источников централизованного водоснабжения в нашей стране характеризуется содержанием фтор - иона до 0,5 мг/л. Фтор является активным в биологическом отношении микроэлементом, содержание которого в питьевой воде во избежание кариеса или флюороза должно быть в пределах 0,7 - 1,5 мг/л.

**Бор и бром** являются важными биологическими микроэлементами, содержание которых в питьевой воде не должно превышать соответственно 0,5 и 0,2 мг/л. В подземных водах их концентрации достигают 8 - 12 мг/л. Бор в питьевой воде в концентрации выше ПДК негативно воздействует на организм человека, ухудшая обмен веществ, и вызывает заболевание печени и желудочно - кишечного тракта. Повышенное

содержание брома в питьевой воде влияет на изменение скорости проведения импульса по нервным волокнам, отрицательно сказывается на функции печени и почек, обуславливает снижение калия в крови и увеличивает содержание азота в мочевины.

**Йод** в природных водах находится в ничтожно малых количествах. Он является очень важным биологическим микроэлементом, содержание которого в питьевой воде не должно превышать  $10^{-8}$  мг/л во избежание эндемического зоба.

**Токсические вещества** - мышьяк, стронций, бериллий и т.д., а также радиоактивные вещества - уран, радий обычно попадают в водоемы со сбросом сточных вод. Содержание их в питьевой воде ограничено ГОСТ 2874 - 82.

**Растворенные в воде газы** - кислород, углекислота, сероводород, метан, азот имеют значение для оценки ее качества. Так, углекислота, сероводород, кислород придают воде при определенных условиях коррозионные свойства по отношению к металлам и бетонам.

**Углекислота** содержится во всех природных водах от нескольких мг/л (поверхностные воды) до сотен мг/л (подземные воды). В зависимости от pH воды углекислота присутствует в пей в виде свободной углекислоты, представляющей собой растворенный в воде газ  $\text{CO}_2$ , полусвязанной углекислоты, т.е. в виде бикарбонатов - ионов  $\text{HCO}_3^-$ , и связанной углекислоты, т.е. в виде карбонат - ионов  $\text{CO}_3^{2-}$  (рис. 7.1). Разница между свободной и равновесной углекислотой называется агрессивной углекислотой, которая растворяет карбонат кальция, разрушающе воздействует на бетон, катализирует ход электрохимической коррозии металла.

Об агрессивности или стабильности воды по отношению к бетону или металлу можно судить по концентрации агрессивной углекислоты. На практике для определения стабильности воды используют метод Ланжелье. О стабильности воды судят по отношению pH испытуемой воды и pH равновесного насыщения воды карбонатом кальция. Последнее находят по данным химического анализа из уравнения

$$\text{pH}_s = \text{PK}_2 - \text{PPP}_{\text{CaCO}_3} - \lg(\text{Ca}^{2+}) - \lg(\text{Щ}) + 2,5\mu^{0,5} + 7,6,$$

где  $\text{PPP}_{\text{CaCO}_3}$  — произведение растворимости карбоната кальция;  $\mu$  — ионная сила раствора, зависящая от общего солесодержания  $P$  и определяемая из выражения  $0,5(C_1f_1^2 + C_2f_2^2 + \dots + C_n f_n^2)$  (здесь  $C_1, C_2, \dots, C_n$  — концентрация отдельных ионов в растворе);  $\text{PK}_2$  — константа диссоциации угольной кислоты;  $\text{Щ}$  — щелочность воды.

Если pH меньше  $\text{pH}_s$ , то вода содержит агрессивную углекислоту и будет разрушающе воздействовать на бетон и металл. При pH воды больше  $\text{pH}_s$  вода способна к отложению карбоната кальция. Как правило, в поверхностных водах присутствие агрессивной углекислоты исключено. Напротив, в подземных водах оно бывает значительным.

**Сероводород** в природных водах встречается органического (продукт распада органических соединений) и неорганического (растворение минеральных солей - серного колчедана, гипса и др.) происхождений. Сероводород в поверхностных водах присутствует в придонных слоях в незначительных количествах. В подземных водах его содержание составляет до нескольких десятков мг/л.

Наличие сероводород в воде придает ей неприятный запах, способствует коррозии металла и может вызвать зарастание трубопроводов в результате интенсивного развития серобактерий. Как видно из рис. 7.1,б, сероводород в зависимости от pH воды может быть в виде слабодиссоциированной кислоты -  $\text{H}_2\text{S}$ , гидросульфидных -  $\text{HS}^-$  или сульфидных -  $\text{S}^{2-}$  ионов. Эти зависимости имеют важное значение при решении задачи удаления сероводорода из воды,

**Кислород** попадает в воду при ее контакте с воздухом. В артезианских водах кислород отсутствует, а в поверхностных его концентрации довольно велики. В поверхностных водах содержание кислорода меньше теоретического за счет «дыхания» различных организмов, брожения, гниения органических остатков и т.п. Резкое снижение

содержания кислорода в воде указывает на ее загрязнение. Растворенный в воде кислород интенсифицирует коррозию металла, поэтому в питательной воде теплоэнергетических установок наличие кислорода строго ограничено.

*Азот* в природные воды поступает из воздуха, при разложении органических остатков, а также восстановлении соединений азота денитрофицирующими бактериями. Образующийся в воде в процессе гниения растений аммиак существенно влияет на технологию хлорирования воды.

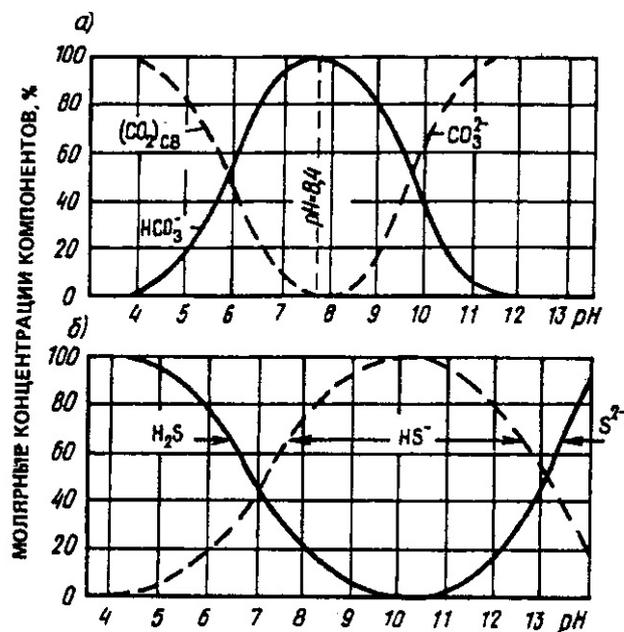


Рис. 7.1. Диаграммы форм уголекислоты (а) и сероводорода (б) в зависимости от рН исходной воды

*Метан* присутствует в природных водах, используемых для водоснабжения, как правило, в незначительных количествах. Однако в болотных водах, где в больших объемах протекают процессы разложения клетчатки растительных остатков, содержание метана доходит до 30 мг/л и более.

**Гидробионты**, населяющие природные воды, в процессе жизнедеятельности влияют не только на состав окружающей водной среды, но и на качество воды. Они подразделяются на: планктон - обитатели, пребывающие в толще воды от дна до поверхности; среди них различают плавающие, пассивно парящие и полуподводные (плейтон) организмы; взвешенные в воде остатки их органического и неорганического происхождения называют детритом; бентос: - обитатели, находящиеся на дне водоема; среди них встречаются подвижно или неподвижно прикрепленные, свободно лежащие и ползающие по дну, сверлящие дно, закапывающиеся организмы; нейстон - организмы, населяющие поверхностную пленку воды и адаптировавшиеся к жизни в специфических условиях се поверхностного натяжения: пагон - организмы (моллюски, ракообразные, коловратки и т.д.), пребывающие зимой в толще льда в состоянии анабиоза, оживающие весной и находящиеся среди бентоса или планктона.

На процессы формирования и самоочищения воды значительное влияние оказывает гидрофагия, так как многие ее представители (зоопланктон и зообентос) используют растворенные органические вещества, некоторые животные - фильтраторы употребляют для питания бактерии, водоросли и т.п.

**Гидрофлора** водоемов определяется макро - и микрофитами. К первым относится высшая водная растительность, а ко вторым - водоросли (фитопланктон и фитобентос). При отмирании и разложении макрофитов вода обогащается органическими веществами, а появляющиеся пахнущие вещества ухудшают органолептические показатели качества воды. Микрофиты, подразделяемые на зеленые, сине - зеленые, эвгленовые, датомовые и другие, не только поглощают уголекислоту, кислород (а сине - зеленые - азот, включая

аммиак), но и продуцируют кислород. Массовое развитие микрофитов в отдельные периоды цветения воды значительно осложняет технологию улучшения ее качества, особенно для питьевых целей, так как возникает необходимость в дезодорации и микрофильтрации воды.

**Патогенные кишечные простейшие:** лямблии, балантидии, дизентерийные амебы, криптоспоридии определяют (при их отсутствии) безопасность питьевой воды в паразитарном отношении.

**Бактерии и вирусы** из числа патогенных, т.е. паразитов, живущих на живом субстрате, развивающиеся в воде, могут вызвать заболевания брюшным тифом, амебиазом, парафитом, дизентерией, бруцеллезом, инфекционным гепатитом, острым гастроэнтеритом, сибирской язвой, холерой, полиомиелитом, туляремией, туберкулезом, дареей и др.

**Вирусы** - мельчайшие живые существа, размерами 16 - 30 мкм, видимые только под электронным микроскопом. В отличие от бактерий они не имеют клетчатой структуры, а состоят из нуклеиновой кислоты, покрытой белковой оболочкой. Они имеют шаро - и кубообразную форму, а также форму прямых и изогнутых палочек. Вирусы являются внутриклеточными паразитами. Среди них встречаются бактериофаги, паразитирующие в клетках бактерий и вызывающие их разрушение и гибель.

В связи с тем, что при биологическом анализе воды определение патогенных бактерий затруднено, бактериологические определения сводятся к определению общего числа бактерий в 1 мл воды, растущих при 37 °С, и кишечной палочки - бактерии коли. Наличие последней имеет индикаторные функции, т.е. свидетельствует о загрязнении воды выделениями людей и животных и т.п. Минимальный объем испытуемой воды, мл, приходящейся на одну кишечную палочку, называется коли - титром, а количество кишечных палочек в 1 л воды - коли - индексом. По ГОСТ 2874 - 82 допускается коли - индекс до 3, коли - титр - не менее 300, а общее число бактерий в 1 мл - до 100.

В зависимости от целевого назначения к воде предъявляют разнообразные требования, согласно которым ее можно классифицировать как используемую: для хозяйственно-питьевых целей, коммунальных предприятий, также нужд пищевой и некоторых других отраслей промышленности; для охлаждения (технологического оборудования, пара, жидких и газообразных продуктов, доменных и мартеновских печей, конденсаторов турбин и паровых машин, вагранок, кузнечных молотов и др.); для нужд паросилового хозяйства (питание паровых котлов ГРЭС и ТЭЦ); для технологических нужд промышленности, где вода может входить в состав продукции или контактировать с ней; для заводнения нефтяных пластов; для нужд сельского хозяйства.

Хозяйственно-питьевая вода должна быть безвредна для здоровья человека, иметь хорошие органолептические показатели и быть пригодной для использования в быту. Качество хозяйственно-питьевой воды регламентировано ГОСТ 2874 - 82 "Вода питьевая", основные показатели которого следующие:

Мутность	до 1,5 мг/л
Цветность	до 20 град
Запахи и привкусы при 20 °С, .	до 2 баллов
Водородный показатель	6,5 - 8,5
Общая жесткость	до 7 мг-экв/л
Содержание, мг/л:	
фтор	0,7 - 1,5
железо	до 0,3
бром	0,2
бор	0,5
хлориды	350
сульфаты	500

сухой остаток	1000
остаточный алюминий	0,5
медь	1,0
цинк	5,0
гексаметафосфат	3,5
триполифосфат	3,5
марганец	0,1
бериллий	0,0002
молибден	0,5
мышьяк	0,05
свинец	0,1
селен	0,001
стронций	2,0
полиакриламид	2
нитраты	до 45
радий - 226	$1,2 \cdot 10^{10}$ Кю/л
Стронций - 90	$4 \cdot 10^{10}$ Кю/л
Общее количество бактерий в 1 мл	до 100
Коли - индекс	3
Коли - титр	более 300

Ряд отраслей пищевой промышленности помимо лимитов ГОСТ 2874 - 82 предъявляют к воде дополнительные требования. Так, в воде, используемой в пивоварении, должны отсутствовать сульфаты, содержание железа не должно превышать 0,1 мг/л; в воде для винокурного производства не должно содержаться хлористых магния и кальция; в воде для сахарного производства должно быть минимальное солесодержание и т.д.

**Вода для охлаждения** применяется либо для охлаждения непрерывно работающих агрегатов, либо для отведения теплоты от производственных продуктов. Использование воды при охлаждении может быть прямотоком, т.е. после однократного применения производится ее сброс в водоем, или с ее возвратом и многократным применением. Во втором случае нагретая вода охлаждается в градирне или брызгальном бассейне и вновь используется в производстве.

Качество охлаждающей воды не нормируется, так как оно зависит от условий применения, но очевидно, что охлаждающая вода не должна давать отложений в трубах и аппаратах, по которым она подается, так как они затрудняют теплопередачу и сокращают живое сечение, снижая интенсивность циркуляции и эффект охлаждения. Вода, используемая для охлаждения, не должна содержать крупных минеральных взвешенных веществ, большого количества железа и органических веществ во избежание засорения или биообрастания трубок холодильных аппаратов и конденсаторов. В оборотных системах при нагреве воды теряется углекислота и возрастает вероятность накипеобразования. Этот процесс усиливается с повышением содержания в исходной воде бикарбоната кальция, с интенсивностью упаривания воды в системе, с увеличением потери углекислоты, с уменьшением содержания в охлаждающей воде органических веществ, которые препятствуют выпадению в осадок карбоната кальция, с повышением температуры нагрева охлаждающей воды и т.п. Следовательно, качество воды, применяемой для охлаждения, при котором не происходит в холодильных аппаратах зарастания живого сечения и не возникает коррозия, должно определяться для конкретных условий специальным расчетом с учетом всех приведенных выше факторов.

**Вода для нужд паросилового хозяйства** не должна образовывать накипи, вызывать коррозию металла и вспенивание котловой воды, не должна способствовать уносу солей с паром. Применение жесткой воды приводит к накипеобразованию на поверхности

нагрева, что ухудшает теплопередачу, вызывает перерасход топлива и перегрев металла, а в конечном счете в результате образования свищей и отдушин происходит разрыв экранных и кипятильных труб и др. Термический распад бикарбонатов, сопровождаемый возрастанием концентраций других растворенных в воде солей (что связано с непрерывным выпариванием), приводит к выпадению их из раствора и образованию накипи на стенках котла. При этом наибольшую опасность представляют соли: карбонат кальция, силикаты магния и кальция, сульфат кальция, образующие твердую накипь; карбонат, сульфат, фосфат и хлорид натрия, которые осаждаются только из высококонцентрированных растворов, формируя накипь в виде рыхлого шлама. Присутствие этих солей снижает растворимость солей магния и кальция и поэтому способствует образованию накипи.

Вспенивание котловой воды вызывается наличием фосфатов, щелочей, нефти, смазочных масел и синтетических поверхностно - активных веществ. Оно приводит к загрязнению пара и отложению примесей на лопатках турбин. Хлориды и сульфаты способствуют уменьшению вспенивания, коагулируя коллоидные соединения фосфатов.

При оценке качества питательной воды особое внимание необходимо уделять щелочам, которые являются активными пептизаторами и переводят в коллоидное состояние грубодисперсные вещества, создавая опасность загрязнения пара. Вместе с тем присутствие в воде щелочи значительно уменьшает растворимость соединений железа, предотвращая коррозию металла. В этих условиях образующийся при коррозии гидроксид железа (II) высаживается из раствора на поверхность металла, формируя плотную защитную пленку. Поэтому необходимо поддерживать в питательной воде минимальное содержание щелочи в пределах 25 - 50 мг/л едкого натра. Присутствие в питательной воде котлов высокого давления кремниевой кислоты приводит к формированию плотной с низкой теплопроводностью накипи.

**Вода для технологических нужд промышленности** в зависимости от ее нелепого использования должна отвечать самым разнообразным требованиям. Так, в воде, используемой в горнодобывающей промышленности при добыче, отмывке, гидротранспорте, обогащении и сортировке полезных ископаемых, должны отсутствовать грубые взвешенные частицы. Весьма специфические требования предъявляют к воде, применяемой для обработки готовой продукции, а также к воде, входящей в состав продукта.

Ряд промышленных предприятий предъявляет к воде требования, значительно превышающие лимиты ГОСТ 2874 - 82. Так, в воде, идущей на изготовление кино - и фотопленки, фотобумаги, не должно содержаться марганца, железа, кремнекислоты, ограничивается окисляемость воды и содержание хлоридов. В воде, применяемой для изготовления растворов кислот и щелочей, красителей и мыла, жесткость, должна быть не более 0,35 мг-экв/л.

**Вода для заводнения нефтяных пластов** не должна вызывать зарастание или закупорку отверстий фильтров скважин и не должна коагулировать поры нефтемещающей породы в результате образования нерастворимых соединений при взаимодействии с пластовой водой и частицами породы, а также при изменении температуры. Поэтому в закачиваемой воде должно содержаться не более 0,2 мг/л железа, 1 мг/л взвешенных веществ, 1 мг/л нефтепродуктов и др. Бикарбонаты в закачиваемой воде должны содержаться в минимальной концентрации, так как при их распаде, который происходит при нагреве воды, образуется осадок карбоната кальция. Аналогичные явления наблюдаются, когда в закачиваемой воде присутствует растворенный кислород, который, окисляя железо (II) и сероводород, присутствующие в пластовой воде, способствует коагуляции пор породы. Очевидно, что вопрос о необходимости обескислороживания и декарбонатации закачиваемой воды должен решаться индивидуально в зависимости от свойств пластовой воды, пористости призабойных зон и др.

**Вода для нужд сельского хозяйства** (птице - и зоофермы, для орошения, мелиорацию и др.) по своему качеству должна соответствовать целевому назначению. В СНиП сказано, что для водопоя птиц, зверей и животных на фермах следует подавать воду питьевого качества. При невозможности соблюдения этого требования допускается кратковременно производить водопой животных водой с повышенным минеральным составом, а именно: сухой остаток до  $5 \cdot 10^3$ , хлориды до  $2 \cdot 10^3$ , сульфаты до  $2,4 \cdot 10^3$  мг/л, общая жесткость до 45 мг-экв/л. Допускается использование воды с повышенной цветностью, с привкусом и запахом, при ее температуре 8 - 15°C. Нормы качества воды принимают адекватно виду и возрасту животных. Водопой зверей и птиц водой непитьевого качества в каждом конкретном случае должен быть согласован с органами ветеринарного надзора.

## 19.2. МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВОДОПОДГОТОВКИ

Кондиционирование воды с целью сделать ее пригодной для питья, хозяйственных и производственных нужд представляет собой комплекс физических, химических и биологических методов изменения ее первоначального состава. Под кондиционированием воды понимают не только ее очистку от ряда нежелательных и вредных примесей, но и улучшение природных свойств путем обогащения ее недостающими ингредиентами.

Многочисленные методы обработки воды можно классифицировать на следующие основные группы: улучшение органолептических свойств воды (осветление, обесцвечивание, дезодорация и др.); обеспечение эпидемиологической безопасности (хлорирование, озонирование, ультрафиолетовая радиация и др.); улучшение минерального состава (фторирование и обесфторирование, обезжелезивание и деманганация, умягчение или обессоливание и др.). Метод обработки воды выбирают на основе предварительного изучения состава и свойства воды источника, намеченного к использованию, и их сопоставления с требованиями потребителя. Выбор метода обработки воды основывают на сопоставлении качества воды источника водоснабжения (данные химических и технологических анализов) с требованиями ГОСТ 2874 - 82 или регламентом технологии потребителя. При этом возможны случаи, когда конкурентоспособными оказываются несколько методов обработки воды. В этом случае выбор метода производят по результатам технико-экономического анализа (сравнивая приведенные затраты), руководствуясь минимальными затратами и высоким технологическим эффектом.

Методы и степень очистки воды, состав и конструкция очистных сооружений в каждом конкретном случае зависят от тех требований, которые предъявляются к качеству воды, и от качества природной воды. Основными процессами улучшения качества воды для хозяйственно-питьевых целей являются осветление, обесцвечивание, обезжелезивание, обеззараживание, фторирование и обесфторивание, дезодорация.

**Осветление воды**, т.е. извлечение из нее диспергированных примесей. В зависимости от требований осветление может быть достигнуто: отстаиванием воды в отстойниках; центрифугированием в гидроциклонах; путем пропуска ее через слой ранее образованного взвешенного осадка в так называемых осветлителях; фильтрованием через слой фильтрующего порошка на намывных фильтрах или через слой зернистого фильтрующего материала в скорых фильтрах; фильтрованием через сетки на микрофильтрах, барабанных ситах, акустических фильтрах, через пористые перегородки и т.д.

Для интенсификации процесса осаждения взвеси применяют ее коагулирование, для чего в воду добавляют реагенты - коагулянты и флокулянты. В результате формируются плотные крупные агрегаты, на поверхности которых адсорбируются примеси - хлопья, быстро осаждающиеся и увлекающие за собой частицы взвеси. Вводимые в обрабатываемую воду реагенты должны быть хорошо и быстро перемешаны с ней в

смесителях. При применении отстойников воды из смесителя поступает в камеру хлопьеобразования, где обеспечиваются оптимальные условия для формирования хлопьев. Затем вода передается в отстойник, где хлопья осаждаются вместе с адсорбированными на их поверхности примесями воды.

Процесс коагулирования примесей воды может протекать в контактной среде в осветлителях со слоем увешенных хлопьев или в контактных осветлителях со статическим зернистым слоем. Осветление воды в первом случае обычно заканчивается ее фильтрованием на скорых фильтрах, а во втором - в результате контактного коагулирования примесей воды при ее фильтровании сразу достигается требуемая степень осветления.

Отделение от воды грубодисперсных взвесей может быть успешно осуществлено центрифугированием в гидроциклонах с последующей доочисткой на скорых фильтрах в одну или две ступени. Осветление воды достигается при ее фильтровании через сетки на микрофильтрах или акустических фильтрах. Осветление воды наряду с удалением планктона достигается при флотации примесей воды во флотаторах.

**Обесцвечивание воды**, т.е. извлечение из нее окрашенных коллоидов или истинно растворенных примесей, обуславливающих цветность воды, может быть достигнуто при коагулировании или флотации, при применении окислителей или сорбентов. Для этой цели используются хлорирование, фильтрование через гранулированный активный уголь и озонирование воды. Хорошие результаты по обесцвечиванию воды показала напорная флотация, которой должно предшествовать коагулирование примесей воды.'

**Обезжелезивание воды** - удаление солей железа до требований ГОСТа, наиболее часто используют при водоснабжении из подземных источников. В зависимости от форм соединений железа, присутствующих в воде, применяют безреагентные или реагентные методы удаления железа.

**Фторирование** питьевой воды производят путем внесения в нее соединений фтора для предотвращения заболевания кариесом зубов. Раствор фторсодержащего реагента вводят в обрабатываемую воду до или после скорых фильтров.

**Обеззараживание** воды предназначено для уничтожения содержащихся в ней патогенных бактерий и вирусов. Частично это достигается при коагулировании примесей воды, но наиболее хорошие результаты достигаются при введении в воду после фильтрования окислителей: хлора и его производных, перманганата калия.

При получении воды питьевого качества помимо описанных выше процессов иногда прибегают к дезодорации (удаление нежелательных привкусов и запахов), используя аэрацию, окислители и сорбенты; умягчению (удаление солей жесткости), введению в воду щелочных реагентов, выделению в осадок солей жесткости; опреснению (снижение общей минерализации воды) дистилляцией, ионным обменом, гиперфильтрацией или электродиализом и др.

При кондиционировании воды для технологических нужд наиболее часто решается задача ее осветления, глубокого умягчения, а порой полного обессоливания, снижения окисляемости, обескремнивания, деманганации, дегазации, обесфторирования и др. Наряду с этим вода, используемая для охлаждения, обычно не очищается, но подвергается стабилизационной обработке в целях предотвращения коррозии металла труб и теплообменных аппаратов или их зарастания карбонатом кальция. В ряде случаев охлаждающая вода хлорируется или обрабатывается медным купоросом для предотвращения биообрастаний системы.

### 19.3. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ

Совокупность технологических процессов и сооружений составляет технологическую схему улучшения качества воды. Применяемые в водоподготовке

технологические схемы можно классифицировать: 1) на реагентные и безреагентные; 2) по эффекту обработки; 3) по числу технологических процессов и числу ступеней каждого из них; 4) на напорные и безнапорные.

1. Реагентные и безреагентные технологические схемы используют при подготовке воды для хозяйственно-питьевых нужд и промышленности. Эти технологические схемы отличаются по размерам водоочистных сооружений и условиям их эксплуатации (рис. 7.2 и 7.3). Процессы обработки воды с применением реагентов протекают интенсивнее и значительно эффективнее.

376 Раздел 7. Улучшение качества воды

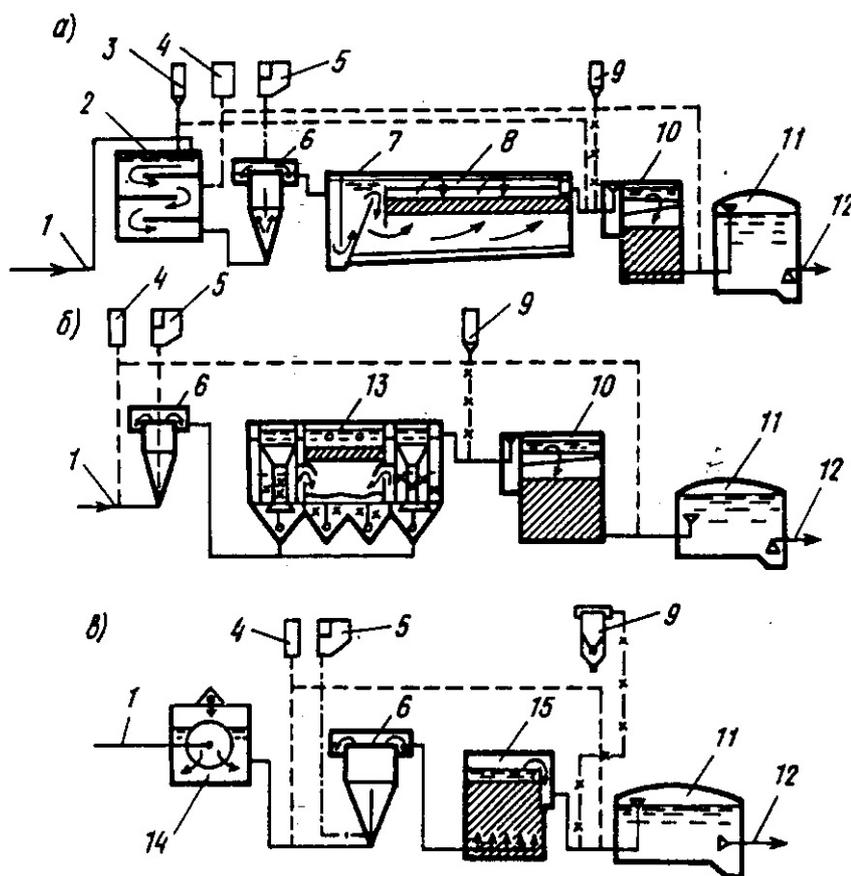
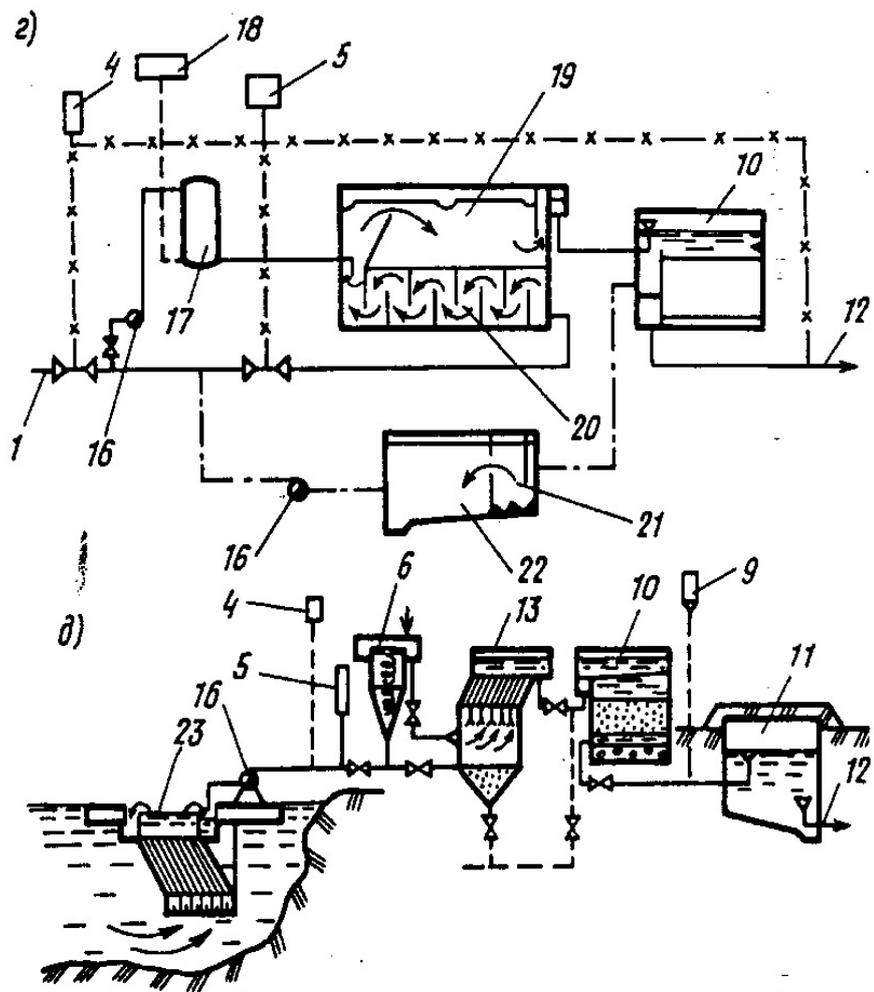
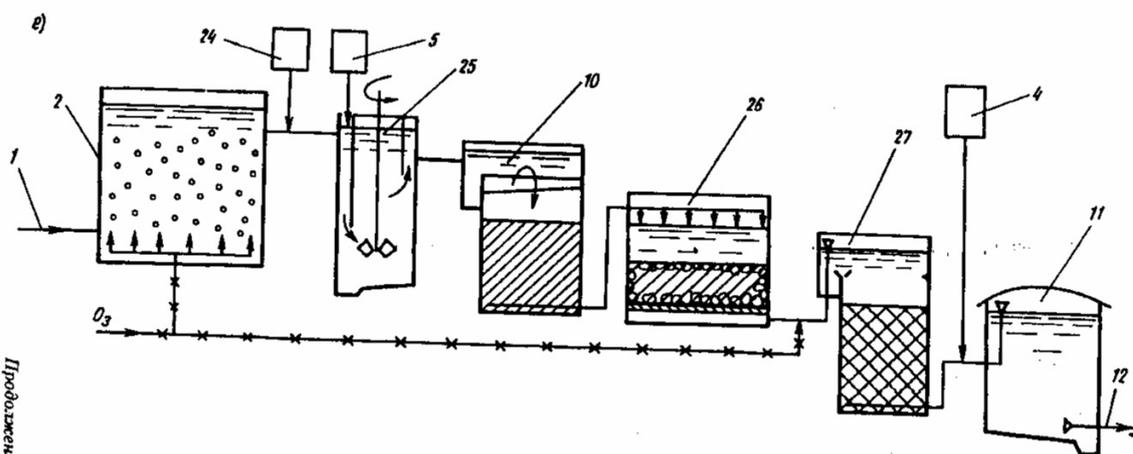


Рис. 7.2. Реагентные технологические схемы водоподготовки с отстойниками (а), осветлителями со слоем взвешенного осадка {б}, контактными осветлителями и микрофилтрами (в), флотаторами (г), отстойниками-осветлителями на плаву (д), для обработки воды (е) повышенного антропогенного воздействия (станция Ленгг, Швейцария), для обработки маломутных цветных вод (ж)

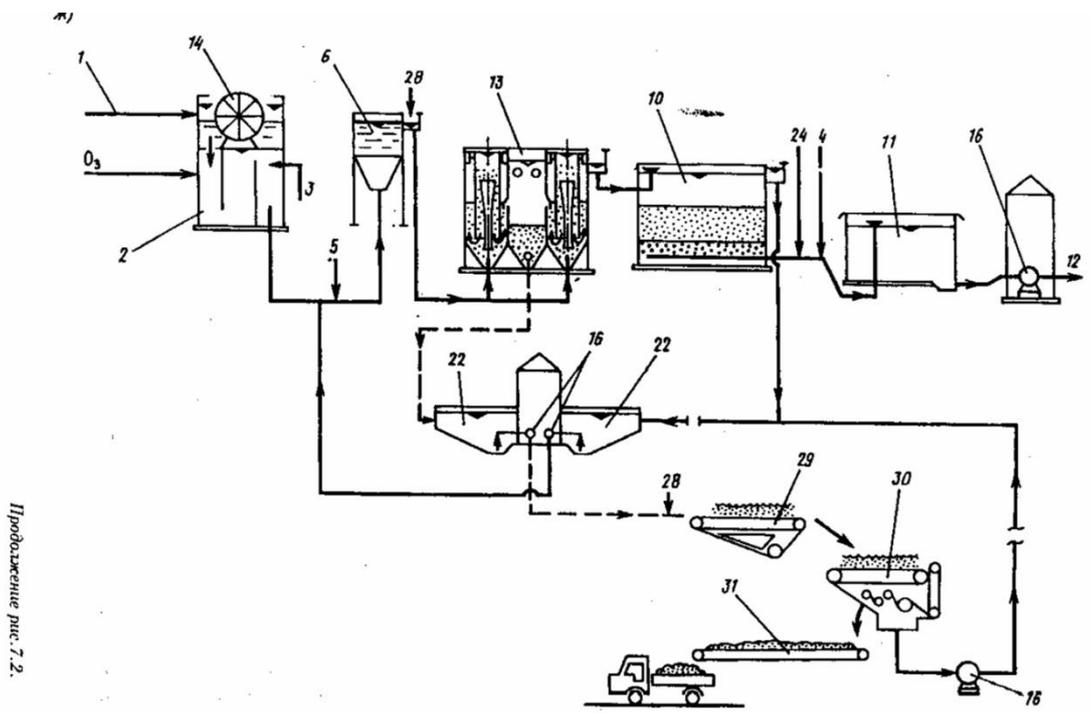
1, 12 - подача исходной и ствол обработанной воды; 2 - контактная камера; 3, 4, 5, 9, 24, 28 - установки соответственно углевания, хлорирования, коагулирования, фторирования и известкования; 6, 25 - вертикальный и механический смесители; 7 - вихревая камера хлопьеобразования; 8 - горизонтальный отстойник со встроенными тонкослойными модулями; 10, 26 - скорый и биологический фильтры; 11 - резервуар чистой воды; 13 - осветлитель со взвешенным осадком с рециркуляторами осадка; 14 - микрофильтр (барabanное сито); 15 - контактный осветлитель; 16 - насос; 17 - напорный бак; 18 - компрессор; 19 - флотатор; 20 - перегородчатая камера хлопьеобразования - песколовка; 22 - резервуар - усреднитель; 23 - водозабор - осветлитель с тонкослойными модулями; 27 - сорбционный фильтр с ГАУ; 29 - ленточный сгуститель; 30 - фильтр - пресс; 31 - конвейер



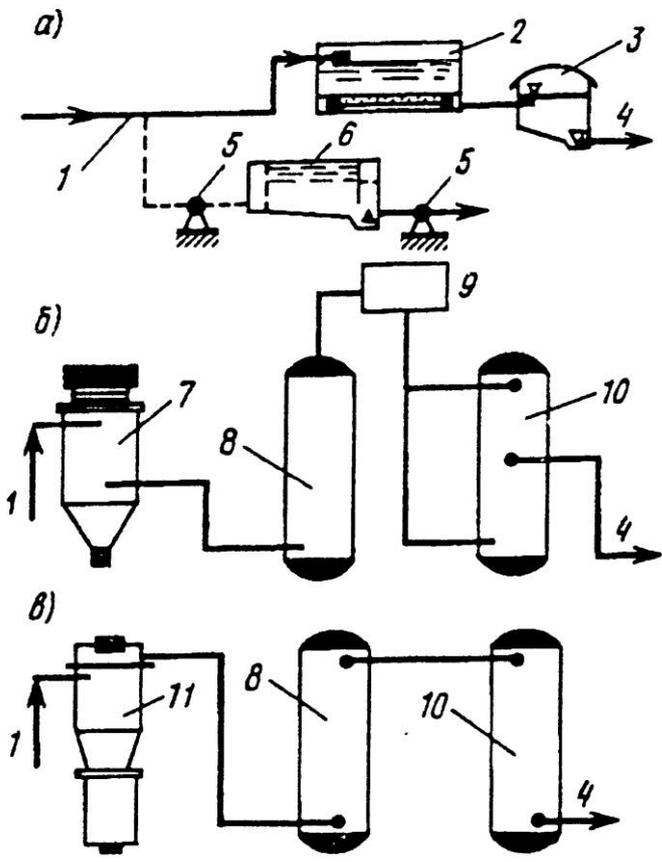
Продолжение рис. 7.2.



Продолжение рис. 7.2.



Продолжение рис. 7.2.



**Рис. 7.3. Безреагентные технологические схемы водоподготовки с медленным (а) и акустическим (б) фильтрами, с гидроциклоном (в)**

1, 4 - подача исходной воды и отвод обработанной воды; 2, 7 - медленный и акустический фильтры; 3 - резервуар чистой воды; 5 - насос; 6 - сооружения оборота промывной воды; 8, 10 - скорый фильтр I и II ступени; 9 - распределительный бак; 11 - гидроциклон

Так, для осаждения основной массы взвешенных веществ в первом случае необходимо 2 - 4 ч, а во втором - несколько суток. С использованием реагентов фильтрование осуществляется со скоростью 5 - 12 м/ч и более, а без реагентов (медленное фильтрование) - 0,1 - 0,3 м/ч.

При обработке воды с применением реагентов водоочистные сооружения значительно меньше по объему, компактнее и дешевле в строительстве, но сложнее в эксплуатации, чем сооружения безреагентной очистки.

Поэтому безреагентные технологические схемы с гидроциклонами, акустическими, намывными и медленными фильтрами, как правило, применяют для водоснабжения небольших водопотребителей при цветности исходной воды до 50 град.

Безреагентные технологии широко используют для неглубокого осветления воды при водоснабжении промышленных объектов. В ряде случаев для этих целей применяют одно отстаивание или одно фильтрование на крупнозернистых фильтрах или микрофильтрах.

2. По эффекту обработки различают технологические схемы для полной или глубокой очистки воды и для неполного или глубокого осветления. В первом варианте очищенная вода соответствует требованиям питьевой воды (ГОСТ 2874 - 82); во втором содержание взвешенных веществ в очищенной воде во много раз больше (50 - 100 мг/л). Грубоосветленную воду используют для целей охлаждения различного производственного оборудования.

Технологические схемы для глубокой очистки воды используют как для хозяйственно-питьевых, так и для многих производственных водопроводов, где к качеству технической воды предъявляют высокие требования. Схемы для неполного осветления воды обычно применяют для подготовки технической воды.

3. По числу технологических процессов и ступеней каждого из них технологические схемы подразделяют на одно-, двух- и многопроцессные. Так, усовершенствованная технологическая схема, показанная на рис. 7.2,б, является двухпроцессной. Здесь два основных технологических процесса: обработка воды в слое взвешенного осадка и фильтрование. Оба процесса осуществляются последовательно и однократно (в одну ступень). Аналогичное можно сказать о технологической схеме с флотатором (рис. 7.2,г). Когда один из основных технологических процессов осуществляется дважды или большее число раз, технологическая схема называется двух-, трех- или многоступенчатой. Например, на рис. 7.2,в показан пример однопроцессорной технологической схемы с контактными осветлителями. Здесь основной технологический процесс - фильтрование - осуществляется дважды.

Очевидно, что число технологических процессов и ступеней каждого из них диктуется требованиями к воде, предъявляемыми потребителем, и зависят от качества исходной воды. Так, для грубого осветления воды можно ограничиться процессом осаждения, центрифугирования или только фильтрования, в то время как при обработке высокомутных вод для хозяйственно-питьевых целей прибегают к осаждению в две ступени с последующим фильтрованием в одну ступень или применяют технологическую схему, предусматривающую предварительное осветление воды в гидроциклонах с последующей очисткой по технологическим схемам, показанным на рис. 7.3.

4. По характеру движения обрабатываемой воды технологические схемы подразделяют на самотечные (безнапорные) и напорные (см. рис. 7.3,б,в). На городских и крупных промышленных водоочистных комплексах движение обрабатываемой воды по сооружениям осуществляется самотеком. При этом уровень воды в каждом последующем сооружении ниже уровня в предыдущем. Разность уровней определяет напор, необходимый для преодоления гидравлических сопротивлений внутри сооружения и в коммуникациях между сооружениями. Поэтому взаиморасположение отдельных очистных сооружений технологической схемы, т.е. высотная схема, имеет первостепенное значение.

При напорной технологической схеме обрабатываемая вода от сооружения к сооружению движется под давлением выше атмосферного, поэтому очистные сооружения можно расположить на одной отметке. Напорные очистные сооружения должны быть герметично закрытыми и рассчитаны на давление, развиваемое насосами. Уместно отметить, что при использовании напорных технологических схем резервуары чистой воды и насосная станция II подъема иногда могут не устраиваться, обработанная вода под напором насосов I подъема поступает непосредственно в сеть потребителя (см. рис. 7.3,6). При безнапорном движении воды по очистным сооружениям необходимы две насосные станции и резервуары чистой воды (см. рис. 7.2). Применение напорных технологических схем сопряжено со значительной металлоемкостью используемых водоочистных сооружений, что ограничивает их пропускную способность.

Выбор технологической схемы улучшения качества воды диктуется не только качеством исходной воды и предъявляемыми требованиями, но и количеством потребляемой воды. Так, для обработки небольших количеств цветной или мутной воды не может быть рекомендована (по экономическим соображениям) без изменения основная технологическая схема. В этом случае вместо горизонтальных отстойников следует использовать вертикальные, а от смесителя можно отказаться, заменив его соплом Вентури или шайбой. Ориентировочный выбор технологической схемы для осветления и обесцвечивания воды до лимитов ГОСТ 2874 - 82 «Вода питьевая» может быть осуществлен согласно табл. 7.2.

Таблица 7.2

Основные сооружения	Мутность, мг/л		Цветность, град		Пропускная способность, м <sup>3</sup> /сут
	исходная вода	очищенная вода	исходная вода	очищенная вода	

## Обработка воды с применением реагентов

Скорые фильтры (одноступенчатое фильтрование):					
напорные	До 30	До 1,5	До 50	До 20	До 5000
открытые	" 20	" 1,5	" 50	" 20	" 50000
Вертикальные отстойники – скорые фильтры	" 1500	" 1,5	" 120	" 20	" 5000
Горизонтальные отстойники – скорые фильтры	" 1500	" 1,5	" 120	" 20	Св. 30 000
Контактные пре-фильтры – скорые фильтры (двухступенчатое фильтрование)	" 300	" 1,5	" 120	" 20	Любая
Осветлители со взвешенным осадком – скорые фильтры	50–1500	" 1,5	" 120	" 20	Св. 5000
Две ступени отстойников – скорые фильтры	Св. 1500	" 1,5	" 120	" 20	Любая
Контактные осветлители	До 120	" 1,5	" 120	" 20	"
Горизонтальные отстойники и осветлители со взвешенным осадком для частичного осветления воды	" 1500	8–15	" 120	" 40	"
Крупнозернистые фильтры для частичного осветления воды	" 80	До 10	" 120	" 30	"
Радиальные отстойники для предварительного осветления высокомутных вод	Св. 1500	" 250	" 120	" 20	"
Трубчатый отстойник и напорный фильтр заводского изготовления (типа "Струя")	До 1000	" 1,5	" 120	" 20	До 800

## Обработка воды без применения реагентов

Крупнозернистые фильтры для частичного осветления воды	До 150	30–50% исходной	До 120	Такая же, как исходная	Любая
Радиальные отстойники для частичного осветления воды	Более 1500	30–50% исходной	" 120	То же	"
Медленные фильтры с механической или гидравлической регенерацией песка	До 1500	1,5	" 50	До 20	"

Выбор типа водоочистного сооружения и определение оптимального состава реагентов должны производиться на основании тщательного рассмотрения данных химического и технологического анализов обрабатываемой воды. Однако некоторые решения могут быть приняты априорно на основании обобщения имеющегося опыта эксплуатации водоочистных комплексов в аналогичных условиях. Так, железные

коагулянты предпочтительнее при условии длительного весеннего паводка, сопровождающегося не только повышением мутности и цветности, но и значительным понижением температуры обрабатываемой воды. Применение в качестве флокулянта активированной кремнекислоты (при активизации хлором) рекомендуется при обработке цветных вод, а мутных - полиакриламид, К - 4 и др. Вертикальные смесители, обеспечивающие не только высокий и стабильный эффект смещения реагентов с водой, но и воздухоотделение, рекомендуется предусматривать в схемах с осветлителями со взвешенным осадком и контактными осветлителями.

**Примечания:**

1. Мутность приведена суммарная, включая образующуюся от введения реагентов.
2. На водозаборных сооружениях или на водоочистном комплексе необходимо предусматривать установку сеток с ячейками размером 0,5 - 2 мм. При среднемесячном содержании в воде планктона более 1000 кл/мл и продолжительности ее цветения более 1 мес в году в дополнение к сеткам на водозаборе следует предусматривать установку микрофильтров на водозаборе или на водоочистном комплексе.
3. При обосновании для обработки воды допускается применять сооружения, не указанные в таблице (плавающие водозаборы - осветлители, гидроциклоны, флотационные установки и др.).
4. Осветлители со взвешенным осадком следует применять при равномерной подаче воды на сооружения или постепенном изменении расхода воды в пределах не более  $\pm 15\%$  в 1 ч и колебании температуры воды не более  $\pm 1^\circ\text{C}$  в 1 ч.

В качестве сооружений I ступени для осветления высокомутных вод могут быть рекомендованы тонкослойные и радиальные отстойники, гидро - и мультициклоны, акустические фильтры и др. Для извлечения из воды планктона или крупных плавающих примесей следует использовать микрофильтры, флотаторы или барабанные сетки. В прямоточных схемах со скорыми фильтрами с применением реагентов следует рекомендовать контактные фильтры КФ - 5 или КЗФ. Для вод повышенного антропогенного воздействия необходимо применять озонирование, биореакторы, сорбционные угольные фильтры (см. рис. 7.2,е).

## **Глава 20. КОАГУЛИРОВАНИЕ ПРИМЕСЕЙ ВОДЫ**

### **20.1. КОАГУЛИРОВАНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ОБЪЕМЕ**

Одним из широко применяемых на практике приемов обработки воды является коагулирование взвешенных и коллоидных частиц. Примеси, обуславливающие мутность и цветность природных вод, отличаются малыми размерами, вследствие чего их осаждение происходит крайне медленно, так как силы диффузии превалируют над силами тяжести. Наличие примесей коллоидного характера еще более осложняет процесс седиментации. Для ускорения процессов осаждения, фильтрования, флотации и повышения их эффективности прибегают к коагулированию примесей воды.

*Коагуляцией* примесей воды называется процесс укрупнения мельчайших коллоидных и диспергированных частиц, происходящий вследствие их взаимного слипания под действием силы молекулярного притяжения. Коагуляция завершается образованием видимых невооруженным глазом агрегатов - хлопьев и отделением их от жидкой среды. Различают два типа коагуляции: конвективная коагуляция, происходящая в свободном объеме (в камерах хлопьеобразования) и контактная коагуляция (в толще зернистой загрузки или в массе взвешенного осадка).

Коллоидные и тонкодисперсные примеси воды обладают определенной агрегативной устойчивостью, обусловленной наличием вокруг частиц гидратных оболочек или двойного электрического слоя. При нагревании или замораживании, при добавлении в воду электролитов, при наложении магнитного поля агрегативная

устойчивость примесей нарушается. При улучшении качества воды наиболее часто решается задача коагулирования гидрофильных и гидрофобных примесей.

В природных водах гидрофильные примеси в основном представлены органическими веществами. На их поверхности удерживается значительное количество воды в виде гидратной оболочки, обусловленное наличием поверхностных полярных групп, таких, как -ОН, -СООН и др., которые водорастворимы. Они и удерживают вокруг частицы гидратную оболочку. Находясь в тепловом броуновском движении, гидрофильные частицы диффундируют вместе с гидратной оболочкой. Гидрофильные частицы несут обычно небольшие электрические заряды, и как правило, под влиянием электролитов коагулируют.

Частицы ила, глины, пылевидные песчинки подобные им взвешенные частицы природных вод являются гидрофобными примесями. Они почти лишены гидратных оболочек, но имеют двойной электрический слой и несут значительные электрические заряды. Ликвидация или уменьшение электрического заряда частиц приводит к нарушению их агрегативной устойчивости и коагуляции гидрофобных примесей. Как правило, гидрофобные частицы имеют кристаллическую структуру и большую удельную поверхность, на которой адсорбируются присутствующие в воде ионы. Характерно, что все частицы данного вещества сорбируют преимущественно ионы одного знака, снижающие свободную поверхностную энергию гидрофобных частиц. Этими ионами являются обычно ионы входящие в состав вещества частицы либо близкие к ним по свойствам и размерам. Прилегающие непосредственно к ядру ионы образуют поверхностно - ядерный слой (адсорбционный слой). Так как на границе адсорбционного слоя образуется электрический заряд, то вокруг ядра с адсорбционным слоем (гранулы) создается диффузный слой из противоионов (атмосфера противоионов), компенсирующих заряд гранулы. В целом ядро с адсорбционным и диффузным слоем называется мицеллой.

В неподвижном состоянии мицелла электронейтральна, так как заряд гранулы нейтрализуется противоионами диффузионного слоя. Но, находясь в состоянии броуновского движения, противоионы диффузного слоя мицеллы отстают и отрываются от гранулы, и частица приобретает электрический заряд. Термодинамический потенциал, т.е. потенциал на границе ядра -  $\epsilon$ -потенциал, определяется как сумма зарядов всех поверхностно - ядерных ионов. На границе адсорбционного слоя термодинамический потенциал уменьшается на величину суммы зарядов противоионов, присутствующих в адсорбционном слое, и становится равным электрокинетическому потенциалу -  $\zeta$ -потенциал.

Поэтому частицы с одноименными зарядами при взаимодействии отталкиваются одна от другой. Наряду с этим между коллоидными примесями воды существуют молекулярные силы взаимного притяжения, называемые силами Ван - дер - Ваальса - Лондона, которые действуют на небольшом расстоянии между взаимодействующими частицами и с увеличением расстояния между ними убывают, а при сближении частиц силы отталкивания и притяжения возрастают. При этом первоначально сила отталкивания превалирует над силой притяжения. Однако, если частицы, двигаясь с большой скоростью, преодолевают указанный «силовой барьер», то преобладающими становятся силы притяжения и такие частицы сливаются, укрупняются. На практике вероятность такой большой кинетической энергии частиц мала, поэтому коллоиды сохраняют агрегативную устойчивость. Но коагуляция природных гидрофобных коллоидов, имеющих обычно  $\epsilon$ -потенциал в пределах 0,05 - 0,1 В, становится возможной при снижении электрокинетического потенциала до 0,03 В и меньше. Оптимально, когда электрокинетический потенциал равен нулю. Такое состояние коллоидной системы называют изоэлектрическим, а величина рН, отвечающая ему, называется изоэлектрической точкой системы (рН<sub>из</sub>). Таким образом, рН<sub>из</sub> изоэлектрической точки - это такое значение рН среды, в которой находится частица, где толщина гидратной

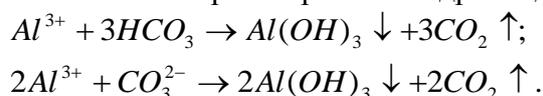
оболочки минимальна, заряд частицы равен нулю и, следовательно, силы отталкивания тоже минимальны или равны нулю.

Большинство примесей природных вод в диапазоне рН = 6,5..7,5 имеют на грануле отрицательный заряд. Его нейтрализация, разрешение диффузного слоя и гидратной оболочки достигается введением электролита и золь с противоположным зарядом частиц. В качестве электролитов применяют соли железа и алюминия. При введении в воду электролита возрастает концентрация противоионов, при этом значительная часть их переходит из диффузного слоя в адсорбционный, что приводит к уменьшению толщины диффузного слоя. Миграция противоионов из диффузного в адсорбционный слой вызывает нейтрализацию заряда гранулы и понижает электрокинетический потенциал частицы. Следует отметить, что для отрицательно заряженных частиц коагулирующими ионами является катионы, а для положительно заряженных - анионы.

Экспериментально показано, что чем больше разность между рН среды и рН изоэлектрической точки коллоида, тем больше его заряд. Для глины рН изоэлектрической точки около 5, для гуминовых веществ 3,5 - 4,5, а значение рН большинства природных вод 6,5 - 7,5. В этих условиях примеси воды обладают отрицательным зарядом и имеют высокую агрегативную устойчивость. Следовательно, для обеспечения коагуляции примесей воды необходимо нарушить их агрегативную устойчивость, т.е. необходимо, чтобы заряд частиц был минимальным или равным нулю. Коагуляция коллоидных примесей воды может быть вызвана путем добавления другого коллоида, несущего противоположный по знаку заряд. В результате их взаимодействия происходит взаимная нейтрализация разноименно заряженных частиц, что приводит к их агломерации и седиментации.

При введении в воду коагулянта первоначально образуются хлопья в виде цепочек из одного реагента, так как обычно в природных водах условия для его коагулирования более благоприятны, чем для примесей воды. На поверхности образовавшихся хлопьев коагулянта адсорбируются примеси воды. В свою очередь цепочки коагулянта могут прилипать к поверхности крупных взвешенных частиц. В конечном счете, образуются глобулы (хлопья), при декантации которых достигается осветление и обесцвечивание воды. Кроме того, на поверхности хлопьев могут адсорбироваться растворенные органические вещества, обуславливающие привкусы и запахи воды, чем достигается определенная ее дезодорация.

Действие коагулянта в воде сводится к трем основным процессам: собственно коагуляции, флокуляции, сосаждению и сорбции. Первоначально при введении в обрабатываемую воду коагулянта (сульфата алюминия, железного купороса и др.) происходит его диссоциация на ионы металла и анионы сильных кислот. Ионы трехвалентных металлов, принимая участие в обмене с одновалентными катионами диффузного слоя гидрофобных примесей воды, способствуют уменьшению их агрегативной устойчивости и вследствие этого сжатию диффузного слоя. Обменная адсорбция катионов протекает очень быстро и заканчивается в результате исчерпания обменной способности коллоидов и установления равновесия между катионами, присутствующими в воде и находящимися в адсорбционном слое. После этого идет параллельно гидролиз избытка коагулянта, закапчивающийся образованием коллоида гидроксида железа или алюминия. Поскольку природные воды имеют запас щелочности, то введенный катион алюминия вступает во взаимодействие с карбонат - и гидрокарбонат-ионами с образованием малорастворимого гидроксида алюминия:

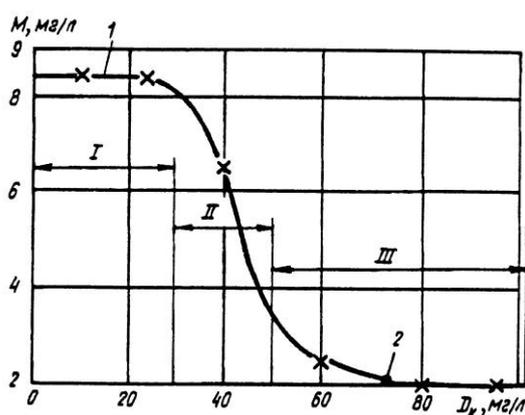


Гидроксиды алюминия и железа образуют в воде соли с положительным зарядом на грануле. Эти коллоидные частицы усиливают общее коагулирующее действие введенных солей. При недостатке щелочного резерва в воде производят подщелачивание, вводя

известь или соду. Оптимально подщелачивание производят известью, так как не образуется углекислота. Процесс коагулирования примесей воды можно улучшить путем удаления углекислоты из зоны реакции продувкой воздухом.

Гидроксиды железа и алюминия в воде при обычных значениях рН почти нерастворимы. Хлопья частиц гидроксида седиментируют - ся и увлекают, адсорбируя, с собой нерастворенные взвешенные частицы (ила, клеток планктона, крупных организмов, остатков растений и т.п.). Это явление носит название флокуляции (укрупнение частиц при их столкновении и осаждении). Гидроксиды железа и алюминия - хорошие сорбенты. Они сорбируют на своей поверхности бактерии, гуминовые вещества и некоторые растворенные соединения, например ионы тяжелых металлов.

На процессе конвективной коагуляции оказывают влияние следующие факторы: концентрация водородных ионов в воде; анионный состав воды; правильный выбор дозы коагулянта: щелочность и температура воды; условия перемешивания; быстрота смешения коагулянта с водой; содержание в воде естественных взвешенных веществ. Остановимся на анализе этих факторов. Растворимость гидроксидов алюминия и железа, образующихся при гидролизе коагулянтов, мала. О ней можно судить по произведению растворимости, которая дает возможность оценить влияние находящихся в воде ионов на процессе их выделения. В зависимости от рН воды состав коагулянта значительно изменяется. Следует отметить, что если в обрабатываемой воде содержание ионов металла коагулянта превышает растворимость его соединений при данном рН, то это вызывает ее пересыщение, ведущее к образованию отложений в коммуникациях. Растворимость гидроксида алюминия (III) уменьшается с понижением рН воды и повышением ее температуры. При рН воды ниже 4,4 вместо гидроксида алюминия образуются его основные растворимые соли, а при рН выше 8,5 амфотерный гидроксид алюминия (III) растворяется из-за образования алюминатов. Как показывает практика оптимальные значения рН при коагулировании сульфатом алюминия следующие: для мягких цветных вод (более 50 град) при щелочности до 1,5 мг-экв/л - 5 - 6; для малоцветных вод (до 40 град) средней жесткости (4 - 5 мг-экв/л) со щелочностью 3 - 4 мг-экв/л - 6 - 7,2; для малоцветных, жестких (6 - 8 мг-экв/л) вод с минерализацией 0,8 - 1,0 г/л и щелочностью свыше 5 мг-экв/л - 6,5 - 7,5. Напротив, гидроксид железа (III) не обладает амфотерными свойствами и диапазон рН его существования значительно шире, чем для гидроксида алюминия (III).



**Рис. 7.4. Коагуляционная кривая**  
1 - порог коагуляции; 2 - оптимальная доза

На процесс осветления и обесцвечивания воды существенное влияние оказывает доза коагулянта, что видно из коагуляционной кривой (рис. 7.4). Анионный состав воды оказывает влияние на электролитное коагулирование гидроксидов металлов при гидролизе в момент их образования. Наличие достаточной щелочности воды определяет процесс гидролиза коагулянта и связывает избыточные ионы водорода. Температура воды влияет на первый этап коагуляции - перикинетический, а перемешивание - на второй - ортокинетический.

## 20.2. КОНТАКТНАЯ КОАГУЛЯЦИЯ

Контактная коагуляция - процесс осветления и обесцвечивания воды, заключающийся в адсорбции примесей с нарушенной агрегативной устойчивостью на поверхности зерен контактной массы. Исследования Д.М.Минца, С.А.Шуберта, В.П.Криштула, Л.Н.Паскуцкой показали, что в основе процесса лежат Ван - дер - Ваальсовы силы межмолекулярного притяжения, но они проявляются при условии движения жидкости, когда мелкие частицы примесей воды сближаются с зернами контактной массы, преодолев при этом электростатические силы отталкивания.

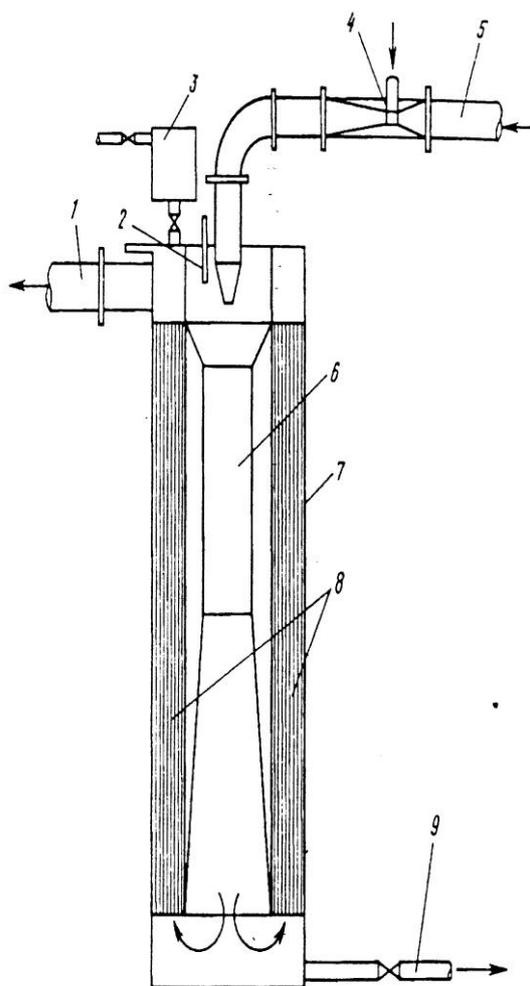
Характерной особенностью является большая скорость процесса в сочетании с высоким эффектом при меньших затратах коагулянта. Интенсивность прилипания мелких примесей к относительно крупным зернам загрузки намного превосходит скорость агломерации между собой отдельных мелких частиц в свободном объеме жидкости, так как они несут небольшие электростатические заряды и значительно легче прилипают к крупным зернам, лишенным зарядов, чем друг к другу. Другими особенностями контактной коагуляции являются независимость процесса от щелочности и температуры воды, меньшее влияние рН воды и др. Контактная коагуляция осуществляется в осветлителях со слоем взвешенного осадка, на контактных фильтрах КФ - 5 и на контактных осветлителях.

**Электрохимическое коагулирование.** По предложению С.В.Яковлева для осуществления процесса коагулирования в воду вместо коагулянтов вводят ионы тяжелых металлов, полученные электрохимическим путем. С этой целью воду пропускают через электролизер - бассейн (рис. 7.5) с опущенными в него электродами: анода (из алюминия или железа) и катода. Питание электролизера осуществляется от постоянного или переменного источника тока. При прохождении постоянного тока через воду происходит комбинированное явление электролиза. С одной стороны, электролиз солей, кислот и оснований, содержащихся в воде, и самой воды, а с другой - электролиз материала анода. При использовании в качестве анода железной пластины в воду переходят ионы железа (II), при применении алюминиевых анодов вода обогащается ионами алюминия (II).

Выделившиеся ионы способствуют уменьшению заряда коллоидных и взвешенных частиц, в результате чего создаются условия для их коагуляции. Железо (II) окисляется в трехвалентное за счет растворенного в воде кислорода или хлора, если воду предварительно хлорировали. Путем вдувания воздуха можно поддерживать необходимое количество кислорода. Трехвалентные ионы железа или алюминия гидролизуются с образованием их гидроксидов, которые коагулируют, образуя хлопья. Дальнейшее осветление воды происходит так же, как и при коагулировании примесей воды коагулянтами. Количество растворенных или выделенных металлов, мг, зависит от количества прошедшего электричества и определяется по закону Фарадея:

$$m = K i t,$$

где  $K$  - электрохимический эквивалент, мг/Кл;  
 $I$  - сила тока, А;  
 $t$  - время электролиза, с.



**Рис. 7.5. Схема электрокоагулятора конструкции Е.Ф. Кургаева**

1, 5 - отвод и подача обрабатываемой воды; 2 - ввод окислителя (вариант); 3 - дозатор щелочного реагента (вариант); 4 - эжектор для подсоса воздуха; 6 - диффузор; 7 - корпус аппарата; 8 - цилиндрические электроды; 9 - опорожнение

Теоретический расход электроэнергии, Вт ч, при анодном растворении металлов определяется по формуле

$$W = I V t,$$

где  $V$  – напряжение, В.

При прохождении постоянного тока через раствор, кроме электролиза, имеет место еще электрофорез. При электрофорезе частицы дисперсной фазы перемещаются к аноду, теряют там свой заряд, аккумулируются и выделяются из раствора. При электролизе солевой состав воды почти не меняется, только в конце процесса увеличиваются щелочность и рН (на 0,5 - 0,7). Установкой второго анода из графита или никеля можно достичь выделения активного хлора или кислорода, которые переводят железо (II) в железо (III). Как правило, за электрической коагуляцией должно следовать фильтрование.

Расход энергии на очистку единицы объема воды зависит от расстояния между пластинами: чем меньше зазор, тем меньше расход энергии. С увеличением плотности тока процесс очистки протекает более быстро и полно. При расходе железа 6 - 7 г/м<sup>3</sup> воды качество фильтрата соответствует требованиям ГОСТа.

### **20.3. РЕАГЕНТЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ВОДОПОДГОТОВКЕ\***

В качестве коагулянта наиболее часто применяют неочищенный сернокислый алюминий  $Al (SO_4)_3 \cdot nH_2O + mSiO_2$  (ГОСТ 5155 - 84), который содержит 33 % безводного сернокислого алюминия и до 23 % нерастворимых примесей. В настоящее время

отечественная промышленность освоила изготовление очищенного глинозема  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  (ГОСТ 12966 - 85), содержащего не более 1 % нерастворимых примесей.

Промышленность выпускает коагулянт - алюминат натрия  $NaAlO_2$  в твердом виде. Он содержит до 55 % оксида алюминия, до 35 % оксида натрия и до 5 % свободной щелочи, хорошо растворим в воде. При его использовании рН воды практически не изменяется.

В нашей стране разработана технология выработки высококонцентрированного коагулянта основного хлорида алюминия -  $Al_2(OH)_5Cl \cdot 6H_2O$ . Этот коагулянт способен образовывать более прочный осадок. Кроме того, он имеет меньшую гигроскопичность, не слеживается при хранении, не пылит при перегрузке. Выпускается в виде 35 % - ного раствора.

В качестве коагулянта применяют также железный купорос  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  (ГОСТ 6981 - 85), образующий в воде гидроксид железа (II), который, растворенным кислородом или специально вводимым хлором, окисляется в гидроксид железа (III). Скорость осаждения хлопьев гидроксида железа в 1,5 раза больше скорости осаждения хлопьев гидроксида алюминия. Однако процесс окисления происходит достаточно быстро только при рН воды свыше 8. Это вызывает часто необходимость в подщелачивании воды, т.е. в добавлении извести или соды. Использование дополнительных реагентов лимитирует применение железного купороса в качестве коагулянта. Однако на установках реагентного умягчения воды для коагуляции примесей используют почти исключительно железный купорос. Наряду с железным купоросом в качестве коагулянта иногда применяют хлорное железо  $FeCl_3$  (ГОСТ 11159 - 86), хорошо растворяющееся в воде и образующее крупные быстроосаждающие хлопья гидроксида железа (III). Использование хлорного железа дает наиболее высокие результаты при совместном применении его с сернокислым алюминием и известью.

---

\*Перечень материалов, реагентов и малогабаритных очистных устройств, разрешенных Госкомитетом санитарно - эпидемиологического надзора Российской Федерации для применения в практике хозяйственно-питьевого водоснабжения. - М.: Госкомсанэпиднадзор РФ, 1992.

Доза коагулянта (мг/л; г/м<sup>3</sup>) для вод разного состава не одинакова и устанавливается путем опытного (пробного) коагулирования обрабатываемой воды. Для ориентировочных подсчетов дозу коагулянта можно определить по СНиПу. Так, в пересчете на безводные  $FeSO_4$ ,  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $FeCl_3$  дозу следует принимать при обработке мутных вод (в зависимости от содержания примесей) равной 25 - 125 мг/л. При коагулировании воды с повышенной цветностью доза коагулянта находится по формуле  $D_k = 4(\sqrt{C})^{0.5}$ , где  $C$  - цветность воды, град.

Д.М.Минцем и Я.Д.Раппопортом был предложен метод получения электрохимическим способом высококонцентрированных коагулирующих растворов путем анодного растворения в пластинчатых электролизерах обрезков железа или алюминия в водных растворах серной кислоты или поваренной соли. Это позволяет получать на месте потребления коагулирующие растворы с заранее заданными технологическими свойствами и затем дозировать их в обрабатываемую воду.

Обработка воды минеральными коагулянтами далеко не всегда обеспечивает должный эффект кондиционирования воды. Это вызвало необходимость изыскания веществ (флокулянтов анионного и катионного типа), которыми можно было бы активизировать процесс коагуляции. Поиски привели к использованию активированной кремнекислоты, полиакриламида, К - 4 и К - 6 и др. Для интенсификации и улучшения процесса хлопьеобразования, осуществляемого перед сооружениями первой ступени обработки воды, в ряде случаев применяется активированная кремнекислота. Последняя

изменяет физико - химические свойства хлопьев, снижает грязевую нагрузку на фильтры. Как показали исследования Е.Ф.Накорчевской и Л.А.Кульского, активированная кремнекислота благоприятно влияет на процесс осветления воды.

Доза АК, считая по диоксиду кремния, зависит от места ее ввода: при вводе перед сооружениями I ступени при температуре исходной воды свыше 5 - 7°C она равна 2 - 3 мг/л, а при температуре воды ниже 5 - 7°C - 3 - 5 мг/л; при вводе перед фильтрами при двух ступенчатой очистке - 0,2 - 0,5 мг/л и перед фильтровальными сооружениями при одноступенчатой очистке - 1 - 3 мг/л.

Таблица 7.3

Очистные сооружения	Нормы расхода ПАА, мг/л, при содержании взвешенных веществ, мг/л	
	100-500 (малая цветность)	20 (цветность 50-150 град)
Отстойники	0,5-2	-
Осветлители со взвешенным осадком	0,1-0,6	0,8-1,3
Контактные осветлители	0,3-1	0,25-0,8
Скорые фильтры разных конструкций *	0,01-0,1	0,01-0,1

\* При содержании взвешенных веществ после сооружений I ступени 10-45 мг/л.

В последние годы в практике водоснабжения широкое распространение получил полиакриламид (ПАА). Ориентировочно дозы ПАА составляют 2 - 10 % дозы  $Al_2O_3$ . По отношению к общему количеству взвешенных веществ в воде дозы ПАА могут колебаться в широком диапазоне - от 0,01 до 2,0 мг/л. В рекомендациях НИИ КВОВ АКХ приводятся приближенные данные по нормам расхода ПАА для сооружений разного типа (табл. 7.3). ПАА поступает на водоочистные комплексы в форме геля. Из него сначала готовят 1 % - ные рабочие растворы, а затем разбавляют водой до концентрации 0,025 - 0,25 %. Такие разведенные растворы вводят в обрабатываемую воду.

Следует иметь в виду, что предельно допустимая концентрация ПАА, установленная П.А.Рахманиной, равна 2 мг/л. ПАА так же, как и АК, является флокулянтom анионного типа и макроион его имеет отрицательный заряд, поэтому он может использоваться только вместе с минеральным коагулянтом (так как дисперсные и коллоидные загрязнения воды при обычных значениях рН заряжены также отрицательно).

Наряду с названными выше флокулянтами, по предложению кафедры Водоснабжение МГСУ (Г.И.Николадзе, Т.Абдулаев) для интенсификации осветления мутных вод в Узбекистане применяют анионные флокулянты серии К (К - 4, К - 6) в дозах 0,5 - 2 мг/л. Эти флокулянты представляют собой полуфункциональные полимеры амфотерного типа, содержащие в своем составе карбоксильные, карбоксилатные, амидные и имидные группы, которые являются продуктами обработки полиакрилонитрила едким натром (К - 4) или моносиликатом натрия (К - 6) при температуре 90 - 95°C в течение 1,5 - 2 ч. Указанные флокулянты выпускает Чирчикский электрохимический комбинат в виде 10 - 16 % - ной вязкой, густой, почти бесцветной пасты, хорошо и быстро растворимой (без побуждения) в воде при температуре 10 - 16°C с образованием щелочных растворов.

Токсичность флокулянтов К - 4 и К - 6, по данным П.А.Рахманиной, находится на уровне токсичности полиакриломида. Их применение не ухудшает органолептических свойств питьевой воды, не вызывает возражений с гигиенической позиции.

Анионные флокулянты следует вводить в воду через 2 - 3 мин после ввода коагулянта. При очистке мутных вод допускается введение в воду сначала флокулянтов (до коагулянтов) или одновременно. Доза флокулянтов обычно составляет 0,5 - 3 мг/л.

В водоподготовке применяют флокулянты и катионного типа (ВА - 2, ВА - 3, ВА - 2Т, ВА - 3М, ВА - 102, ВА - 212, ВА - 402 и др.). Эти флокулянты предназначены для самостоятельного использования (Ю.И.Вейцер и др.). С характеристикой действия флокулянтов этого типа можно ознакомиться на примере ВА - 2. Этот катионный флокулянт в отличие от полиакриламида используется не в качестве добавки к сернокислому алюминию, а как самостоятельно действующий коагулянт, поэтому он может быть назван органическим коагулянтом. Флокулянт типа ВА - 2 связывает молекулой полимера взвешенные и коллоидные частицы воды, в результате чего образуются прочные полимерные мостики. Он применяется в дозах: летом - до 3 мг/л, в период паводка - 0,75 - 1,5 мг/л. Эффект осветления при использовании ВА - 2 выше, чем при использовании минеральных коагулянтов. Наиболее эффективен ВА - 2 при осветлении мутных вод. При очистке цветных вод в процессах отстаивания и осветления во взвешенном слое флокулянт ВА - 2 не эффективен. При использовании ВА - 2 не меняется щелочность воды, не образуются привкусы и запахи. Катионные флокулянты малотоксичны, не ухудшают органолептических свойств воды. Их применение не вызывает возражений с гигиенических позиций. Используемые для обработки воды реагенты приведены в табл. 7.4.

Таблица 7.4

Характеристика воды	Реагенты	Последовательность введения реагентов в воду
Не имеющая запахов и привкусов	Хлор, коагулянт	Первичное хлорирование, через 2–3 мин коагулянт
С запахом и привкусом, с хлорфенольным запахом	Озон, коагулянт, озон	Озон, коагулянт, озон перед фильтрами или в фильтрованную воду
	Хлор, перманганат калия	Первичное хлорирование, через 10 мин перманганат калия, через 2–3 мин коагулянт
	Хлор, активный уголь, коагулянт	Первичное хлорирование, через 10–15 мин активный уголь, через 10 мин коагулянт. Первичное хлорирование, через 2–3 мин коагулянт, активный уголь дозой до 5 мг/л перед фильтрами
	Хлор, перманганат калия, коагулянт	Первичное хлорирование, через 10 мин перманганат калия, через 10–15 мин активный уголь, через 10 мин коагулянт
С запахом и привкусом, с хлорфенольным запахом при хлорировании	Аммиак, хлор, коагулянт, хлор, АУ	Аммиак, через 2–3 мин первичное хлорирование, через 2–3 мин коагулянт, хлор, АУ
	Озон, коагулянт, озон	Озон, коагулянт, озон перед фильтрами или в фильтрованную воду
	Перманганат калия, хлор, коагулянт	Аэрация, перманганат калия, через 10 мин хлор, через 2–3 мин коагулянт
	Озон, аммиак, хлор, перманганат калия, коагулянт	Озон, аммиак, через 2–3 мин хлор, через 10 мин перманганат калия, через 2–3 мин коагулянт
	Перманганат калия, хлор, активный уголь, коагулянт	Перманганат калия, через 10 мин хлор, через 10–15 мин активный уголь, через 10 мин коагулянт

**Примечания:** 1. При недостаточной для коагуляции щелочности воды известь или соду следует вводить одновременно с коагулянтом.

2. Для обеззараживания хлор необходимо вводить в фильтрованную воду.

3. Флокулянты нужно вводить через 2–3 мин после коагулянта.

При низкой щелочности исходной воды для обеспечения успешной коагуляции примесей ее приходится подщелачивать, для чего в нее вводят одновременно с коагулянтом или до него известь или соду в количествах, определяемых по формуле

$$D_{щ} = K (0,0178D_k - Щ - 1),$$

где  $D_k$  - доза безводного сернокислого алюминия, мг/л;  
 $Щ$  - минимальная щелочность воды, мг-экв/л;  
 $K$  - коэффициент, равный для извести (по СаО) - 28 и для соды (по Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) - 53.

При отрицательной величине  $D_{щ}$ , мг/л, подщелачивание не требуется.

При обработке воды, помимо указанных реагентов, в необходимых случаях применяют также хлор, хлорную известь, или другие соединения хлора, активный уголь, кремнефтористый натрий или аммоний, аммиак, сернокислый газ и др.

Хлор или хлорную известь применяют для разрушения защитных коллоидов, препятствующих успешному протеканию процесса коагуляции, для обесцвечивания воды, поддержания очистных сооружений в надежном санитарном состоянии и для обеззараживания воды. Доза хлора определяется пробным хлорированием. При предварительном хлорировании дозу хлора принимают 3 - 10 мг/л. Реагент следует вводить в воду на 1 - 3 мин до поступления коагулянта и тщательно перемешивать.

При наличии в исходной воде фенолов рекомендуется применять озонирование или ее преаммонизацию путем введения в воду перед хлорированием аммиака или аммонийных солей в количестве 20 - 25 % (по NH<sub>3</sub>) дозы хлора.

Активный уголь (АУ), аммиак и сернистый газ используют для дезодорации воды. Из этих реагентов наибольшее применение в качестве средства для дезодорации имеет гранулированный или порошкообразный активный уголь, доза последнего находится экспериментально. АУ позволяет устранять почти все запахи и привкусы, с которыми можно встретиться при обработке природных вод. Углевание в значительной степени позволяет извлекать из воды микроорганизмы. В процессе углевания воды происходит диффузия растворенных веществ в поры угля и сорбция органических веществ на его внутренней и внешней поверхностях. Наибольший эффект дают угли с высокой адсорбционной активностью. Более всего отвечают этому требованию угли марок УА - щелочной, АГ - 3 и ОУ - кислый (Л.А.Кульский и др.).

При необходимости кратковременной дезодорации воды применяют тонкодиспергированный порошкообразный уголь, дозу которого ориентировочно назначают (по углю УА - щелочной) руководствуясь величиной привкуса или запаха: 3 балла - до 20 мг/л, 4 балла - 30 - 40 мг/л, 5 баллов - 50 - 80 мг/л; перманганат калия - при перманганатной окисляемости воды 8 - 10 мгО<sub>2</sub>/л - доза 1 - 3 мг/л; 10 - 15 мг 15 мгО<sub>2</sub>/л - 3 - 5 мг/л; 15 - 25 мгО<sub>2</sub>/л - 5 - 10 мг/л; озон, дозу которого надлежит принимать, руководствуясь результатами технологических исследований - ориентировочно 2 - 5 мг/л. Для устранения нежелательных привкусов и запахов возможно комбинированное применение указанных реагентов, при этом активный уголь следует вводить в воду после окислителей.

Кремнефтористый натрий и аммоний используют для фторирования питьевой воды. Дозу фторсодержащего реагента, мг/л, при фторировании следует определять по формуле:

$$D_{ф} = 10^4 (m_{ф}a_{ф} - \Phi)/K_{ф}C_{ф},$$

где  $m_{ф}$  - коэффициент, зависящий от места ввода реагентов в воду; при вводе в фильтрат  $m = 1$ , перед фильтровальными аппаратами  $m = 1,1$ ;  
 $a_{ф}$  - содержание фтора в обработанной воде, мг/л (для средней полосы для зимнего периода  $a_{ф} = 1$  мг/л; для летнего - 0,8 мг/л);

- $\Phi$  - содержание фтора в исходной воде, мг/л;  
 $K_{\Phi}$  - содержание фтора в чистом реагенте, %, принимаемое для кремнефтористоводородной кислоты равным 79 %;  
 $C_{\Phi}$  - содержание чистого реагента в товарном продукте, %.

#### 20.4. ОРГАНИЗАЦИЯ РЕАГЕНТНОГО ХОЗЯЙСТВА

В практике проектирования и эксплуатации водоочистных комплексов известны две схемы организации реагентного хозяйства. *Первая* схема предусматривает получение с заводов - поставщиков готовой продукции, которую затем при помощи дозаторов вводят в обрабатываемую воду; *вторая* основана на получении с заводов полуфабрикатов, нуждающихся в дальнейшей обработке и доведении до продукта, удобного для дозирования.

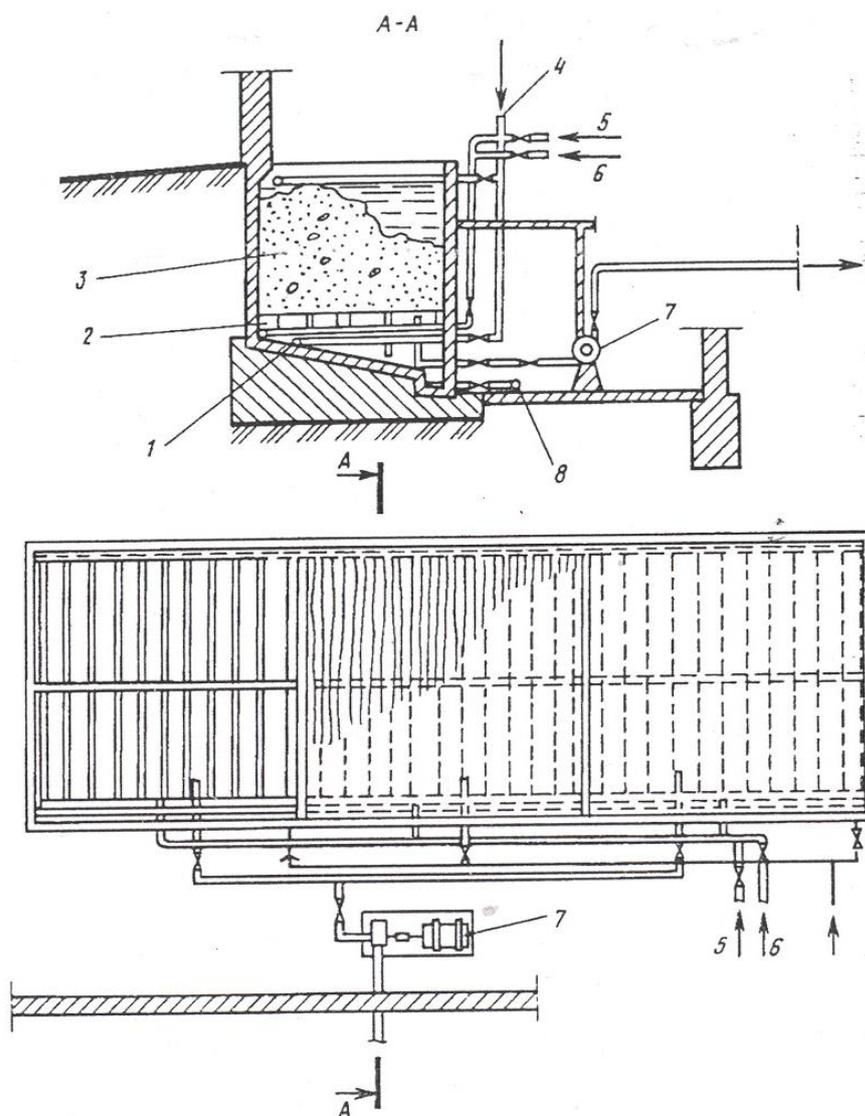
Применяемые при обработке воды реагенты вводятся в нее в виде порошков или гранул (сухое дозирование) либо в виде водных растворов или суспензий (мокрое дозирование). Оба способа дозирования требуют организации на водоочистном комплексе реагентного хозяйства. В первом случае на водоочистном заводе должны быть предусмотрены склад готовой продукции и аппараты - дозаторы; во втором - учитывая, что реагенты поступают в виде полуфабрикатов, кроме склада необходимо иметь оборудование для приготовления растворов (или суспензий) реагентов и их дозирования в обрабатываемую воду. При этом возможно складирование реагентов в сухом виде навалом или в специальной таре либо в виде высококонцентрированных растворов в специальных емкостях.

Во избежание потерь коагулянта от слежки, а также трудоемких погрузочно - разгрузочных работ при доставке коагулянта (и работ по загрузке растворных баков) в настоящее время широко распространено хранение коагулянта в жидком виде. С этой целью на водоочистном заводе предусматривают резервуары большой вместимости (рис. 7.6), в которых расчетный запас коагулянта хранят в виде раствора высокой концентрации (до 30 %), загружая их коагулянтом, доставляемым с завода - изготовителя в кусках. В процессе эксплуатации концентрированный раствор коагулянта передают в расходные баки, где доводят раствор до рабочей концентрации 10 - 12 %, а затем дозируют в обрабатываемую воду.

Для складирования реагентов в сухом виде предусматривают закрытые помещения на первом этаже вблизи от растворных баков. При складировании навалом сульфата алюминия и негашеной извести высоту слоя принимают соответственно 1,5 и 2 м, а при наличии соответствующей механизации допускается увеличение высоты слоя до 2,5 и 3,5 м. Высоту слоя поваренной соли следует принимать до 2 м. При хранении реагентов в таре рекомендуется следующая высота их укладки, м; для хлорного железа в барабанах и железного купороса в бумажных мешках - соответственно 2,5 и 3,5; для кальцинированной соды в бумажных мешках - 2 - 3,5, в контейнерах - 2 - 3; для активного угля в бумажных мешках, геля ПАА в бочках, кремнефтористого натрия в бочках, силиката натрия в бочках, технического перманганата калия в металлических бочках и баках - 2,5.

Склад кислот необходимо изолировать от остальных складских помещений. Он должен иметь надежную приточно - вытяжную систему вентиляции. При его устройстве должны учитываться правила оборудования и содержания складов для хранения сильнодействующих и ядовитых веществ. Это относится и к складам хлора и аммиака, которые необходимо размещать в пониженных точках территории водоочистного комплекса. Расходный склад хлора должен иметь объем для размещения не более 100 т, полностью изолированный - отсек до 50 т. Склад рекомендуется размещать в полузаглубленных или наземных зданиях с двумя выходами с противоположных сторон.

Хранят хлор в баллонах или контейнерах. Склад активного угля рекомендуется располагать в отдельном помещении, относящемся, по пожарной опасности к категории В. При хранении поваренной соли в растворе (при суточном расходе более 0,5 т) объем баков - хранилищ определяют из расчета 1,5 м<sup>3</sup> на 1 т реагента.



**Рис. 7.6.**  
**Резервуары для хранения коагулянта в жидком виде**  
 1 - резервуар с антикоррозионным покрытием; 2 - колосниковая решетка; 3 - слой коагулянта; 4 - подача воды; 5, 6 - подача пара и сжатого воздуха; 7 - кислотный насос; 8 - сброс осадка

Склад для хранения запасов ионообменных материалов рассчитывают на объем загрузки двух катионных фильтров и по одной загрузке фильтров со слабо- и сильноосновным анионитом в случае их применения. Состав и насыщенность реагентного хозяйства зависят от технологии улучшения качества воды. Так, помимо цехов коагулирования, хлорирования и известкования, могут быть цехи углевания, фторирования, озонирования и т.д.

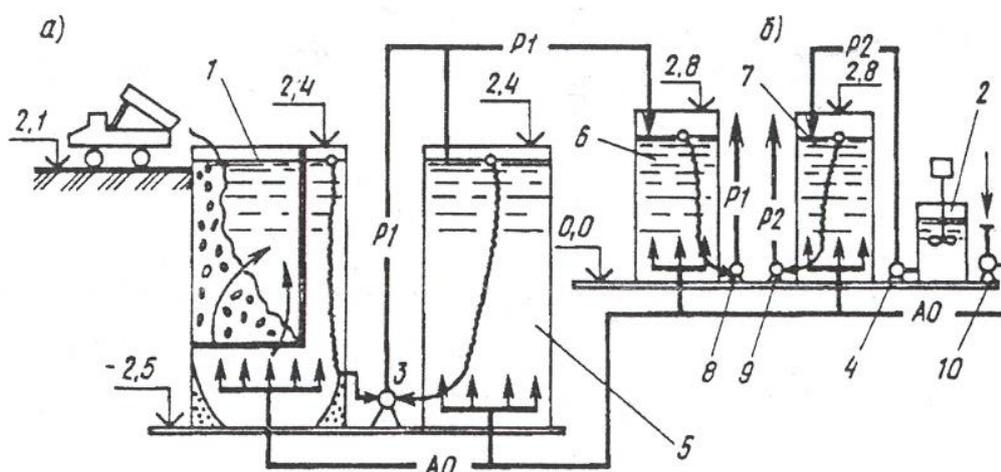
При проектировании и устройстве складов реагентов необходимо предусматривать механизацию их выгрузки из транспортных средств и загрузки в реагентные баки путем использования конвейеров и механических лопат. Размеры склада для хранения фильтрующих материалов и подбор оборудования производят из расчета 10 % - ного ежегодного пополнения и обмена фильтрующей загрузки и хранения аварийного запаса на перегрузку одного фильтра при общем числе до 20 и двух фильтров - при большем. Для загрузки фильтров рекомендуется использовать водоструйные и песковые насосы, конвейеры. При отсутствии централизованной поставки гравия и фильтрующих материалов на водоочистном комплексе предусматривают специальный цех и

оборудование для хранения, дробления, сортировки, отмывки и передачи указанных материалов на фильтры.

Наиболее широкое распространение в отечественной практике получило дозирование реагентов в виде растворов и суспензий. В этом случае предполагается наличие в составе реагентного хозяйства специальных баков для растворения реагентов, кислотных насосов для перекачки и дозирования, воздуходувных установок и дозаторов. Растворы или суспензии реагентов готовят в растворных или расходных баках (принимают соответственно не менее двух - трех баков). Для побуждения и интенсификации растворения реагентов предусматривают барботаж воздухом (рис. 1.1,а), механическое перемещение (рис. 1.1,б) или непрерывную циркуляцию раствора с помощью насоса (рис. 7.8). При барботировании интенсивность подачи сжатого воздуха составляет 8 - 10 л/(см<sup>2</sup>) - для растворения и 3 - 5 л/(см<sup>2</sup>) - для перемешивания при разбавлении в расходных баках. Распределение воздуха следует производить дырчатыми полиэтиленовыми трубами. В растворных баках концентрацию раствора коагулянта, считая по безводному продукту, следует принимать до 20 и 24 % соответственно для очищенного кускового и гранулированного, до 17 % - для неочищенного, а в расходных баках - до 12 %.

Растворные баки имеют наклонные днища под углом 45° к горизонтали при использовании неочищенного коагулянта и 15° - очищенного. Они оборудованы трубопроводом диаметром не менее 150 мм для опорожнения и сброса осадка. Днища расходных баков имеют уклон не менее 0,01° к сборному трубопроводу диаметром не менее 100 мм.

На водоочистных комплексах небольшой пропускной способности (до 1000 м<sup>3</sup>/сут) применяют совмещенные растворно - расходные баки (см. рис. 1.1,а). Куски коагулянта загружают в растворный бак с днищем из деревянных колосников, а насыщенный раствор коагулянта поступает через днище в расходный бак. В этот же бак добавляют водопроводную воду для разбавления раствора до требуемой концентрации. Для ускорения растворения реагента по пластмассовой трубе подают сжатый воздух под колосники. По этой же трубе сжатый воздух поступает в систему дырчатых труб, уложенных по дну расходного бака, для перемешивания в нем раствора и поддержания равномерной его концентрации. Совмещенный растворно - расходный бак должен иметь два отделения, чтобы подача раствора не прерывалась, когда идет его приготовление в одном из отделений. -



**Рис. 7.7. Схемы приготовления растворов коагулянта (а) и флокулянта (б)**

P1, P2 - трубопроводы раствора коагулянта и флокулянта; ЛО - воздухопровод; 1, 2 - растворные баки коагулянта и флокулянта; 3, 4 - насосы перекачки растворов коагулянта и флокулянта; 5 - бак - хранилище; 6, 7 - расходные баки коагулянта и флокулянта; 8, 9 - насосы - дозаторы; 10 - воздуходувка

На очистных комплексах большой пропускной способности устанавливают отдельно растворные и расходные баки с пирамидальным днищем и деревянными или железобетонными колосниками внизу бака, на которые загружают куски коагулянта. На сравнительно небольших установках расходные и растворные баки деревянные (из клепок), а на больших - железобетонные с антикоррозионной облицовкой внутри.

На водоочистных установках пропускной способностью до 1000 м<sup>3</sup>/сут реagentные баки могут быть размещены на верхнем этаже здания, что обеспечивает самотечную подачу раствора к месту его и ввода в обрабатываемую воду. В этом случае должен быть предусмотрен подъемник для подачи reagentов на верхний этаж. При большой пропускной способности водоочистного комплекса растворные и расходные баки должны быть размещены на первом этаже рядом со складом reagentов, а раствор reagentа должен подаваться к дозирующему устройству насосами.

Объем, м<sup>3</sup>, растворного  $V$  и расходного  $V$  баков определяют по формулам:

$$V = qD_k\rho T/(10 \cdot 10^3 b_p); \quad V = V_p b_p/b$$

где  $q$  - расчетный расход обрабатываемой воды, м<sup>3</sup>/ч;

$\rho$  - плотность раствора коагулянта, обычно 1 т/м<sup>3</sup>;

-

$T$  - число часов работы водоочистных сооружений, на которое заготавливают раствор коагулянта;

$b_p$  и  $b$  - концентрация раствора коагулянта в растворном и расходном баках.

**Для подщелачивания и стабилизации воды** используют известь в виде молока концентрацией по 5 % по оксиду кальция или раствора концентрацией до 1,4 г/л либо раствор соды концентрацией 5 - 8 %. Технологическая схема известкования воды назначается с учетом вида и качества исходного продукта, потребности в извести, места ее ввода и т.д. При суточном потреблении извести до 50 кг по оксиду кальция можно применять известковый раствор, приготовляемый в сатураторах двойного насыщения. При большем суточном потреблении известковый раствор или молоко готовят в баках (принимают не менее двух баков). Баки должны иметь конические днища с углом 45° и сбросные трубопроводы диаметром не менее 100 мм.

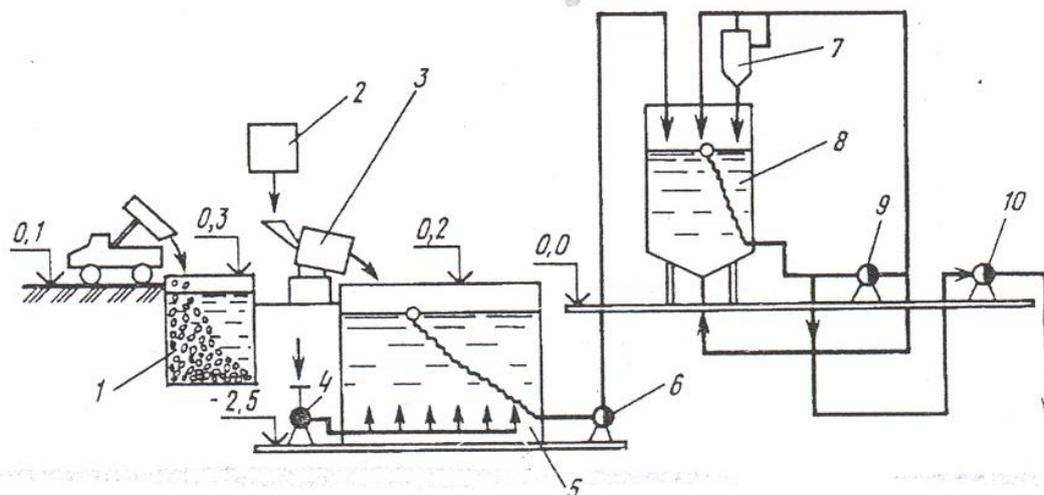
Постоянное перемешивание известкового молока в баках осуществляют гидравлическим способом с помощью циркуляционного насоса при восходящей скорости потока не менее 5 мм/с, механическими мешалками или барботированием воздухом с интенсивностью 8 - 10 л/(см<sup>2</sup>). Осветление известкового молока производят в вертикальных отстойниках с восходящей скоростью 2 мм/с или в гидроциклонах с двукратным пропуском его через аппарат.

Раствор соды готовят в железобетонных или стальных баках с механическим или пневматическим побуждением. Для ускорения процесса растворения соды рекомендуется подогрев воды до 50 - 60 °С.

**Угольную пульпу** концентрацией 5 - 10 % используемую для дезодорации воды, готовят замачиванием порошкообразного активного угля в течение 1 ч в баках с механическим или гидравлическим перемешиванием. Помещения, где размещены установки углевания, относятся к категории пожароопасных, их оборудуют системой приточно - вытяжной вентиляции с не менее чем пятикратным обменом воздуха.

**Растворы ПАА** из технического продукта готовят в баках с механическим побуждением (рис. 7.8). В состав установки, помимо мешалки, входят расходный бак, где аккумулируется раствор ПАА 1 - 1,5 % - ной концентрации, дозатор и эжектор, вторично разбавляющий раствор до 0,1 - 0,25 % - ной концентрации и транспортирующей его к месту ввода в обрабатываемую воду. Период приготовления растворов ПАА из геля - 30 -

40 мин, из сухого продукта - 2 ч. При использовании горячей воды с температурой до 50°C продолжительность приготовления раствора ПАА сокращается. Число мешалок и объем расходных баков определяют исходя из сроков хранения растворов ПАА: 0,7 - 1 % -ной концентрации - до 15 сут; 0,4 - 0,6 % -ной до 7 сут; 0,1 - 0,3 % -ной - до 2 сут.



**Рис. 7.8. Схема установки известкования воды**

1, 5 - баки известкового теста и известкового молока; 2 - бункер известкового теста; 3 - известегасилка; 4 - воздуходувка; 6 - насос перекачки известкового молока; 7 - гидроциклон; 8 - гидромешалка; 9 - циркуляционный насос; 10 - насос-дозатор

**Растворы АК** получают на месте ее применения путем активации силиката натрия (т.е. нейтрализации ее щелочности) раствором сульфата алюминия или хлором на установках непрерывного или периодического действия. При часовом использовании дозы АК до 3 кг применяют установки периодического действия, состоящие из реактного бака (где в течение 1 ч выдерживают хлорированный раствор силиката натрия), хлоратора ЛК - 10, центробежного насоса и дозаторов.

**Раствор перманганата калия** концентрацией 0,5 - 2 % готовят в растворных баках с гидравлическим перемешиванием, которых должно быть не менее двух. Продолжительность полного растворения реагента при температуре воды до 20 °С - 4 - 6 ч, а при 40 °С - 2 - 3 ч.

**Растворы фторсодержащих реагентов** готовят в сатураторах одинарного насыщения (для реагентов с малой растворимостью) или в баках (для хорошо растворимых реагентов) с механическим или пневматическим побуждением. Установки сатураторного типа применяют на водоочистных комплексах с пропускной способностью до 50 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Фтораторные установки с растворно - расходными баками, применяющиеся при большей пропускной способности универсальны, так как могут работать на любом фторсодержащем реагенте.

**Раствор гексаметафосфата натрия** (кальция) концентрацией 2 - 3 % (в расчете на товарный продукт) готовят в баках с механическим перемешиванием (применяют не менее двух баков). Продолжительность растворения реагента при непрерывном перемешивании в воде температурой 16 - 18 °С составляет 4 - 5 ч, 50 °С - около 2 ч. Раствор гексаметафосфата натрия характеризуется высокой коррозионной активностью, поэтому материал стенок баков должен иметь кислотостойкое покрытие.

**Дехлорирование воды** производится азириванием (при небольшом избытке остаточного хлора) или связыванием хлора при введении тиосульфата, сульфата и дисульфата натрия, аммиака, сжиженного оксида серы (IV), либо ее фильтрованием через гранулированный активный уголь. Примерные дозы реагентов определяются следующими соотношениями: на 1 мг хлора требуется тиосульфата натрия 0,8 - 7,2 мг, сульфата натрия 2,5 - 3,5 мг, оксида серы (IV) 0,9 - 1,1 мг, аммиака около 0,13 мг.



## 20.5. ДОЗИРОВАНИЕ РЕАГЕНТОВ

Из изложенного выше видно, что дозы используемых при обработке воды реагентов изменяются не только по сезонам года, но иногда и в течение суток адекватно изменениям качества обрабатываемой воды. Потому оборудование для дозирования реагентов должно работать в широком диапазоне применяемых доз.

В водоподготовке применяют дозаторы растворов и суспензий, газов и сухих реагентов, которые можно классифицировать на три типа: постоянной дозы; пропорциональные, автоматически устанавливающие дозу и соответствии с изменяющимся расходом воды или ее качеством; насосы - дозаторы. Дозаторы можно подразделять на дозирующие реагенты в открытый поток и в напорный трубопровод. Дозаторы сухих реагентов вводят их в открытый поток или в специальный смеситель, где они быстро растворяются.

Схема устройства и работы пропорционального дозатора простейшего типа показана на рис. 7.9. В водомерный бак дозатора поступает часть воды, отделенная в определенном количестве от общего потока на распределительном водосливе (остальная большая часть передается непосредственно в смеситель). Из бака вода выходит через патрубок с диафрагмой и направляется через воронку также в смеситель. В баке установлен поплавок, который с помощью тросика, перекинутого через блоки, удерживает на определенной высоте дозирующую трубку диафрагмы. Через эту трубку из второго бака вытекает раствор реагента, уровень которого в баке поддерживается постоянным шаровым клапаном. При увеличении количества воды, поступающей на обработку, уровень воды в баке повышается, поплавок поднимается, дозирующая трубка спускается, и расход раствора реагента увеличивается пропорционально расходу обрабатываемой воды. В баке исходной воды успокоительная камера отделена перегородкой.

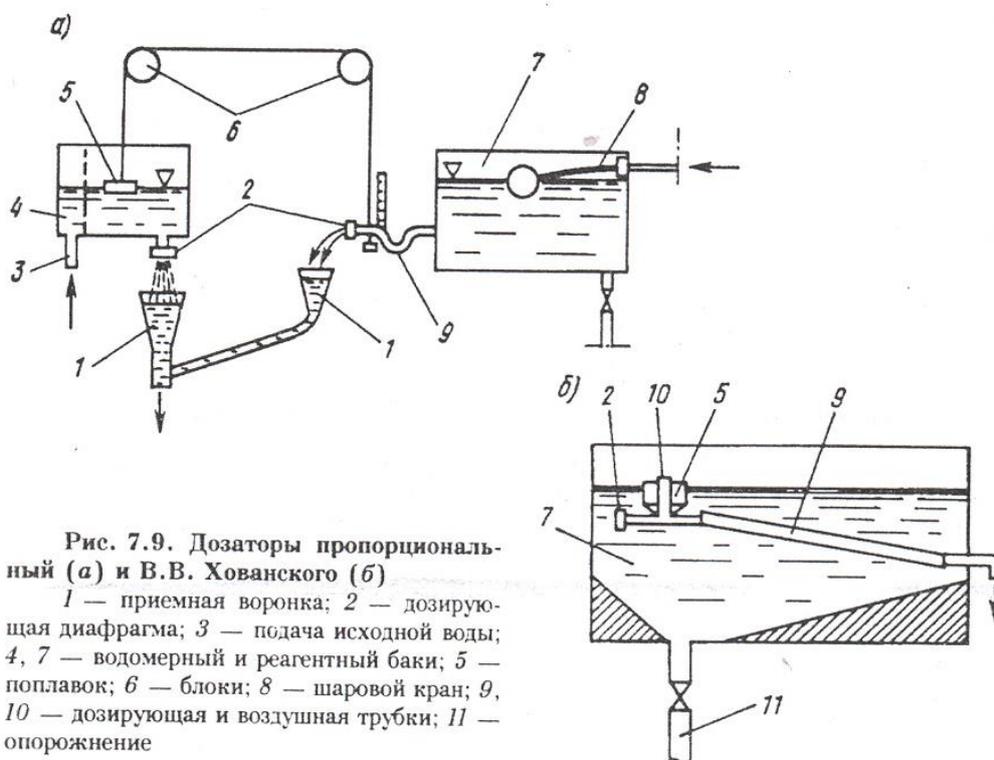
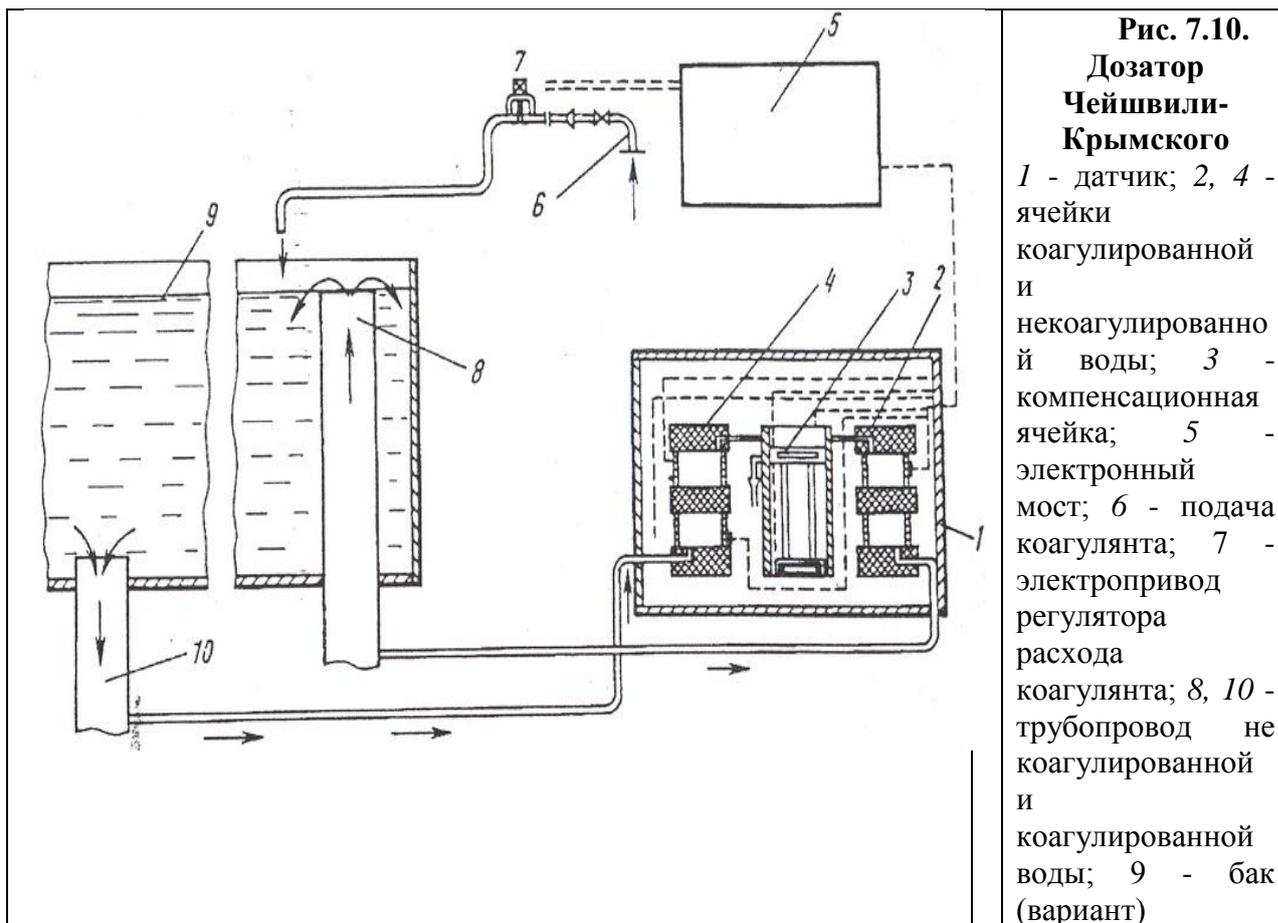


Рис. 7.9. Дозаторы пропорциональный (а) и В.В. Хованского (б)

1 — приемная воронка; 2 — дозирующая диафрагма; 3 — подача исходной воды; 4, 7 — водомерный и реагентный баки; 5 — поплавок; 6 — блоки; 8 — шаровый кран; 9, 10 — дозирующая и воздушная трубки; 11 — опорожнение

Автоматический дозатор пропорциональной дозы конструкции В.Л.Чейшвили и И.Л.Крымского (рис. 7.10) основан на использовании разности электропроводности некоагулированной воды и воды после введения в нее коагулянта. По тому же принципу действует дозатор АОВ - 2 системы ИОНХ АН Украины.



В последние годы в отечественной и зарубежной практике для дозирования реагентов все более широко используют плунжерные и винтовые насосы - дозаторы. У первым относятся насосы типа НД с подачей 0,16 - 2,5 м<sup>3</sup>/ч и давлением 981 кПа, ко вторым - марки 1В6/10Х с подачей 0,5 - 6 м<sup>3</sup>/ч и давлением 392 Па.

Наряду с дозированием реагентов в виде растворов и суспензий применяют их дозирование в виде порошков и гранул (сухое дозирование). Сухое дозирование можно осуществлять шнековым, тарельчатым, вибрационным, ленточными объемными и массовыми дозаторами и питателями. Используют дозаторы типа ДВ с массовым контролем подачей 8 - 40; 40 - 120; 120 - 400; 400 - 1000; 1000 - 2000; 2000 - 4000 кг/ч; питатели - дозаторы с массовым контролем типа ПНВ с такой же подачей, что и дозаторы типа ДВ; дозаторы автоматические, непрерывного действия сыпучих материалов типа ДН - 2 - TV с подачей 0,1 - 160; 0,1 - 320; 0,1 - 630; 0,1 - 1000; 0,1 - 1600 кг/ч. Отдозированный дозаторами реагент направляется в смывное устройство (слекер), из которого забирается эжектором и транспортируется водой к смесителю. Существенными преимуществами сухого дозирования являются компактность установки, предотвращения коррозии оборудования, простая схема автоматизации процесса и значительное снижение капитальных затрат.

## Глава 21. СМЕШЕНИЕ РЕАГЕНТОВ С ВОДОЙ

### 21.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Основопологающим условием коагулирования примесей воды является равномерное быстрое распределение реагентов в ее объеме для обеспечения максимального контакта частиц примесей с промежуточными продуктами гидролиза, существующими в течение

короткого промежутка времени, так как процессы Гидролиза, полимеризации и адсорбции протекают за несколько секунд. Первая фаза конвективной коагуляции - перекинетическая заканчивается, когда первичные хлопья достигают размеров 1 - 10 мкм, что совпадает с периодом быстрого распределения коагулянта в обрабатываемой воде. Плохое смешение влечет за собой перерасход реагентов и малую скорость агломерации примесей воды при данной дозе. Поэтому необходимо обеспечить оптимальные условия смешения реагентов с водой, при которых коагулянт вступил бы в контакт с максимальным числом частиц примесей воды до того, как произойдут реакции гидролиза и полимеризации,

Интенсивность смешения реагентов с водой характеризуется критерием Кэмпса  $GT$  и градиентом скорости  $G$ , определяемым из выражения

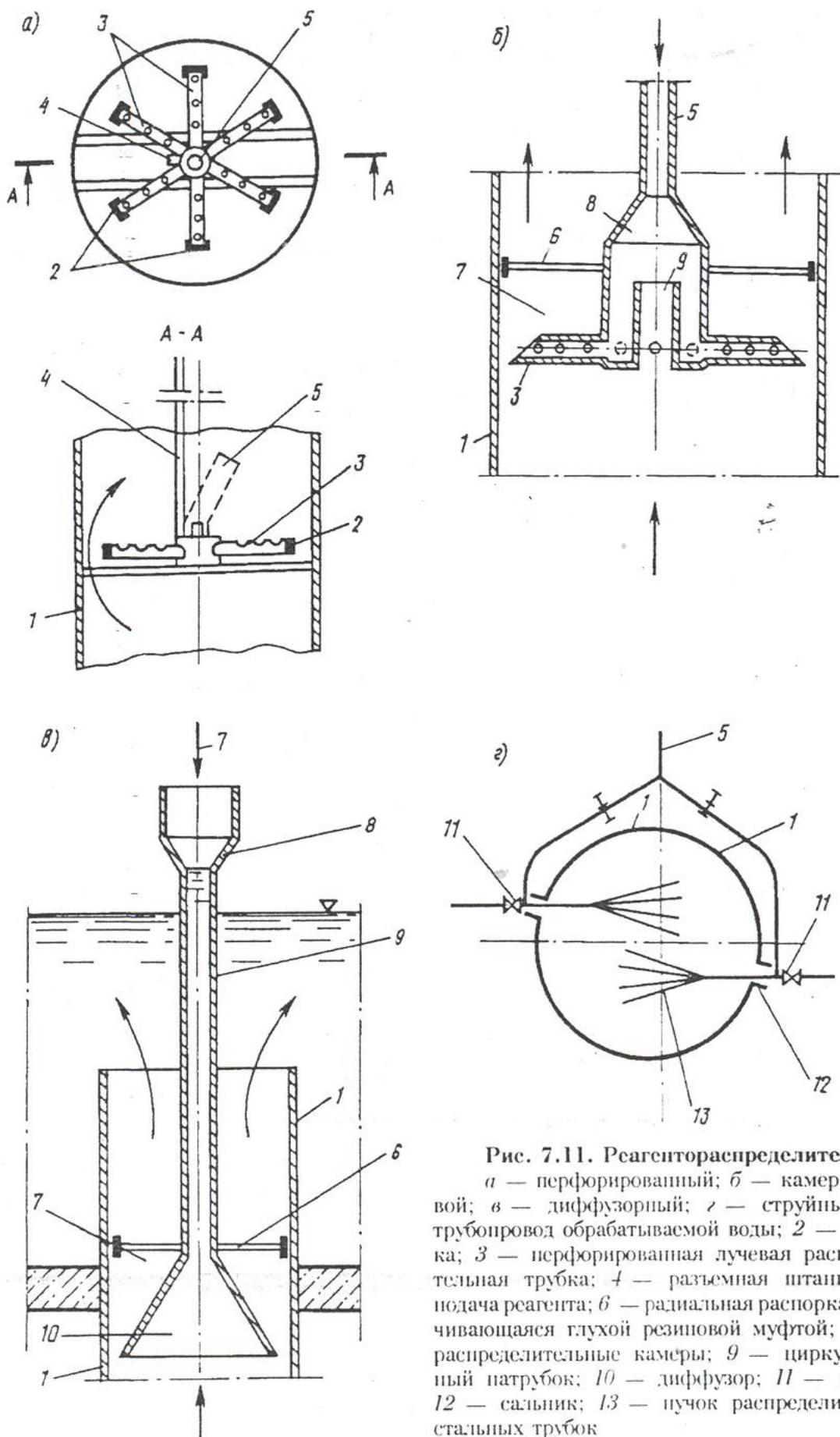
$$G = [E/(\eta TV)]^{0,5},$$

где  $E$  - энергия, затрачиваемая на смешение, Дж;  
 $\eta$  - динамическая вязкость воды. Пат;  
 $T$  - продолжительность смешения, с;  
 $V$  - объем воды в смесителе, м<sup>3</sup>.

Эффективность действия коагулянта (Е.И.Апельцина, А.М.Мирзаев) повышается при увеличении интенсивности смешения по сравнению с обычно принятой ( $G = 20..300$  с<sup>-1</sup>). При этом доза реагентов и время, необходимые для их полного распределения в воде, уменьшаются с повышением градиента скорости. В водоподготовке наметилась тенденция к применению смесителей, обеспечивающих чрезвычайно быстрое распределение коагулянта в обрабатываемой воде, что соответствует сформулированному выше тезису об использовании для дестабилизации примесей воды промежуточных продуктов гидролиза коагулянта. В основном это механические и трубчатые смесители. Для равномерного и быстрого смешения реагентов с водой их следует вводить в точках наибольшей турбулентности потока. Для смешения реагентов с водой необходимо предусматривать реагентораспределители (устройства ввода реагентов), обеспечивающие их быстрое равномерное распределение в подающем канале или трубопроводе и смесителе, где происходит последующее интенсивное смешение введенных реагентов с обрабатываемой водой.

Реагентораспределители рекомендуется выполнять в виде перфорированных трубчатых систем, камерно - лучевого, диффузорного и струйного типов (рис. 7.11), размещаемых в подающих трубопроводах или в начале смесителя. *Перфорированный распределитель* (рис. 7.11,а) предназначен для введения растворов коагулянта или флокулянта.

Его устанавливают в трубе перед смесителем, непосредственно при поступлении воды в смеситель или в одном из отделений входной камеры в проеме перегородки, создающем сужение потока и увеличение его турбулентности. *Камерно - лучевой распределитель* (рис. 7.11,б) служит для введения растворов реагентов, за исключением известкового молока. Его, как правило, размещают внутри трубопровода по оси потока (вертикально или горизонтально) на выходном участке трубопровода, подающем исходную воду, либо на входном, отводящем воду из сооружения, за которым следует и реагентная обработка. *Диффузорные распределители* (рис. 7.11,в) предназначены для ввода в обрабатываемую воду суспензий. Их устанавливают в вертикальных трубопроводах по оси потока обрабатываемой воды. *Распределители струйного типа* (рис. 7.11,г) служат для введения в воду суспензий реагентов в напорные трубы диаметром 200 - 1400 мм. Их можно размещать на горизонтальных и вертикальных участках трубопроводов. Потери напора в трубопроводе при установке указанных устройств принимают равными 0,15 - 0,3 мм.



**Рис. 7.11. Реагентораспределители**  
 а — перфорированный; б — камерно-лучевой; в — диффузорный; г — струйный; 1 — трубопровод обрабатываемой воды; 2 — заглушка; 3 — перфорированная лучевая распределительная трубка; 4 — разъемная штанга; 5 — подача реагента; 6 — радиальная распорка, заканчивающаяся глухой резиновой муфтой; 7, 8 — распределительные камеры; 9 — циркуляционный патрубок; 10 — диффузор; 11 — вентиль; 12 — сальник; 13 — пучок распределительных стальных трубок

Реагенты смешивают с обрабатываемой водой в смесительных устройствах (сопла Вентури, диафрагмы), трубчатых смесителях или в специальных сооружениях - смесителях, которые должны удовлетворять требованию полного и быстрого смешения реагентов со всей массой воды (т.е. время пребывания воды 1 - 3 мин).

Смесители классифицируют на механические и гидравлические. К гидравлическим смесителям, хорошо зарекомендовавшим себя на практике, следует отнести: коридорного типа (с вертикальным и горизонтальным движением воды); дырчатый напорный и безнапорный перегородчатый с разделением потока; вертикальный вихревой. Выбор типа и конструкции смесителя определяется компоновкой водоочистного комплекса с учетом его пропускной способности и методов обработки воды, а также технологическими соображениями.

## 21.2. СМЕСИТЕЛИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТИПА

Работа смесителей гидравлического типа основана на использовании турбулентности потока, создаваемой местными сопротивлениями путем увеличения в них скорости движения воды. Гидравлические смесители отличаются конструктивной простотой и эксплуатационной надежностью, однако при расходах обрабатываемой воды меньше расчетных они не обеспечивают надлежащего эффекта смешения. Число секций смесителей принимается не менее двух, резервные аппараты не предусматриваются.

Одним из приемов интенсификации и улучшения процесса коагуляции является мгновенное перемешивание воды с коагулянтom в *диафрагмовом смесителе* перед поступлением ее в камеру хлопьеобразования или контактную. Использование этого устройства на установках небольшой пропускной способности позволяет создать наиболее благоприятный режим для смешения, в результате чего расход коагулянта снижается до 25 %.

Широкое распространение получили *перегородчатые смесители* с разделением потока. Такой смеситель представляет собой железобетонный лоток с тремя (как минимум) щелевыми перегородками (рис. 7.12,а), установленными перпендикулярно оси сооружения. При движении в щелях со скоростью 1 м/с за ними образуются вихревые течения, что способствует быстрому и полному смешению реагента с водой. Расстояния между перегородками должны равняться двойной ширине лотка.

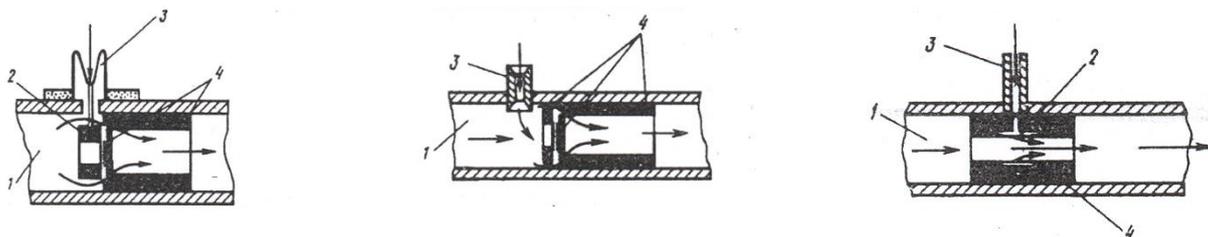
*Дырчатый смеситель* (рис. 7.12,б) представляет собой лоток с дырчатыми перегородками, установленными перпендикулярно направлению движения воды. Вода, проходя через отверстия со скоростью 1 м/с, испытывает завихрения, что способствует ее хорошему перемешиванию с реагентами. Диаметр отверстий принимают 20 - 100 мм. Верхний ряд отверстий должен быть затоплен под уровень воды на 0,1 - 0,15 м во избежание подсоса воздуха.

Для водоочистных комплексов с осветлителями рекомендуются *вертикальные (вихревые) смесители* в виде цилиндрического (или квадратного в плане) резервуара с конической (или пирамидальной) нижней частью при угле наклона 30 - 45° (рис. 7.12,г). В низ конуса (или пирамиды) подводят обрабатываемую воду со скоростью 1,2 - 1,5 м/с и туда же, только с противоположной стороны, через специальные патрубки вводят растворы реагентов. Восходящая скорость движения воды в цилиндрической части смесителя высотой 1,0 - 1,5 м должна быть 30 - 40 мм/с, благодаря чему частицы реагента находятся во взвешенном состоянии. Отвод воды из смесителя производят периферийным лотком со скоростью 0,6 м/с, дырчатыми трубами с затопленными отверстиями или центрально расположенной затопленной воронкой.

На крупных водоочистных комплексах находят применение *перегородчатые смесители коридорного типа* (рис. 7.12,б) с вертикальным или горизонтальным движением воды со скоростью 0,6 - 9 м/с при времени пребывания в них 3 - 5 мин. Число поворотов на 180° принимают равным 9 - 10. Следует предусматривать возможность

сокращения числа перегородок для уменьшения времени пребывания обрабатываемой воды в смесителе в периоды интенсивного хлопьеобразования.

На небольших водоочистных установках применяют *трубчатые смесители* (рис. 7.13), которые характеризуются значительными потерями напора. Их можно также использовать на крупных водоочистных комплексах при соответствующем обосновании.



**Рис. 7.13. Трубчатые смесители**

1 – трубопровод; 2 – распределитель реагента; 3 – подача реагента; 4 - местное сопротивление

Для смешивания растворов реагентов с водой в нашей стране применяют в основном смесители гидравлического типа, иногда смешивание производят в трубах и центробежных насосах, подающих воду на очистные сооружения. Недостатком рассмотренных способов смешивания является возможность регулирования степени турбулизации и времени пребывания в смесителе в зависимости от ее расхода и качества.

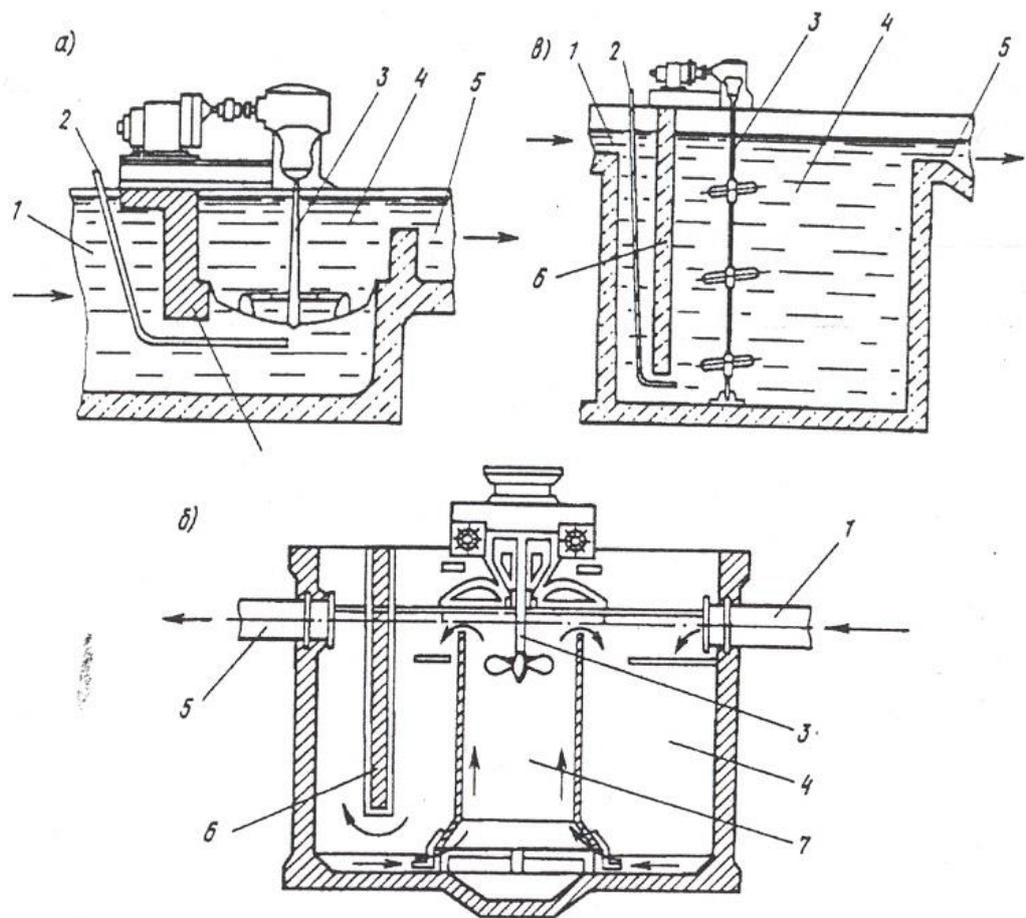
### 21.3. СМЕСИТЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОГО ТИПА

Оптимальный эффект коагуляции обеспечивает очень быстрый перенос частиц, который возможен только в высокоскоростных **механических смесителях с мешалками лопастного, турбинного и пропеллерного типа** (рис. 7.14), где происходит практически мгновенное распределение реагента во всем объеме воды и быстрое получение оптимальной концентрации. Такие смесители позволяют уменьшить время коагуляции и при наиболее полном использовании реагентов увеличить плотность образующихся хлопьев, сократить дачу коагулянта.

**Механические смесители** представляют собой круглые или квадратные в плане камеры с соотношением высоты к ширине (диаметру) 2:1 с плоским или коническим днищем. Для смешивания применяют турбинные, пропеллерные и лопастные мешалки на вертикальной оси. Число мешалок на валу зависит от глубины камеры. Частота их вращения изменяется и обычно не превышает  $80 \text{ мин}^{-1}$  для турбинных мешалок с максимальной линейной скоростью на конце лопасти до  $5 \text{ м/с}$  и до  $150 \text{ мин}^{-1}$  для пропеллерных. Время пребывания воды составляет от 30 с до 1 мин. Привод смесителя размещают на площадке на высоте около 1 м выше верха камеры. Стационарный подшипник устанавливают на опорной плите сверху резервуара.

Исследованиями установлено, что смесительное устройство следует принимать трехлопастного пропеллерного типа с вертикальным расположением по оси камеры, на одном валу надлежит устанавливать одну мешалку.

Исследования механических смесителей, проведенные в МГСУ (Г.И.Николадзе, А.М.Мирзаев), показали, что их применение позволяет снизить удельные капитальные затраты, уменьшить расход коагулянта до 25 %, сократить время пребывания воды в отстойниках и осветлителях со слоем взвешенного осадка, регулировать параметры смешивания адекватно количеству и качеству обрабатываемой воды.



**Рис. 7.14. Механические смесители турбинного (а), пропеллерного (б) и лопастного (в) типов**

1, 5 - подача и отвод воды; 2 - ввод реагента; 3 - ось мешалки; 4 - камера смешения; 6 - струенаправляющая перегородка; 7 - центрально - расположенный стакан

## Глава 22. КАМЕРЫ ХЛОПЬЕОБРАЗОВАНИЯ

### 22.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для завершения второй стадии конвективной коагуляции примесей воды - ортокинетической используют камеры хлопьеобразования, которые предназначены для создания оптимальных условий для хлопьеобразования. На эффективность процесса и размеры формирующихся хлопьев при медленном перемешивании обрабатываемой воды влияют его интенсивность (градиент скорости) и продолжительность; характер и дисперсность примесей; солевой состав, щелочность и рН соды; доза коагулянта, а также силы адгезии, удерживающие частицы примесей в агломерированном состоянии. Агломерация образующихся в процессе гидролиза коагулянта хлопьев происходит постепенно в течение 6 - 30 мин и более.

Исследования Г.Н.Николадзе, Г.Н.Луценко, Ч.С.Лая показали, что существенное влияние на процесс хлопьеобразования оказывают интенсивность и продолжительность перемешивания обрабатываемой воды в камерах хлопьеобразования. При этом основополагающей является интенсивность перемешивания  $G = 50..60 \text{ с}^{-1}$ ; влияние продолжительности процесса проявляется в меньшей степени. Градиент скорости в камерах хлопьеобразования разных типов определяется по формулам.

в перегородчатой

$$G = \left\{ \frac{[nv_1^2 + (n-1)]Q\rho}{2V\eta} \right\}^{0,5};$$

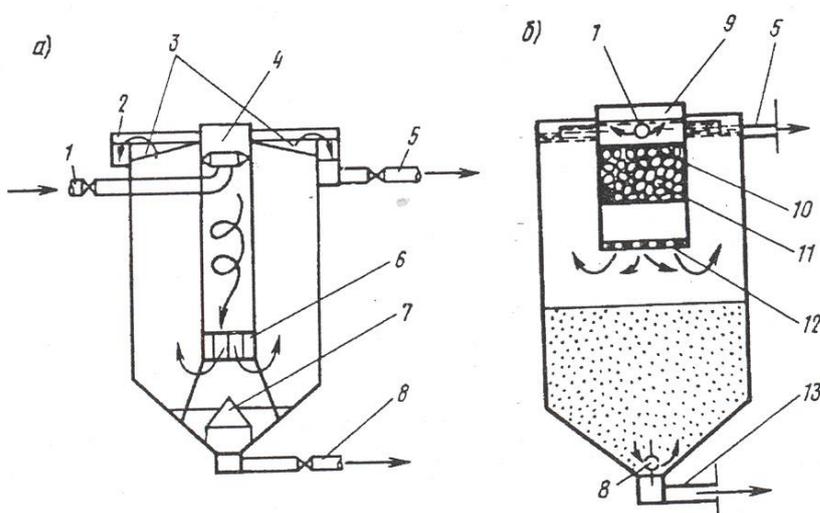
в вихревой и водоворотной

$$G = (\rho v^2 Q / 2V\eta)^{0,5};$$

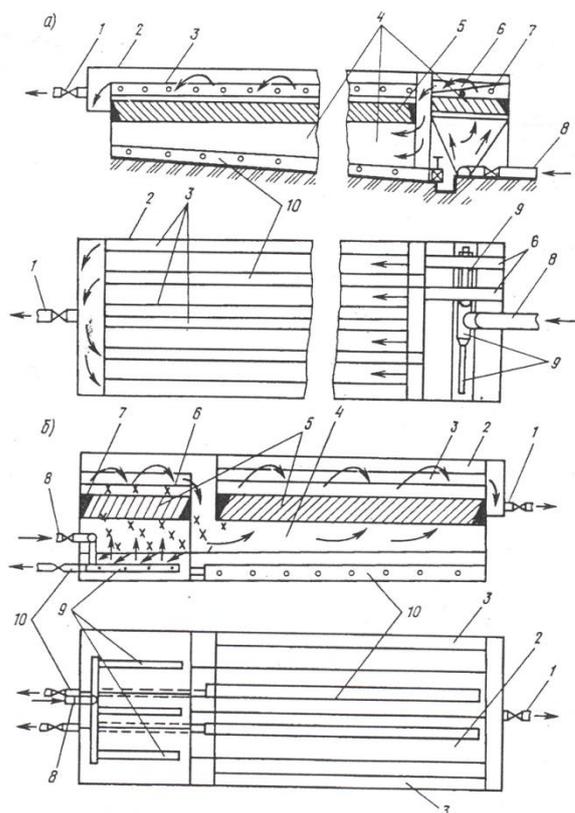
в флокуляторе (механической)

$$G = (2\pi nV / V\eta)^{0,5};$$

Нет формул



**Рис. 7.15. Водоворотная (а) и контактная (б) камеры хлопьеобразования, совмещенные с вертикальным отстойником**  
 1, 5 - подача исходной и отвод осветленной воды; 2 - кольцевой водосборный лоток; 3 - радиальные лотки; 4, 9 - водоворотная и контактная камеры хлопьеобразования; 6 - гаситель; 7 - конус - отражатель; 8 - сброс осадка; 10, 12 - верхняя и нижняя решетки; 11 - вспененный полистирол; 13 - сброс осадка



**Рис. 7.16. Вихревая (а) и зашламленного типа (б) камеры хлопьеобразования, встроенные в горизонтальный отстойник**  
 1, 8 - отвод осветленной и подача исходной воды; 2 - горизонтальный отстойник; 3 - лотки децентрализованного отбора осветленной воды; 4 - зона осветления воды; 5 - тонкослойные модули; 6 - лотки для сбора и отведения воды; 7 - вихревая камера хлопьеобразования; 9 - водораспределительные перфорированные трубы; 10 - перфорированные трубы сбора и удаления осадка

$$\text{в аэрофлокуляторе } G = \{q\rho_0 \ln(p_0 + pgy)/p_0\} / V\eta\},$$

- где
- $n$  - число перегородок;
  - $v_1$  и  $v_2$  - скорость движения воды в коридоре камеры и на повороте, м/с;
  - $Q$  - расход коагулируемой воды, м<sup>3</sup>/с;
  - $\rho$  - плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;
  - $V$  - объем камеры, м<sup>3</sup>;
  - $\eta$  - динамическая вязкость воды, Па с;
  - $u$  - скорость входа воды в камеру из подводящего трубопровода, м/с;
  - $m$  - частота вращения мешалки, с<sup>-1</sup>;
  - $N$  - начальная мощность, затрачиваемая на вращение мешалки, Вт;
  - $g$  - расход воздуха, м<sup>3</sup>/с;
  - $p_0$  - атмосферное давление, Па;
  - $h$  - глубина слоя воды над водораспределительной системой, м.

Интенсивность перемешивания воды в камерах хлопьеобразования не должна быть большой, чтобы не разрушить образовавшиеся хлопья. Необходимая интенсивность перемешивания воды достигается изменением скорости ее движения или частоты вращения мешалки во флокуляторах, а оптимальная продолжительность процесса обеспечивается надлежащим объемом сооружения.

По принципу действия камеры хлопьеобразования классифицируют на гидравлические и механические (флокуляторы и аэрофлокуляторы). Из камер гидравлического типа предпочтение отдадут водоворотным (рис. 7.15), вихревым (рис. 7.16,а), перегородчатым и зашламленного типа (рис. 7,16,б). все камеры, кроме перегородчатых, встраивают в отстойники. При числе камер хлопьеобразования менее шести согласно СНиП необходимо предусматривать одну резервную. Конструкцию камеры хлопьеобразования следует выбирать исходя из качества исходной воды и типа отстойника.

## 22.2. КАМЕРЫ ХЛОПЬЕОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТИПА

К камерам хлопьеобразования гидравлического типа, хорошо зарекомендовавшим себя на практике, помимо указанных выше следует отнести камеры с центральной галереей, с псевдооживленной зернистой загрузкой, с циркуляцией осадка, с контактной загрузкой.

*Водоворотная камера хлопьеобразования* совмещается с вертикальным отстойником и располагается в центральном стакане. Вода распределяется в верхней части камеры соплом, расположенным на расстоянии 0,2 диаметра камеры от стенки, на глубине 0,5 м от поверхности воды, или соплами, закрепленными в ее центре в виде неподвижного сегнера колеса. Выходя из сопел со скоростью 2 - 3 м/с, вода приобретает вращательное движение вдоль ее стенок и движется сверху вниз. Для гашения вращательного движения воды при ее переходе в отстойник, которое могло бы ухудшить его работу, внизу камеры устанавливают гаситель в виде крестообразной перегородки высотой 0,8 м с ячейками 0,5x0,5 м. Время пребывания воды в камере принимают 15 - 20 мин, а ее высоту 3,5 - 4 м.

*Перегородчатая камера хлопьеобразования* (примыкает к горизонтальным отстойникам) представляет собой прямоугольный железобетонный резервуар с перегородками, образующими 9 - 10 коридоров шириной не менее 0,7 м, через которые последовательно проходит вода со скоростью 0,2 - 0,3 м/с в начале камеры и 0,05 - 0,1 м/с в конце. За счет увеличения ширины коридоров можно регулировать продолжительность пребывания обрабатываемой воды в камере в зависимости от ее качества. Дно коридоров камеры выполняют с продольным уклоном 0,02 - 0,03° для удаления осадка при очистке. Среднюю глубину камеры принимают 2 - 2,5 м, продолжительность пребывания воды в камере - 20 - 30 мин (минимальное время - для мутных вод, максимальное - для цветных вод с пониженной температурой).

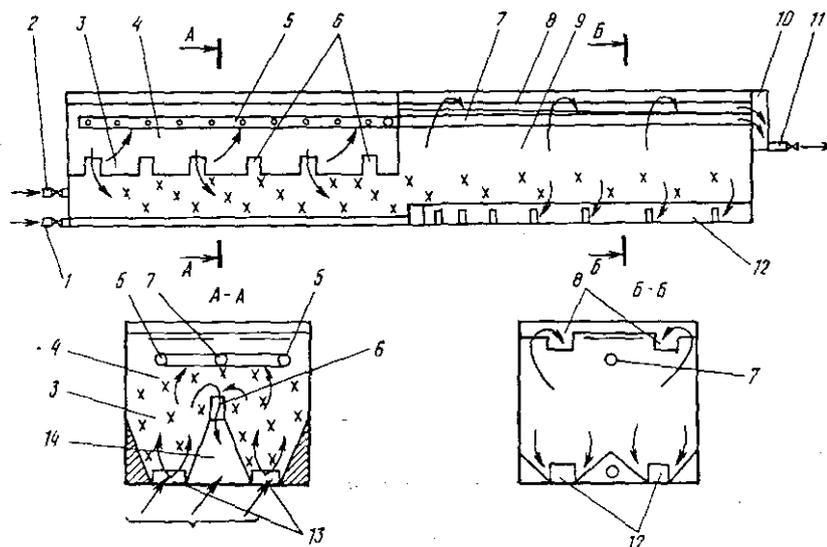
*Вихревая камера хлопьеобразования* (см. рис. 7.16,а) выполняется в виде прямоугольного в плане железобетонного с коническим или пирамидальным днищем резервуара (с углом конусности 50 - 70°), обращенного углом вниз. Ее встраивают в радиальный, вертикальный или горизонтальный отстойник. Перемешивание воды в камере хлопьеобразования происходит при ее движении снизу вверх вследствие уменьшения скорости движения (от 0,8 - 1,2 до 0,004 - 0,005 м/с) в результате резкого увеличения площади поперечного сечения. Время пребывания воды в камере составляет от 6 (для мутных вод) до 12 мин (для цветных вод). Передачу воды из камеры в отстойники следует осуществить при скорости ее движения в сборных лотках или трубах, а также в их отверстиях не более 0,05 м/с для цветных вод и 0,1 м/с для мутных. Для интенсификации работы камеры в ее верхней части размещают тонкослойные модули.

*Камера хлопьеобразования зашламленного типа* (см. рис. 7.16,б) с вертикальными перегородками применяется для вод с мутностью до 1500 мг/л. Ее размещают в начале коридора отстойника и выполняют в виде железобетонного с пирамидальным днищем резервуара (с углом конусности 45°). В основаниях перевернутых пирамид размещают напорные перфорированные водораспределительные трубы, расстояние между которыми в осях 2 м, от стенки камеры 1 м. Отверстия трубы диаметром не менее 25 мм направлены вниз под углом 45°, их суммарная площадь составляет 30 - 40 % площади сечения распределительной трубы. Скорость движения воды в распределительных трубах 0,4 - 0,6 м/с. Для соблюдения постоянства скорости движения воды, перфорированные распределительные трубы необходимо выполнять телескопическими с косыми переходами.

При восходящей скорости потока 0,65 - 1,6 (для вод мутностью 50 - 250 мг/л) и 0,8 - 2,2 мм/с (для вод мутностью 250 - 1500 мг/л) образуется и поддерживается во взвешенном состоянии слой осадка из скоагулированных примесей высотой не менее 3 м, частицы которого являются центрами коагуляции. Время пребывания воды в камере не менее 20 мин. Применение подобных камер хлопьеобразования позволяет увеличить расчетную

скорость осаждения взвешенных веществ в отстойниках при осветлении вод средней мутности на 15 - 20 % и мутных на 20 %. Передача воды из камеры в отстойник должна осуществляться при скорости ее движения до 0,1 м/с для мутных вод и до 0,05 м/с - для цветных.

Для повышения коэффициента объемного использования Г.Д.Павловым была предложена камера с центральной галереей (рис. 7.17). Половина поступающей в отстойник воды проходит через слой взвешенного осадка в камере, осветляется в нем и отводится в сборный торцевой канал отстойника, а другая половина проходит через центральную галерею камеры, куда отводится избыток взвешенного осадка, смешивается с ним и поступает в отстойник, где происходит ее осветление осаждением.



**Рис. 7.17. Камера хлопьеобразования с центральной галереей**

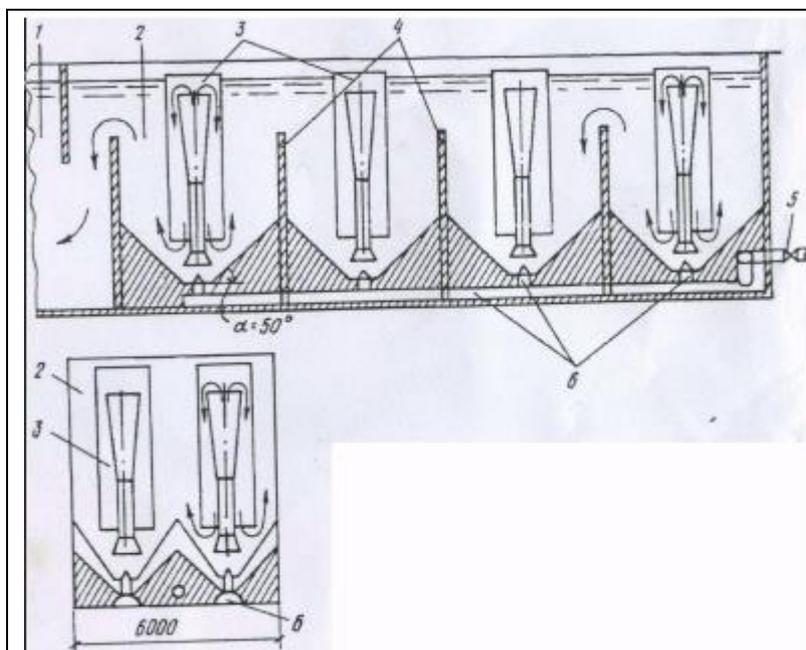
1, 2 - подача обрабатываемой воды в зону взвешенного осадка, и центральную галерею; 3, 4 - зоны взвешенного осадка и осветления воды; 5, 7 - трубы сбора и отведения осветленной воды из камеры хлопьеобразования; 6 - осадкоотводные патрубки; 8 - желоба сбора и отведения воды из отстойника; 9 - зона осветления воды в отстойнике; 10 - боковой сборный карман; 11 - отвод воды из отстойника; 12 - перфорированные короба для сброса осадка; 13 - перфорированные распределительные короба; 14 - центральная галерея

Для улучшения процесса хлопьеобразования при конвективном коагулировании примесей маломутных и цветных вод А.Б.Гальберштадтом предложена гравийная камера с псевдооживленной зернистой загрузкой. Оптимальные условия протекания процесса хлопьеобразования создаются при использовании зернистой загрузки из керамической крошки, (керамзита, песка и др.) с эквивалентным диаметром 0,6 - 0,9 мм и высотой слоя в статических условиях 0,3 - 0,5 м, работающей при расширении на 10 - 15 %, что соответствует восходящей скорости потока 2,6 - 4,0 мм/с. Первоначально контактный слой загрузки покоится на слое гравия крупностью 5 - 20 мм и высотой 0,3 - 0,4 м.

Другая конструкция контактной камеры хлопьеобразования, но без поддерживающего гравийного слоя была предложена М.Г.Журбой. Для образования псевдооживленного слоя использованы вспененные гранулы полистирола марки ПСВ крупностью 0,5 - 1,5мм, удерживаемые в верхней части камеры дренажной сеткой. Первоначальная высота слоя гранул около 1 м. Восходящая скорость движения воды в камере 5 - 6 мм/с.

Использование контактных камер хлопьеобразования позволяет увеличить в 3 - 4 раза нагрузку на единицу объема камеры, снизить на 20 - 25 % расход коагулянта, уменьшить примерно в 1,5 раза продолжительность отстаивания воды в отстойниках.

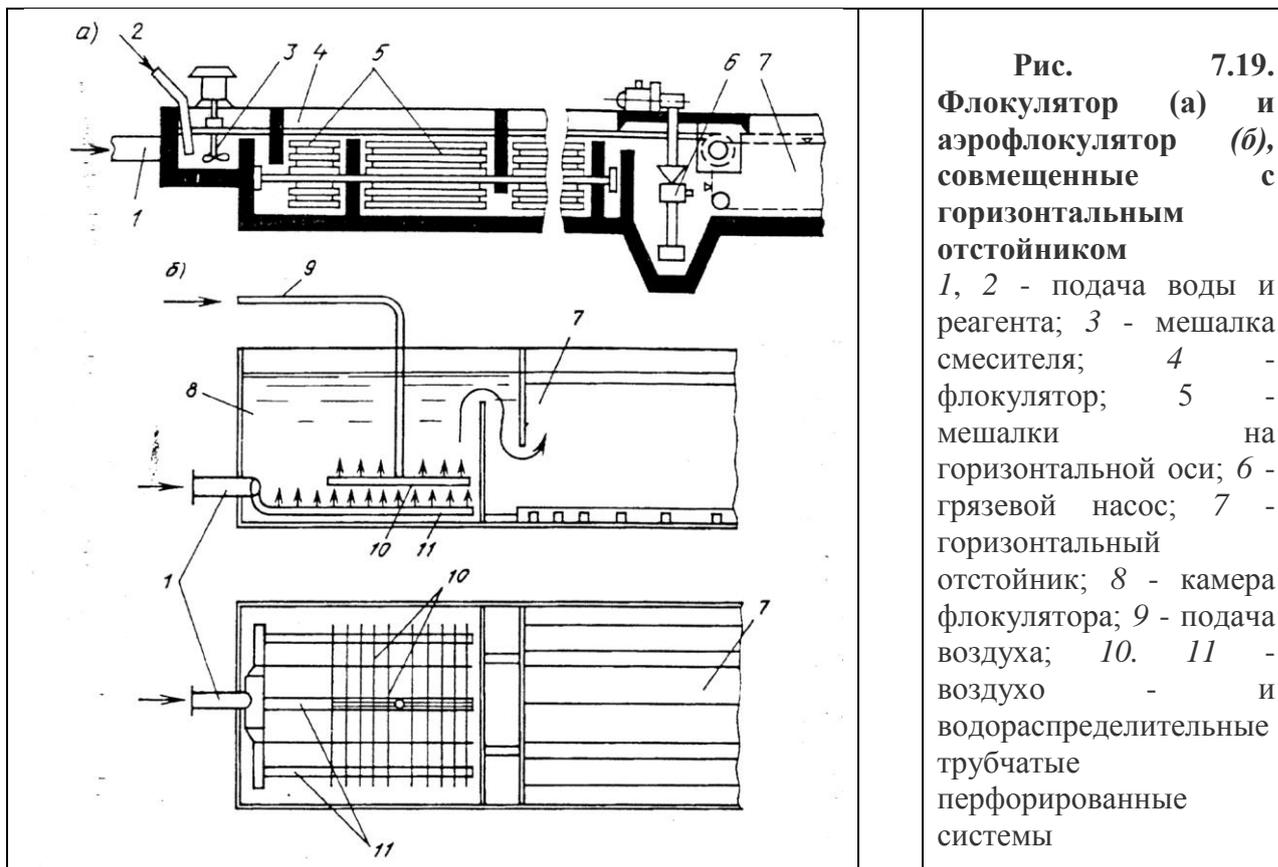
При кондиционировании маломутных цветных вод хорошо зарекомендовала себя камера хлопьеобразования зашламленного типа с рециркуляцией осадка (рис. 7.18). Обрабатываемая вода, соплами вводимая в нижние части секций камеры со скоростью 1 м/с, поступает в центрально расположенные эжектируемые вставки и всасывает воду с осадком из объема секций. Таким образом, в каждой секции происходит непрерывное движение взвешенного осадка, обеспечивающее контактирование агрегативно неустойчивых примесей и их укрупнение. Постепенно обрабатываемая вода переходит из камеры в камеру и далее в отстойник. Время пребывания воды в камере 20 - 30 мин.



**Рис. 7.18. Камера хлопьеобразования с рециркуляцией осадка**  
 1, 2 - отстойник и камера хлопьеобразования; 3 - рециркуляторы; 4 - перегородки, делящие объем камеры на последовательно работающие секции; 5 - подача исходной воды; 6 - распределительная труба с соплами.

### 22.3. ФЛОКУЛЯТОРЫ И АЭРОФЛОКУЛЯТОРЫ

В механических камерах хлопьеобразования (флокуляторах), рекомендуемых СНиП 2.04.02 - 84 для обработки мутных вод и применяемых на крупных водоочистных комплексах (рис. 7.19.а), плавное перемешивание воды для завершения процесса ортокинетической коагуляции ее примесей осуществляется пропеллерными или лопастными мешалками, размещаемыми на горизонтальных или вертикальных осях. Мешалка имеет одну или несколько лопастей. Флокуляторы обычно встраивают в горизонтальные отстойники и рассчитывают на время пребывания воды в них 30 - 40 мин (до 60 мин при реагентном умягчении). Число мешалок принимают 3 - 5. Скорость течения воды во флокуляторе снижается по ходу потока от 0,5 до 0,1 м/с за счет сокращения частоты вращения мешалок или уменьшающейся по ходу воды площади их лопастей. Окружную скорость вращения мешалок принимают 0,3 - 0,5 м/с адекватно качеству исходной воды.



**Рис. 7.19.**  
**Флокулятор (а) и**  
**аэрофлокулятор (б),**  
**совмещенные с**  
**горизонтальным**  
**отстойником**  
 1, 2 - подача воды и  
 реагента; 3 - мешалка  
 смесителя; 4 -  
 флокулятор; 5 -  
 мешалки на  
 горизонтальной оси; 6 -  
 грязевой насос; 7 -  
 горизонтальный  
 отстойник; 8 - камера  
 флокулятора; 9 - подача  
 воздуха; 10, 11 -  
 воздухо - и  
 водораспределительные  
 трубчатые  
 перфорированные  
 системы

Флокуляторы с мешалками на вертикальных осях обычно оборудуют двигателями с переменной частотой вращения; при размещении мешалок на горизонтальных осях один двигатель обслуживает несколько мешалок. Мешалки располагают в начале коридора отстойника в два ряда и более и разделяют перегородками для циркуляции воды. Флокуляторы имеют различную форму в плане (квадратную, круглую и прямоугольную).

*Таблица 7.5*

Характеристика воды	pH	Реагент	Критерий Кэмпбелла $G \cdot 10^3$
Маломутные, цветные	5,5 - 6,5	Сульфат алюминия	40 - 55
	4,5 - 5,5	Хлорное железо	100 - 150
	5,5 - 6,8	ППА	200 - 300
Средней мутности и цветности	6 - 7	Сульфат алюминия	25 - 36
	6,6 - 7,2	Хлорное железо	35 - 50

Оптимальным (Г.Н.Николадзе, Ч.С.Лай) является применение пропеллерных мешалок, создающих аксиальные потоки, ослабляющие процесс разрушения образовавшихся хлопьев. Следует принимать не менее трех секций камеры с зигзагообразной траекторией движения потока; структура градиента скорости должна быть убывающей по ходу от 100 до 25 - 50  $s^{-1}$  в последней секции; мешалки целесообразно размещать на вертикальной оси (табл. 7.5).

Преимуществами флокуляторов по сравнению с камерами гидравлического типа являются небольшие потери напора, простота конструкции, оптимизация процесса хлопьеобразования адекватно качеству обрабатываемой воды путем изменения частоты вращения мешалок; недостатками - дополнительный расход электроэнергии, высокие требования к материалам деталей, что удорожает сооружение в целом.

*Аэрофлокуляторы* - барботажные камеры хлопьеобразования (рис, 7.19,6) получают все более широкое распространение в технологии водоподготовки благодаря дешевизне и доступности воздуха, невысокой стоимости оборудования, высокого эффекта хлопьеобразования. При этом работа, совершаемая воздухом, осуществляется за счет разности его плотности с водой. По А.В.Бутко эффект хлопьеобразования в аэрофлокуляторах достигается в результате четырех одновременно протекающих процессов: выделения из воды избыточных количеств диоксида углерода, окисления кислородом воздуха органических примесей, специфического механического перемешивания воды пузырьками воздуха и образования зародышей твердой фазы продуктов гидролиза на поверхности газовых пузырьков. В отличие от механического перемешивания при одинаковом градиенте скорости длительное пневматическое перемешивание воды не приводит к нарушению тиксотропных свойств коагулированной взвеси. В аэрофлокуляторах используют слабое пневматическое перемешивание, обычно с интенсивностью  $0,15 - 0,25 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{мин})$ , при этом расход воздуха не превышает 5 % расхода обрабатываемой воды.

В аэрофлокуляторах используют пузырьковое истечение, имеющее следующие преимущества:

высокий и стабильный эффект водообработки;

интенсивность хлопьеобразования в камере можно регулировать адекватно качеству обрабатываемой воды, изменяя расход воздуха;

равномерность распределения пузырьков по площади камеры, что обеспечивается надежностью работы воздухораспределительной системы;

скорость подъема пузырьков на пути их движения в слое воды глубиной 2 - 4 м меняется незначительно;

всплывающие в воде пузырьки воздуха создают перемешивание впереди себя (вытесняя воду, до периферии) вследствие градиента скоростей и после себя вследствие возмущений и завихрений по следу; |

каждый пузырек в зоне своего движения создает локальную турбулентность, оптимума которой можно достичь, изменяя диаметр пузырьков и расстояния между ними по вертикали и горизонтали;

минимальные энергозатраты, практически одинаковые с затратами при механическом перемешивании.

*Аэрофлокулятор* (рис. 7.19,б) представляет собой прямоугольную в плане камеру, объем которой рассчитан на 6 - 12-минутное пребывание воды, с желобчатым днищем, встроенную в горизонтальный отстойник. В основании желобов днища уложены перфорированные распределительные трубы на расстоянии 20 - 30 см, над которыми перпендикулярно им располагают в виде решетки перфорированные или пористые водораспределительные трубы с шагом 1 - 1,5 м. Диаметр отверстий 1,5 - 2,5 мм, шаг 72 - 150 мм. Оптимальная высота слоя воды над барботажной системой составляет 2 - 4 м.

Для аэрофлокуляторов оптимальное значение градиента скорости находится в пределах  $25 - 45 \text{ с}^{-1}$ , а коэффициент объемного использования возрастает в 1,5 - 2,5 раза по сравнению с таковым для камер гидравлического типа. При применении аэрофлокуляторов для обработки МУТНЫХ вод производительность горизонтальных отстойников повышается в 1,5 - 2 раза.

## **Глава 23. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ВОДЫ**

### **23.1. ОБРАБОТКА ВОДЫ ФИЛЬТРОВАНИЕМ ЧЕРЕЗ СЕТКИ, ТКАНИ И ПОРИСТЫЕ ПЕРЕГОРОДКИ**

Улучшение качества поверхностных вод, как правило, нуждается в их предварительной водообработке с целью извлечения плавающих или грубодисперсных

примесей, планктона. С этой целью используют фильтрацию воды через сетки, ткани и пористые элементы. При подготовке охлаждающей воды этот метод водоподготовки может оказаться единственным и достаточным.

При прохождении воды через сетки, ткани, пористые материалы достигается извлечение из нее взвешенных веществ. Процесс осуществляется либо на поверхности, либо в глубине фильтрующего материала. Поверхностное фильтрация происходит при движении воды через объемные элементы из пористых материалов значительной толщины (патронные фильтры и фильтры из пористой керамики); сетчатые или тканевые перегородки (фильтрация под давлением или под вакуумом, микрофильтрация); жесткие проницаемые каркасы с предварительно нанесенным фильтрующим слоем (намывные фильтры). В зависимости от свойств фильтрующих основ и извлекаемых из воды примесей фильтрация состоит из следующих трех процессов: отложения, фиксации и отрыва. Механизм отложения бывает двух видов: механическое задержание извлекаемых примесей и отложение взвешенных частиц в порах. При механическом процеживании из воды извлекаются все примеси, превышающие размеры пор фильтрующей основы или пор, образуемых задержанными частицами, которые сами являются фильтрующим слоем. При этом чем меньше размеры пор фильтрующей основы, тем более высоким будет достигаемый эффект.

Выбор поверхностного или объемного фильтрации обусловлен качеством фильтрата, свойствами воды и ее загрязнений, а также экономическими соображениями. Тот или иной вид фильтрации сопряжен с определенными капитальными и эксплуатационными затратами, которые, в свою очередь, определяются предварительной обработкой воды, способами промывки аппаратов, степенью автоматизации процесса и способов контроля за ним.

Поверхностное фильтрация может осуществляться на тонких сетчатых перегородках, на объемных пористых элементах из твердых материалов или на жестких каркасах с предварительно нанесенным фильтрующим слоем. Фильтрация через сетчатые перегородки осуществляют на открытых или напорных фильтрах.

При этом различают три разновидности фильтрации: макрофильтрация, при котором из воды извлекают частицы крупностью более 150 мкм, микрофильтрация - частицы размером 1 - 150 мкм и ультрафильтрация - частицы размером 0,004 - 0,4 мкм.

### 23.1.1. Теоретические основы процесса. Макрофильтрация

Процесс поверхностного фильтрования подчиняется закону Дарси, согласно которому, потери напора  $P$  пропорциональны скорости фильтрования  $v$  с коэффициентом пропорциональности  $k$ , зависящим от динамической вязкости  $\eta$  и сопротивления среды  $R$ :

$$v = P/(\eta R) = kP. \quad (7.1)$$

В соответствии с законом Дарси сопротивление среды представляет собой сумму двух величин:  $R_{oc}$  - сопротивление осадка и  $R_{\phi}$  - начальное сопротивление фильтрующей основы:

$$R = R_{oc} + R_{\phi}. \quad (7.2)$$

Сопротивление осадка можно выразить как

$$R_{oc} = rM/A = rWV/A, \quad (7.3)$$

где  $r$  - удельное сопротивление осадка фильтрованию при давлении  $P$ ;  
 $M$  - общая масса отложившегося осадка;  
 $W$  - масса осадка на единицу объема фильтрата;  
 $V$  - объем фильтрата за время  $t$   
 $A$  - площадь поверхности фильтра.

Подставляя выражения (7.2) и (7.3) в выражение (7.1) и преобразуя его, получим

$$v = \frac{l}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{P}{\eta(rWV/A + R_{\phi})} \quad (7.4)$$

Интегрирование выражения (1.4) приводит к уравнению вида:

$$t = av + b. \quad (7.5)$$

Графически уравнение (7.5) выражается прямой линией, где  $a = (r\eta W)/(2PA^2)$  - тангенс угла наклона к оси абсцисс, а  $b = (\eta R_{\phi})/(PA)$  - отрезок, отсекаемый прямой на оси координат. Необходимо отметить, что подобное интегрирование корректно только для несжимаемых осадков, т.е. когда  $r$  остается постоянным. В действительности с ростом давления коэффициент фильтруемости или удельное сопротивление  $r$  увеличивается согласно выражению

$$r = r_0 = r'P^s$$

где  $r_0$  и  $r'$  - пределы удельного сопротивления при нулевом и атмосферном давлении;  
 $s$  - коэффициент сжимаемости

Фильтрация через пористую основу может отложениями задержанных примесей на ее поверхности или внутри ее. Тип фильтрования определяется критерием

$$\varepsilon = 18P/[d^2(s - e)R_{\phi}],$$

где  $P$  - потери напора в фильтрующей основе сопротивлением  $R_{\phi}$ ;

$d$  - средний диаметр задержанных частиц.

Если  $\varepsilon < 100$ , то фильтрование будет поверхностным (пленочным), если  $\varepsilon > 1000$ , то фильтрование объемное, а при  $\varepsilon = 100.. 1000$  - фильтрование смешанное и поверхностное и в объеме.

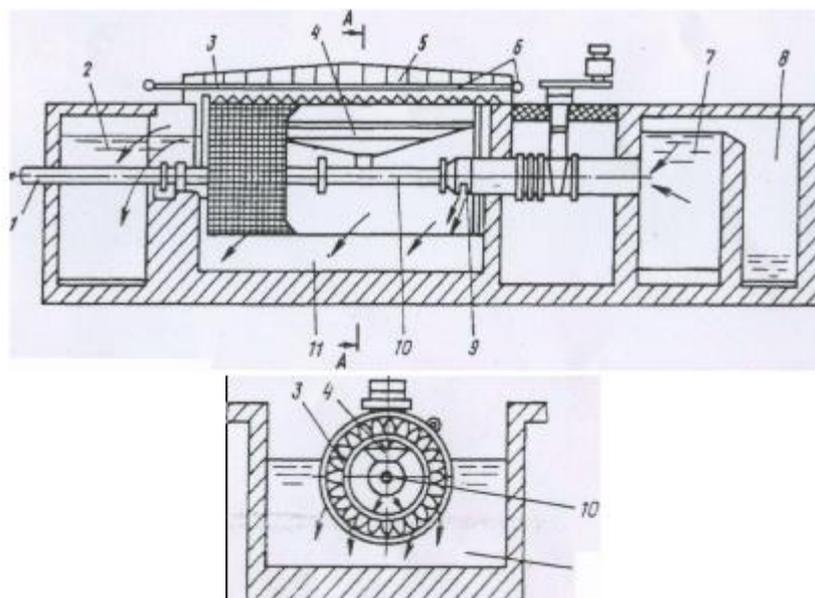
Отложение взвешенных веществ в порах фильтрующей основы происходит, если их размер меньше размера пор и траектория частиц приводит к их контакту с поверхностью поровых. Этому способствуют: диффузия за счет броуновского движения; прямое столкновение; инерция частиц; прилипание за счет ван - дер - ваальсовых сил; осаждение под действием водных сил; вращательное движение под действием гидравлических сил. Фиксирование частиц примесей воды на поверхности и в порах фильтрующего материала обусловлено малыми скоростями движения жидкости, силами когезии и адсорбции.

При извлечении из воды примесей фильтрованием происходит уменьшение порового пространства фильтрующего материала вследствие задержания частиц. Это влечет за собой увеличение скорости потока и изменение его режима от ламинарного к турбулентному. В этом случае задержанные частицы примесей будут отрываться и перемещаться потоком глубже в поры фильтрующего материала и даже выноситься с фильтратом.

При *макрофильтрации (макропроцеживании)* через металлические перфорированные пластины или металлическую (полимерную) проволочную сетку с размером отверстий более 0,3 мм (барабанные сетки) из воды извлекают грубодисперсные и плавающие примеси, насекомых, травы, водоросли, ветки и т.п., имеющие размеры от 0,2 мм до нескольких миллиметров. Макрофильтры осуществляют на вращающихся макроситах и ситах с закрепленным скребком, работающих с малыми потерями напора, и на неподвижных или вращающихся самоочищающихся ситах и механических фильтрах, работающих под давлением. Вращающиеся макросита, применяемые при обработке воды представляют собой или горизонтально располагаемые барабаны или вращающиеся сита из непрерывной сетки. Их подача колеблется от нескольких литров до кубических метров в секунду.

*Барабанные сита* (БС), устанавливаемые на водозаборе или площадке очистных сооружений до ввода в воду реагентов, используют для грубого осветления воды (рис. 7.20). Размер отверстий сетки из нержавеющей стали или полимеров 0,5x0,5 мм. Рабочая сетка размещается между поддерживающими сетками с размером отверстий 10x10 мм. Основные размеры БС приведены в табл. 7.6. Интенсивность фильтрования на БС принимают 25 - 62 л/с на 1 м<sup>2</sup> смоченной площади макросетки, так как барабан только на <sup>2</sup>/<sub>3</sub> диаметра погружен в воду. Расход воды на промывку барабанных сеток, подаваемой под давлением 0,2 МПа, составляют до 0,5 % обработанной воды, потери напора - около 0,1 м.

*Вращающее сито* представляет собой ряд чередующихся фильтровальных полотен, выполненных из плетеных бронзовых или стальных прутьев диаметром 0,25 - 1 мм, смонтированных на жестком каркасе с размером ячеек 0,3 - 3 мм. Сквозность сита 50 - 60 %. Скорость фильтрования по отношению к площади сита, погруженного в воду, соответствует 0,35 - 0,4 м/с.



**Рис. 7.20. Барабанное сито**

1 - сброс промывной воды; 2, 7 - каналы отвода фильтрованной и подачи исходной воды; 3 - барабан с фильтрующими элементами; 4 - лоток сбора промывной воды; 5 - ограждение из оргстекла; 6 - промывное устройство; 8 - канал отвода излишков воды; 9 - излив воды внутрь барабана; 10 - глухая часть соосно расположенного трубопровода, предназначенного для отвода промывной воды; 11 - камера барабанного сита (микрофильтра)

*Таблица 7.6*

Марка БС	Производительность, тыс.м <sup>3</sup> /сут	Размеры барабана, мм		Размеры камеры, мм			Число фильтрующих элементов	Мощность электродвигателя, кВт	Масса, кг
				длина	ширина	Расстояние от оси до дна			
		диаметр	длина						
МФ 1,5x1	4	1550	1230	2095	2660	1000	18	2,5	1240
МФ 1,5x2	8	1550	2305	3160	2660	1000	36	2,5	1700
МФ 1,5x3	12	1550	3370	4196	2660	1000	54	2,5	2050
МФ 3x1,5	15	3050	1714	2606	4060	1700	18	4,0	2160
МФ 3x3	30	3050	3370	4122	4060	1700	36	4,0	2570
МФ 3x4,5	45	3050	4744	5635	4060	1700	54	4,0	3937
БС 1,5x1	10	1550	1230	2095	2660	1000	18	1,7	1240
БС 1,5x2	20	1550	2300	3160	2660	1000	36	1,7	1700
БС 1,5x3	30	1550	3370	1196	2660	1000	54	1,7	2050
БС 3x1,5	35	3050	1714	2606	4060	1700	18	2,8	2100
БС 3x3	70	3050	3370	4122	4060	1700	36	2,8	2570
БС 3x4,5	105	3050	4744	5635	4060	1700	54	2,8	3970

Предпочтительно фильтровать обрабатываемую воду изнутри наружу, что облегчает промывку сетки и удаление задержанных примесей. Потери напора составляют 0,2 - 0,5 м вод.ст.

Для удаления из воды крупных плавающих примесей рекомендуются сита в виде неподвижной стальной пластины с отверстиями 2 - 5 мм. Задержанные взвешенные вещества удаляются скребком или щеткой, укрепленной на конце цепи (для прямого наклонного сита), или вращающимся устройством (для круглых сит) и направляются в сборник. Плоские сита целесообразно располагать в подводящих каналах шириной до 2,5 м; потери напора составляют до 0,5 м вод.ст.

*Неподвижные или вращающиеся самоочищающиеся сита* с размером отверстий 0,25 - 2 мм применяют для извлечения из воды относительно крупных взвешенных веществ. Неподвижные сита состоят из решетки, изготовленной из тонких прутьев, расположенных под переменным углом и смонтированных в жесткой раме. Прутья могут быть круглого, прямоугольного или треугольного сечений. Обрабатываемая вода подается в верхнюю часть сита, а осадок непрерывно удаляется с поверхности сита специальным скребковым устройством.

*Вращающиеся сита* состоят из цилиндрической решетки с горизонтальной осью вращения. Решетка образуется стальными прутьями трапецеидального профиля. Сито вращается с линейной скоростью 0,1 - 0,3 м/с. Извлеченные взвешенные вещества остаются на решетке и снимаются с нее неподвижным скребком. Вращающиеся и неподвижные сита рассчитаны на подачу воды до 1 тыс.м<sup>3</sup>/ч; допустимые потери напора составляют 2 м вод.ст.

Для осветления воды применяют *механические напорные фильтры*: циклонные, вращающиеся со съемными фильтровальными элементами из фарфора или стали (размер отверстий 0,1 - 1,6 мм) и автоматические фильтры с множеством фильтровальных трубок с отверстиями 125 мкм и более и вращающимся промывным устройством.

### 23.1.2. Микрофильтрация

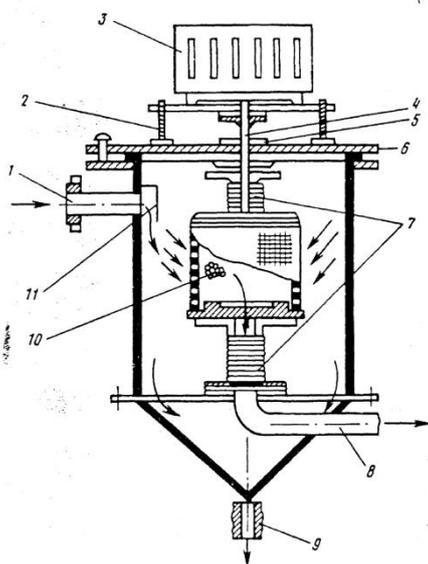
Микрофильтрация в отличие от макрофильтрации осуществляют процеживанием воды через ткани или сетки с небольшими размерами проходных отверстий. Основная цель микрофильтрации - удаление планктона, содержащегося в поверхностных водах и их грубое осветление. Эффективность работы микрофильтра ограничена несколькими факторами: промытая фильтровальная сетка (металлическая, пластмассовая) не обеспечивает надлежащего задержания в начале фильтроцикла и степень очистки при этом определяется только размерами ее ячеек; планктон никогда не удаляется полностью. Он может вновь размножиться, особенно если повысится температура воды; яйца некоторых низших ракообразных могут легко проходить через фильтровальную сетку и развиваться, в результате чего в последующих емкостях могут быть обнаружены видимые невооруженным глазом организмы; из-за опасности коррозии фильтровальной сетки или ее подложки нельзя применять предварительное хлорирование или озонирование воды перед микрофильтрами; поверхность фильтрации должна быть достаточно велика, чтобы обеспечить извлечение большого количества планктона, развивающегося в летнее время. Если она мала, то в периоды интенсивного развития планктона и во время паводков пропускная способность водоочистного комплекса может значительно снизиться.

Эффективность снижения содержания взвешенных веществ в результате микрофильтрации составляет 50 - 80 %, в среднем - около 65 %. Для сравнения отметим, что хорошо работающий отстойник обеспечивает снижение содержания взвешенных веществ на 40 - 50 % без предварительного коагулирования и на 75 - 90 % с предварительным коагулированием.

*Микрофильтры (МФ)* конструктивно не отличаются от барабанных сит (см. рис. 7.20), за исключением размеров сетки (ячейки 20 - 60 мкм), натянутой по образующей барабана. Скорость вращения барабана МФ принимается 0,05 - 0,3 м/с. Барабаны МФ погружены в воду на  $\frac{2}{3}$  диаметра в камеру, которая предназначена для сбора фильтрата. Интенсивность фильтрования назначается в пределах 10 - 25 л/(см<sup>2</sup>) полезной площади микросетки, погруженной в воду (см. табл. 7.6). Потери напора на микросетке составляют до 0,2 м, а общие потерн напора на установке достигают 0,5 м. Расход воды на промывку микрофильтров составляет до 1,5 % количества профильтрованной воды. Вода для промывки сетки подается под давлением 0,15 - 0,2 МПа.

Исследования В.Ф.Соколова и Я.Я.Кару показали, что микрофильтры задерживают до 75 % диатомовы и до 95 % сине - зеленых водорослей, а также до 100 % зоопланктона. Микрофильтры целесообразно использовать при содержании фитопланктона более 1000 клеток в 1 см<sup>3</sup> исходной воды.

В последние годы в отечественной практике для осветления мутных вод применяют *акустические фильтры (АФ)*. Они рекомендуются для водоочистных установок пропускной способностью до 5000 м<sup>3</sup>/сут (рис. 7.21).



**Рис. 7.21. Акустический фильтр**

1,8 - подача исходной и отвод осветленной воды; 2 - амортизатор; 3 - электромагнитный вибратор; 4 - шток; 5 - регулирующая шайба; 6 - плита; 7 - сильфонные уплотнения; 9 - сброс осадка; 10 - фильтрующий элемент; 11 - гаситель

Акустический фильтр состоит из круглого металлического корпуса с коническим дном, внутри которого по центру расположен фильтрующий элемент в виде металлического перфорированного стакана ( $h = 0,3..0,6$  м,  $d = 0,25..0,5$  м) скважностью 65 % с круглыми отверстиями 4 - 5 мм, обернутый микросеткой с размером ячеек 100 - 125 мкм. Скорость фильтрования воды через сетку, на которой задерживаются примеси размером более 20 - 25 мкм. составляет 108 - 360 м/ч. Нижняя часть днаща АФ снабжена съемной оперированной насадкой, рассчитываемой на 5 - 8 % производительности аппарата, предназначенного для удаления осадка. Технические характеристики акустических фильтров приведены ниже.

Общая высота фильтра м	1,2 - 1,4
Диаметр корпуса, м	0,4 - 0,6
Площадь фильтрования, м <sup>2</sup>	До 1,0
Фильтрующие сетки,	100; 125
Электромагнитный вибратор (С - 918, 921):	
Напряжение В	220
Сила тока А	до 1,0
Частота колебаний, Гц	50
Амплитуда колебаний, мм	до 2,0

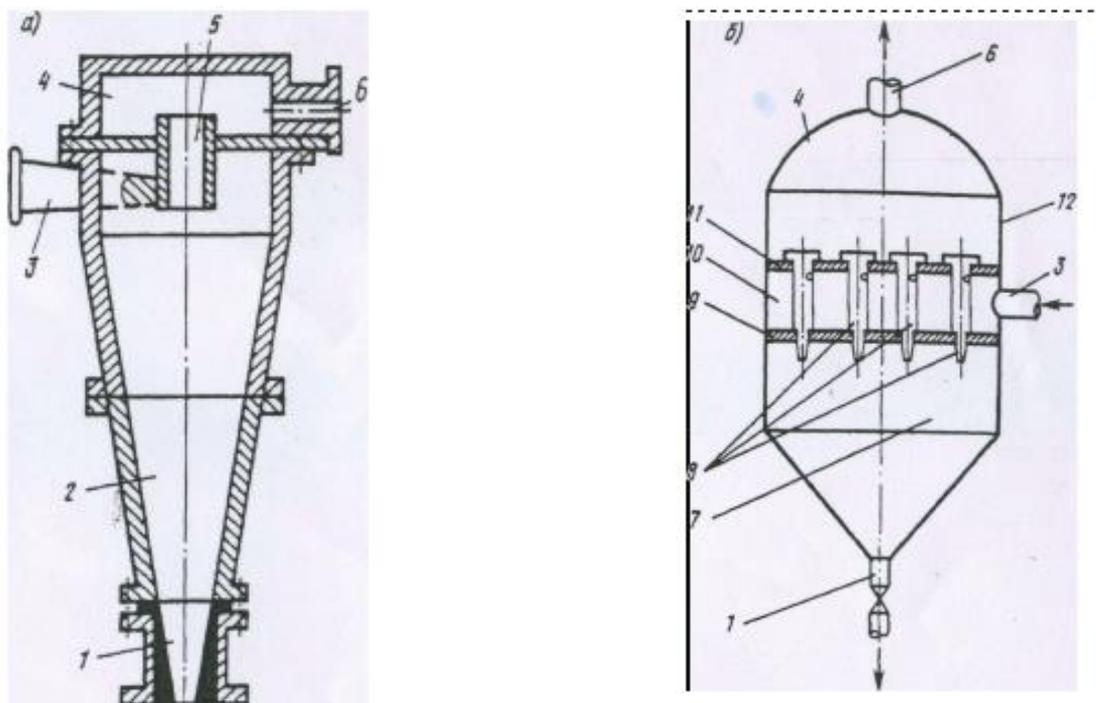
Пропускная способность фильтра, м <sup>3</sup> /ч	до 100
Давление перед фильтром, МПа	до 0,1
Допустимые потери напора, м	0,5

При работе АФ вибратор создает возвратно - поступательное движение фильтрующего элемента, изменяя параметры проходных отверстий и обеспечивая задержание более мелких примесей воды, чем размеры ячеек микросетки, которые не осаждаются на ней, не забивают ее, а оседают под действием силы тяжести. Из конусной части фильтра осадок под избыточным давлением отводится в сток. Исходная вода, пройдя через фильтрующий элемент, передается на последующие водоочистные сооружения.

Микрофильтрация под давлением осуществляют на фильтрах трех видов: дисковых, каркасно - навитых и патронных для получения ультрачистой воды.

## 23.2. ОСВЕТЛЕНИЕ ВОДЫ В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ. АППАРАТНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА

В практике водоподготовки для осветления поверхностных мутных вод, содержащих грубодисперсные примеси, находят применение гидроциклоны (рис. 7.22,а).



**Рис. 7.22. Гидроциклон (а) и мультициклон (б)**

1 - сменная насадка - сгуститель; 2 - разъемная конусная часть; 3, 6 - входной и выходной патрубки; 4 - камера сбора осветленной воды; 5 - сливной патрубков с диафрагмой; 7 - шламовая камера; 8 - гидроциклоны диаметром 15 мм; 9, 11 - нижняя и верхняя разделительные плиты; 10 - распределительная камера; 12 - цилиндрический корпус аппарата

Они просты по конструкции и в эксплуатации, дешевы в изготовлении, компактны, эффективны, обладают большой производительностью, надежны. Их действие основано на использовании поля центробежных сил, где выделение механических примесей из воды происходит под действием этих сил, превосходящих в сотни и тысячи раз силы тяжести, за счет чего увеличивается скорость отделения частиц. При этом значительно сокращается продолжительность процесса осветления воды и уменьшается объем центробежного аппарата по сравнению с объемом отстойника. Режим движения жидкости в поле центробежных сил - турбулентный. Передача вращения от периферии внутрь происходит диффузией и конвекцией под действием вращательного момента сил вязкости и перемещения самой завихренной жидкости. В поле центробежных сил возникают два основных круговых потока: внешний, направленный к вершине образующегося конуса, и внутренний, направленный в противоположную сторону. При вращении внешнего потока часть жидкости удаляется через нижнее отверстие, а другая часть отделяется и, двигаясь радиально, вливается во внутренний поток, к нему добавляется основное количество жидкости у вершины конуса, которое, изменяя направление, отводится через верхнее отводное отверстие в диафрагме аппарата. В гидроциклоне, кроме внешнего и внутреннего вращающихся потоков жидкости, образуется третий - воздушный поток (воздушный столб) по оси аппарата. Потоки жидкости направлены по логарифмической

спирали. Внешний поток ограничен стенкой аппарата и поверхностью внутреннего потока, который, в свою очередь, ограничен с внутренней стороны воздушным столбом.

Осветление воды в поле центробежных сил основано на переносе взвешенных частиц к периферии центробежной силой, равной разности значений центробежной силы для твердой и жидкой фаз. Эта сила  $P$ , возникающая при тангенциальном впуске воды в аппарат под некоторым давлением, равна

$$P = \pi d^3 v^3 (\rho_m - \rho_{жс}) / 6r,$$

где  $d$  - эквивалентный диаметр взвешенных частиц, см;  
 $\rho_t$  и  $\rho_{ж}$  - плотность твердой и жидкой фазы в осветляемой воде, г/см<sup>3</sup>;  
 $v$  - скорость движения воды на входе в аппарат, см/с;  
 $r$  - расстояние от центра аппарата до оси тангенциального питающего патрубка, см.

При больших значениях  $V$  и малых  $r$  сила, действующая на взвешенную частицу во вращающемся потоке жидкости, будет во много раз больше силы тяжести и скорость движения взвешенных частиц будет значительно больше скорости свободного их осаждения. В результате в поле центробежных сил выделение взвешенных частиц из воды происходит значительно быстрее, чем в отстойниках. Выполненные И.В.Скирдовым, А.М.Фоминых,

В.В.Найденко и В.Г.Пономаревым показали эффективность осветления воды в проточных центрифугах и гидроциклонах. Однако высокая стоимость проточных центрифуг и сложность эксплуатации делают их неконкурентноспособными по сравнению с гидроциклонами. Вместе с тем результаты исследований Г.А.Ильцова показали целесообразность и эффективность применения центрифуг с подложкой для извлечения из воды планктона и диспергированных примесей.

Гидроциклоны могут быть напорными и открытыми (одно - и многоярусными). Чем меньше диаметр гидроциклона, тем больше развивающиеся в нем центробежные силы и тем меньше размер отделяемых в аппарате частиц. Максимальная эффективность разделения достигается в гидроциклоне вытянутой формы с возможно малым углом конусности. В табл. 7.7 приведены технические данные различных гидроциклонов.

Технологические параметры	Значения технологических параметров гидроциклонов*											
	ГН-25	ГН-40	ГН-60	ГН-80	ГНС-100	ГНС-125	ГНС-160	ГНС-200	ГНС-250	ГНС-320	ГНС-400	ГНС-500
Внутренний диаметр $D$ , мм, цилиндрической части	25	40	60	80	100	125	160	200	250	320	400	500
Диаметр патрубка питающего $d_{пт}$ , мм	4, 6, 8	6, 8, 12	8, 12, 16	10, 12, 16, 20	12, 16, 20, 25	16, 25, 32, 40	20, 25, 32, 40, 50	25, 32, 40, 50, 60	32, 40, 50, 60, 80	40, 50, 60, 80, 100	50, 60, 80, 100, 125	60, 80, 100, 125, 160
Диаметр сливного патрубка $d_{сл}$ , мм	5, 8, 12	8, 12, 16	12, 16, 20	16, 20, 25	20, 32, 40	25, 32, 40, 50	32, 40, 50, 60	40, 50, 60, 80	50, 60, 80, 100	60, 80, 100, 125	80, 100, 125, 160	100, 125, 160, 200
Диаметр шламового патрубка $d_{шп}$ , мм	3, 4, 5	4, 5, 6	5, 6, 8	6, 8, 10, 12	8, 10, 12, 16	8, 10, 12, 16	10, 12, 16, 20, 25	12, 16, 20, 25	16, 20, 25, 32, 40	16, 20, 40, 50	20, 25, 32, 40, 50	25, 32, 40, 50, 60
Угол конической части $\alpha$ , град	5, 10, 15	5, 10, 15	5, 10, 15, 20	5, 10, 15, 20	10, 15, 20	10, 15, 20	10, 15, 20	10, 15, 20	10, 15, 20, 30	10, 15, 20, 30	15, 20, 30, 45	15, 20, 30, 45
Высота цилиндрической части $H_{ц}$ , мм	25, 50, 75	40, 80, 120	60, 120, 180	80, 160, 240	100, 200, 300, 400	125, 250, 375	160, 320, 480	200, 400, 600	250, 500, 750	320, 500, 750	400, 500, 800	500, 750, 1000
Глубина погружения сливного патрубка $H_{сл}$ , мм	100, 10,16, 25	160,16, 25	240, 25, 32, 40	320, 32,40, 64	40,64, 80	50,64, 80,100	64,80, 100,125	80,100, 120,160	100,120, 160,200	120,160, 200,250	160,200, 250,300	200,250, 300,400
Объемная производительность $Q_{шт}$ при $P_{шт} = 0,1$ МПа, м <sup>3</sup> /ч	0,3-1,1	0,6 - 2,2	1,1 - 3,7	1,8 - 6,4	2,7 - 10,5	4,4 - 21,1	6,7 - 31,8	10,2 - 47,4	16,3 - 78,7	24,05 - 117,3	37,67 - 180,3	54,6 - 282,0
Граничная крупность разделения $\delta$ , мкм	2,3-64	2,3 - 84,9	3,4- 92,9	4,3-103	6,1-150	6,6-311	89-330,8	10,5-342	12,5- 413,3	15,3 - 685,5	17,5-745	20,5-884

\*ГН - гидроциклон напорный с монолитными элементами; ГНС - то же, со сборными элементами рабочей камеры

По конструктивным особенностям гидроциклоны подразделяют на: конические, цилиндрические, винтовые, трубоциклоны, трехпродуктовые и батарейные (мультициклоны). В технологии водоподготовки получили распространение конические двухпродуктовые гидроциклоны. Напорные гидроциклоны бывают обычными и мультициклонами (см. рис. 7.22,6). Изготавливают напорные гидроциклоны двух видов: литые нефутерованные диаметром 75 - 500мм (см. табл. 7.7) и футерованные каменным литьем или шлакоситаллом диаметром 150 - 2000 мм. Угол конусности гидроциклонов составляет 20°. В них обеспечивается извлечение из воды минеральных примесей размером более 0,1 - 0,15 мм плотностью не менее 1,2 г/см<sup>3</sup>.

Обрабатываемая вода поступает в верхнюю часть гидроциклона тангенциально и, вращаясь, движется к основному патрубку, расположенному в центре по оси аппарата. Центробежной силой дисперсированные примеси воды перемещаются к стенкам гидроциклона и по ним опускаются вниз, в конус, через насадку в нижней части которого они непрерывно удаляются в сток;. Движение твердых частиц к стенкам аппарата происходит со скоростью, равной разности между значением скорости, возникающей в результате действия центробежных сил, и радиальной скорости движения, направленной к центру.

Подачу гидроциклона по осветленной воде находят по формуле

$$q = 864 \frac{\alpha a \bar{d}}{d_n} (2g\Delta H)^{0,5},$$

- где  $\alpha$  - коэффициент, учитывающий потерю части воды с осадком, равный 0,85 - 0,9 (больше значение для меньшего диаметра насадки);  
 $a$  - площадь живого сечения питающего отверстия, м<sup>2</sup>;  
 $d$  - диаметр сливного патрубка, см; с  
 $d_n$  - эквивалентный диаметр питающего отверстия (диаметр круга, равновеликого площади питающего отверстия), см;  
 $g$  - ускорение свободного падения;  
 $\Delta H$  - потеря напора в гидроциклоне, м.

На производительность гидроциклонов влияют следующие факторы: диаметр аппарата, перепад давлений на входном (питающем) и сливном патрубках; размеры питающего, сливного и разгрузочного отверстий; угол наклона образующей конической части аппарата; плотность отделяемых примесей воды. Потери напора в гидроциклоне зависят от его конструкции и расхода. С возрастанием расхода в нем увеличивается скорость движения воды, адекватно этому возрастает и эффект осветления воды, одновременно растут и потери напора в аппарате.

Для задержания тонкодисперсных взвешенных веществ используют гидроциклоны Малого диаметра, устанавливая их параллельно в большом количестве. Такой аппарат называют мультициклоном (см. рис. 7.22,6). Пластмассовые мультициклоны диаметром 10; 15 и 20 мм способны задерживать взвешенные частицы гидравлической крупностью до 0,17 мм/с при потере давления около 0,1 МПа.

Подача одного гидроциклона диаметром 15 мм при такой потере давления составляет около 0,07 м<sup>3</sup>/ч.

Гидроциклоны надлежит использовать в системах хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения для предварительного осветления высокомутных поверхностных вод (более 1500 мг/л). Для осветления воды следует применять гидроциклоны литые нефутерованные, как наиболее дешевые и достаточно стойкие

против истирания. Во ВНИИ ВОДГЕО созданы открытые многоярусные гидроциклоны, которые применяют для частичного осветления воды перед поступлением ее на основные очистные сооружения.

Применение гидроциклонов позволяет сократить затраты на строительство вследствие их неизбежной стоимости и эксплуатацию сооружений для осветления воды.

Недостатками гидроциклонов являются: быстрый износ, особенно при обработке вод, содержащих крупные минеральные примеси; колебания эффекта осветления в зависимости от состава и содержания взвешенных веществ в исходной воде; не всегда наиболее полное выделение частиц заданного размера, поскольку гидроциклон действует как пропорциональный разделитель.

### 23.3. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ ВОДЫ ОСАЖДЕНИЕМ

Сущность процесса заключается в выделении из воды взвешенных в ней примесей под действием силы тяжести. При уменьшении скорости движения обрабатываемой воды и ее турбулизации снижается транспортирующая способность потока и взвешенные в ней частицы, имеющие большую плотность, чем вода, декантируют. Для осветления воды осаждением используют осадочные бассейны - отстойники. Они являются проточными, так как осаждение взвеси в них происходит при непрерывном движении воды от входа к выходу. Поэтому скорости движения воды в отстойниках должны быть малы; они измеряются десятками долями миллиметра в секунду (мм/с) в вертикальных отстойниках и несколькими мм/с - в горизонтальных, тонкослойных и радиальных. При таких малых скоростях поток почти полностью теряет свою транспортирующую способность, обусловленную интенсивным турбулентным перемешиванием. Осаждение взвеси в потоке, движущемся с весьма малой скоростью, почти полностью лишеном транспортирующей способности, подчиняется, по В.Т.Турчиновичу (с известным приближением) законам осаждения в покоящемся объеме жидкости. Эти законы хорошо изучены применительно к явлению осаждения зернистой агрегативно устойчивой взвеси, частицы которой в процессе осаждения не слипаются одна с другой, не изменяют своих форм и размеров. Осаждение неустойчивой (скоагулированной) взвеси, способной агломерироваться и слипаться в процессе осаждения, изучено в меньшей степени.

Оба явления имеют практическое значение для отстойников, используемых в технологии очистки воды: первое - для отстойников, применяемых при осветлении мутных вод в качестве первой ступени процесса очистки воды, или для грубого осветления воды при водоснабжении промышленных предприятий; второе - для отстойников, в которых происходит осаждение коагулированной взвеси.

#### 23.3.1. Теоретические основы осаждения взвеси

Осаждение зернистой взвеси подчиняется более простым закономерностям, чем неустойчивой взвеси, но эти же закономерности с некоторыми допущениями используют для расчета седиментации и неустойчивой взвеси. Поэтому прежде рассмотрим осаждение зернистой взвеси, которое описывается линейным законом Стокса:

$$F_3 = 3 \pi \eta u d,$$

где  $F_3$  - сила сопротивления;  
 $\eta$  - вязкость жидкости;  
 $u$  - скорость осаждения частицы;  
 $d$  - диаметр частицы.

Этот закон определяет силу сопротивления, которую испытывает частица при своем падении в жидкости; сила сопротивления изменяется пропорционально скорости, т.е. по линейному закону. Закон Стокса справедлив для частиц очень малого размера, осаждающихся с малой скоростью (ламинарный режим), когда на сопротивление движению оказывают влияние только силы вязкости. С возрастанием размера и скорости осаждения частиц линейный закон нарушается. Это обусловлено возникновением турбулентности при обтекании движущейся частицы жидкостью, когда, помимо вязкости, на движение частицы начинают влиять инерционные силы.

В общем виде закон сопротивления при падении частицы в жидкости может быть представлен в форме, предложенной Ньютоном - Рэлеем:

$$F_3 = \psi_3 \rho_l u^2 d^2$$

где  $\psi_3$  - коэффициент сопротивления;  
 $\rho_l$  - плотность жидкости;  
 $d$  - диаметр частицы, определенный как диаметр равновеликого по объему шара.

Коэффициент сопротивления  $\psi_3$  зависит от числа Рейнольдса

$$Re_3 = P \rho_l u d / \eta. \quad (7.7)$$

При рассмотрении осаждения частиц в жидкости исходим из допущения равномерности их движения, что подтверждается экспериментально. Следовательно, силы, действующие на частицу, уравновешены. Этими силами являются сила тяжести, равная массе частицы в жидкости, и сила сопротивления. В самом начале - движение ускоренное, а с увеличением скорости падения растет сила сопротивления и очень скоро наступает момент, когда силы, действующие на частицу, уравновешиваются, и дальнейшее движение частицы происходит уже с установившейся постоянной скоростью. Сила тяжести  $G$  или масса частицы в жидкости  $m$  равна

$$G = (\pi d^3 / 6)(\rho_2 - \rho_1)g \quad (7.8)$$

где  $\rho_2$  - плотность частицы;  
 $g$  - ускорение свободного падения.

Приравняв силу сопротивления по формуле (7.7) к силе тяжести по формуле (7.8), получаем

$$(\pi d^3 / 6)(\rho_2 - \rho_1) = \psi_3 \rho_l u^2 d^2 \quad (7.9)$$

Откуда

$$\psi_3 = \pi d g (\rho_2 - \rho_1) / 6 u^2 \rho_l \quad (7.10)$$

По формуле (7.10) вычисляют коэффициент сопротивления при осаждении частиц. По Стоксу для малых частиц и малых скоростей для  $Re \leq 1$ ,  $\psi_3 = 3\pi / Re_3$ . Для этих условий из уравнения (7.10) находим скорость осаждения частиц.

Коэффициент сопротивления определяют по экспериментальным графикам  $\psi_3 = f(Re_3)$ .

В области действия линейного закона сопротивления после подстановки значения  $u_3 = 3\pi / (Re_3)$  в формулу (7.10) и преобразований получим

$$u = d^2 g (\rho_2 - \rho_1) / 18 \eta \quad (7.12)$$

Формулу (7.12) называют формулой Стокса. Она применима для определения скорости осаждения частиц малого размера при значении числа  $Re \ll 1$ .

Для зерен песка с  $\rho_2 = 2.6$  при температуре воды  $t = 10^\circ\text{C}$  ( $\eta = 0,0131$ ) критическое значение числа Рейнольдса соответствует размеру частицы  $d = 0,12$  мм и скорости осаждения  $u = 1,1$  см/с

Для рыхлых хлопьев, имеющих весьма малую плотность ( $\rho_2 = 1,002$ ) при той же температуре воды, критическое значение числа Рейнольдса соответствует размеру частицы  $d = 1,2$  мм и скорости осаждения  $u = 0,11$  см/с. Скорость осаждения более крупных и плотных частиц ( $Re_3 > 1$ ) следует вычислять по общей формуле (7.11), справедливой при любых значениях  $Re_3$ . Вычисления по этой формуле затруднены тем, что для определения коэффициента сопротивления с помощью экспериментальных графиков необходимо знать число  $Re_3$ , которое само зависит от скорости осаждения. Это затруднение можно избежать, введя в рассмотрение безразмерное число

$$K = Re_3 \psi_3^{1/2} \quad (7.13)$$

Подставляя в формулу (7.13) значения  $\psi_3$  и  $Re_3$  по формулам (7.6) и (7.7), получаем

$$K = (\rho_1 F_3 / \eta^2)^{1/2}$$

Из уравнения (7.14) видно, что  $K$  не зависит от скорости движения частицы, а только от силы сопротивления  $F_3$  и свойств жидкости - плотности  $\rho_1$  и вязкости  $\eta$ .

При осаждении  $F_3 = G$ , Учитывая значение  $G$ , по формуле (7.8) получаем

$$K = \left[ \frac{\pi d^3}{6} g \frac{\rho_1 (\rho_2 - \rho_1)}{\eta^2} \right]^{0,5} \quad (7.15)$$

Определив по формуле (7.15) значение числа  $K$  для частиц любого размера, можно найти гидродинамические характеристики падающей частицы  $\psi_3$  и  $Re_3$  используя их, вычислить скорость осаждения, которую при температуре воды  $10^\circ\text{C}$  называют гидравлической крупностью частицы. Этот параметр используют для расчета отстойников, так как в этом случае важно знать скорость осаждения частиц, а не их размеры. Гидравлическую крупность частиц взвеси находят экспериментально (например, по методу Н.А.Фигуровского или Г.Робинсона), определяя относительное количество взвеси, выпавшей за определенный промежуток времени на дно цилиндра, заполненного испытуемой водой на высоту  $h$ .

Когда взвесь монодисперсна, т.е. состоит из частиц примерно одинаковой гидравлической крупности  $u$ , количество осадка, выпавшего за время  $t$ , составит

$$m = uCA t,$$

где  $C$  - концентрация взвеси в исследуемой воде;  
 $A$  - площадь цилиндра.

Массовое содержание взвеси в исследуемой воде до начала осаждения

$$m_a = CA h.$$

Относительное количество выпавшей взвеси, или эффект осаждения, найдем из выражения

$$p = m/m_0 = ut/h$$

откуда гидравлическая крупность будет

$$u = ph/t. \quad (7.16)$$

Из формулы (7.16) следует, что относительное количество выпавшей взвеси  $p$  возрастает прямо пропорционально продолжительности осаждения: чем круче направлена прямая, тем больше гидравлическая крупность частиц взвеси и скорость осаждения. График функции  $p = f(t)$  называется кривой выпадения взвеси. В частном случае осаждения монодисперсна взвеси, который рассмотрен на рис. 7.23,а, эта кривая превращается в прямую линию. Природная взвесь водоемов так же, как и с коагулированная взвесь, состоит из частиц различного размера. Их гидравлическая крупность изменяется в широких пределах. Такая взвесь называется полидисперсной. Представление об осаждении полидисперсной взвеси дают кривые седиментации, приведенные на рис. 7.23,б и 7.24, полученные экспериментально. Экспериментальная кривая седиментации взвеси позволяет определить процентное содержание различных се фракций, т.е. фракций с различной гидравлической крупностью.

Каждая кривая (рис. 7.24,а) получена при разных значениях высоты столба воды; кривые отличаются друг от друга только формой. Одинаковый эффект осаждения достигается при различной продолжительности отстаивания, по вес кривые подобны между собой. Если изменить масштаб оси абсцисс (масштаб времени) и отложить по этой оси вместо значений времени значения  $l/ii$ , то вес кривые совместятся в одну (рис. 7.24,б). Это даст весьма простое правило пересчета времени, необходимого для получения заданного эффекта осаждения по результатам технологического моделирования.

Получив в лаборатории кривую выпадения взвеси в процессе исследования исходной воды при высоте столба воды  $h$ , находим требуемый эффект осаждения  $p$ . Он может быть рассчитан по концентрации взвеси в исходной воде  $C_0$ , и концентрации взвеси в осветленной воде  $C$ . согласно СНиП и принимаемой равной 8 - 15 мг/л

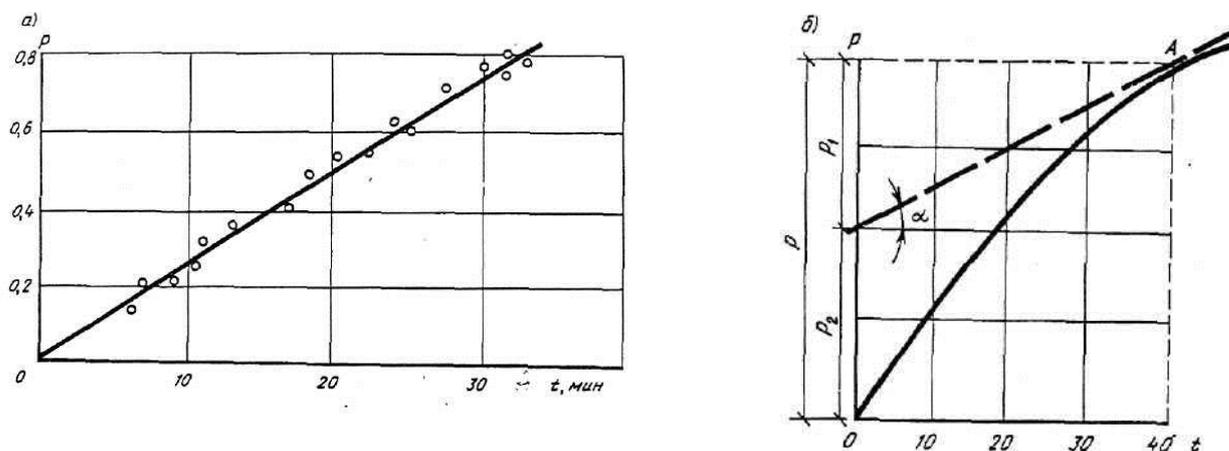


Рис. 7.23. Кривая седиментации моно-(а) и полидисперсной (б) взвеси

$$P = (C_0 - C)/C_0$$

По значению  $p$ , пользуясь кривой выпадения взвеси, находим продолжительность осаждения  $t_1$ , а затем расчетную продолжительность пребывания воды в отстойнике  $t_p$  из соотношения

$$t_p/t_1 = h_p/h_1$$

Из условия подобия  $t_p/h_p = t_1/h_1 = \text{const}$  при  $p = \text{const}$ , здесь  $h_p$  и  $t_p$  - соответственно расчетная высота зоны осаждения и продолжительность пребывания воды в проектируемом отстойнике, Формула (7.17) показывает, что при осаждении устойчивой взвеси продолжительность пребывания воды в отстойнике во столько раз больше продолжительности осаждения в цилиндре, во сколько раз высота зоны осаждения больше высоты слоя воды в цилиндре.

А.А.Кастальский, анализируя кривые выпадения взвеси, полученные для разных вод при коагулировании без него, нашел, что если по оси абсцисс вместо времени  $t$  откладывать значения фиктивной «процентной» скорости  $u = h/t$ , то кривые в диапазоне значений  $h/t$  от 0,2 до 1,2 мм/с могут быть без существенной погрешности спрямлены. Такое спрямление упрощает методику технологического моделирования. Вместо построения полной кривой выпадения взвеси по шести - восьми опытным точкам для построения прямой достаточно только двух точек, а именно: точки  $A = p_A$  при значении  $u_e = 1,2$  мм/с и точки  $B = p_B$  при значении  $u = 0,2$  мм/с. Составив уравнение прямой по двум точкам  $A$  и  $B$ , легко найти расчетное значение  $u_p$ , отвечающее заданному эффекту осаждения:

$$u_p = (1,2B - 0,2A - p) / (B - A).$$

Найденное значение  $u_p$  может быть использовано для расчета отстойников с горизонтальным движением воды, если соблюдается основное условие подобия (7.17):  $u = h_1/t_1 = h_p/t_p$ , где как и прежде, индекс «р» относится к рассчитываемому отстойнику, а индекс «1» - к лабораторному опыту.

При осаждении неустойчивой коагулирующей взвеси для расчета отстойников следует использовать выражение

$$t_p/t_1 = (h_p/h_1)^n,$$

где  $n = 0,2..0,5$  - эмпирическая величина.

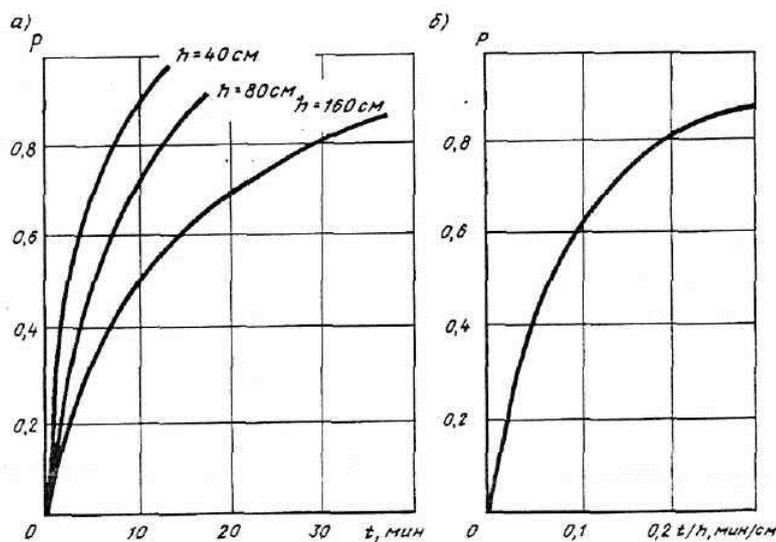
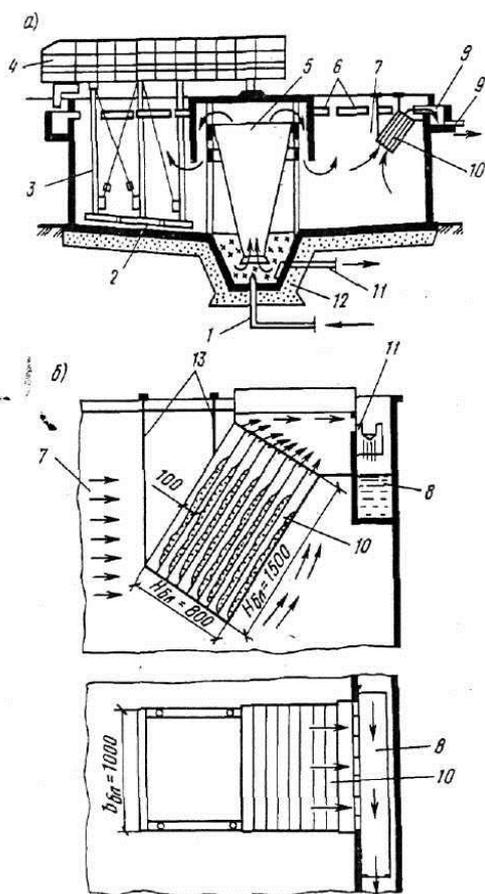


Рис. 7.24. Подобные кривые выпадения наноси (а) и совмещенная кривая осаждения (б)

### 23.3.2. Типы отстойников и область их применения

По направлению движения воды отстойники классифицируют на три основных типа: вертикальные (см. рис. 7.15), горизонтальные (см. рис. 7.16) и радиальные (рис. 7.25).



**Рис. 7.25 Радиальный отстойник с рециркулирующей осадка (а) и тонкослойными модулями (б)**

1, 9 - подача исходной и отвод осветленной воды; 2 - скребки; 3 - вращающаяся ферма; 4 - служебный мостик; 5 - рециркулятор осадка; 6 - водоотводные окна; 7 - зона осветления воды; 8 - кольцевой водосборный лоток; 10 - тонкослойные блоки; II - удаление осадка; 12 - осадкосборник; 13 - крепление блоков

*Горизонтальный отстойник* - прямоугольный, вытянутый в направлении движения воды резервуар, в котором осветляемая вода вдоль отстойника движется в направлении, близком к горизонтальному. Различают одно - и двухэтажные горизонтальные отстойники. Отстойники, используемые для предварительного осветления воды, могут быть устроены в земле с креплением или без крепления откосов. Горизонтальные отстойники в отечественной практике рекомендуется применять при мутности до 1500 мг/л и цветности до 120 град обрабатываемой воды и при пропускной способности водоочистного комплекса свыше 30 тыс.м<sup>3</sup>/сут.

*Вертикальный отстойник* - круглый в плане и в очень редких случаях квадратный резервуар значительной глубины, в котором обрабатываемая вода движется снизу вверх. В отечественной практике вертикальные отстойники рекомендуется использовать при мутности 1500 мг/л и цветности до 120 град обрабатываемой воды и при подаче водоочистного комплекса до 5000 тыс.м<sup>3</sup>/сут.

*Радиальный отстойник* - круглый в плане железобетонный резервуар, высота которого невелика по сравнению с его диаметром. Вода в отстойнике движется от центра к периферии в радиальном направлении, близком к горизонтальному. СНиП рекомендует использовать радиальные отстойники при обработке высокомутных вод и в системах оборотного водоснабжения.

*Отстойники с малой глубиной осаждения* (рис. 7.26). Среди методов интенсификации процесса осаждения примесей воды одним из наиболее перспективных является отстаивание в тонком слое. Сущность его заключается в ламинаризации потока

поды ( $Re = 60..80$ ), при которой исключается влияние взвешивающей составляющей. Созданы различные конструкции тонкослойных отстойников с использованием пластмасс, стеклопластиков и других материалов, обеспечивающих легкое сползание и удаление осадка с поверхности.

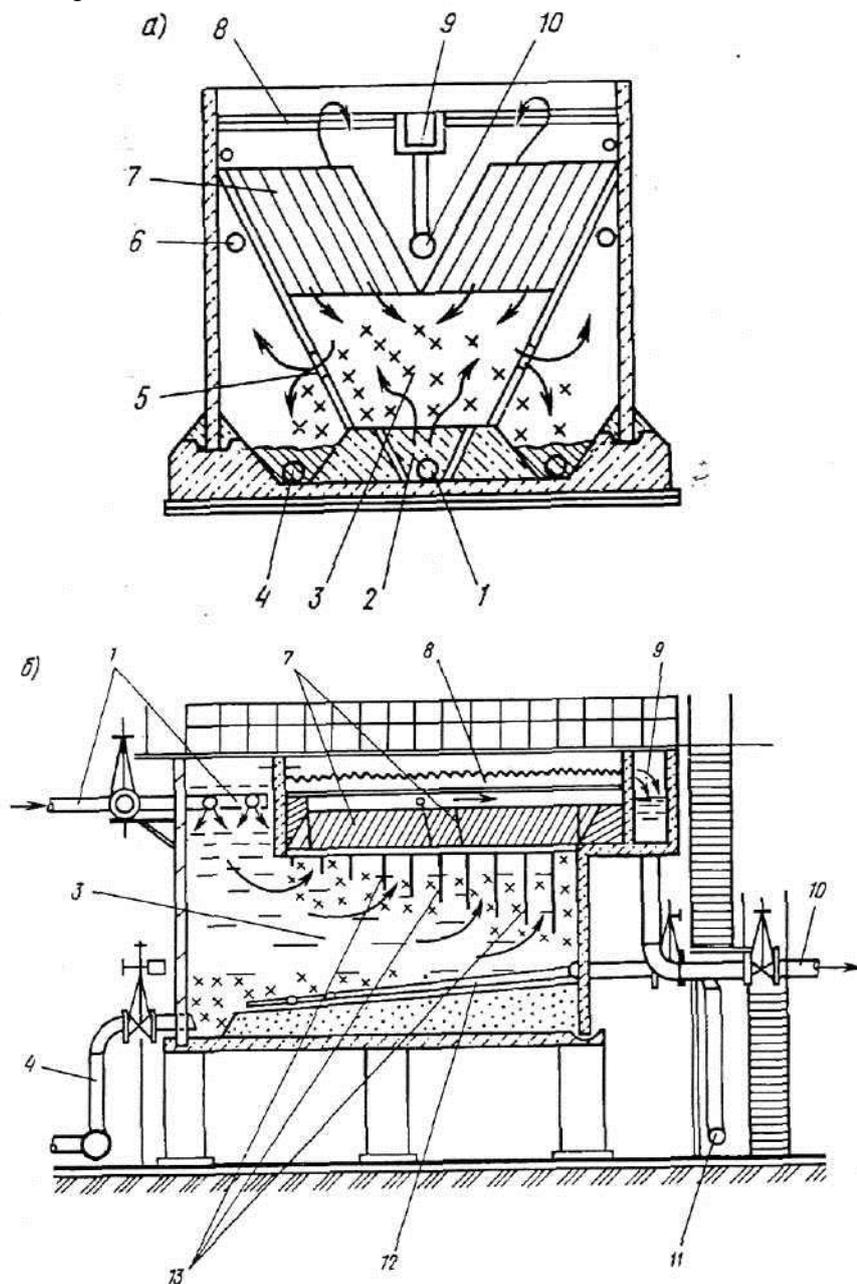


Рис. 7.26. Тонкослойные отстойники конструкции Союзводоканалпроект (а) и ЛэНИИ водных проблем (б)

1 и 10 — подача исходной и отвод осветленной воды; 2 — гравийная камера хлопьеобразования; 3 — слой взвешенного осадка; 4 — отвод осадка из осадкоуплотнителя; 6 — отвод осветленной воды из осадкоуплотнителя; 7 — тонкослойные модули; 8 — поперечные перфорированные водосборные желоба; 9 — водосборный канал; 5 — окна для отвода избытка осадка в осадкоуплотнитель; 11 — подача напорной воды в перфорированную систему; 12 — напорный коллектор для смыва осадка; 13 — струенаправляющие перегородки

### 23.3.3. Горизонтальные отстойники

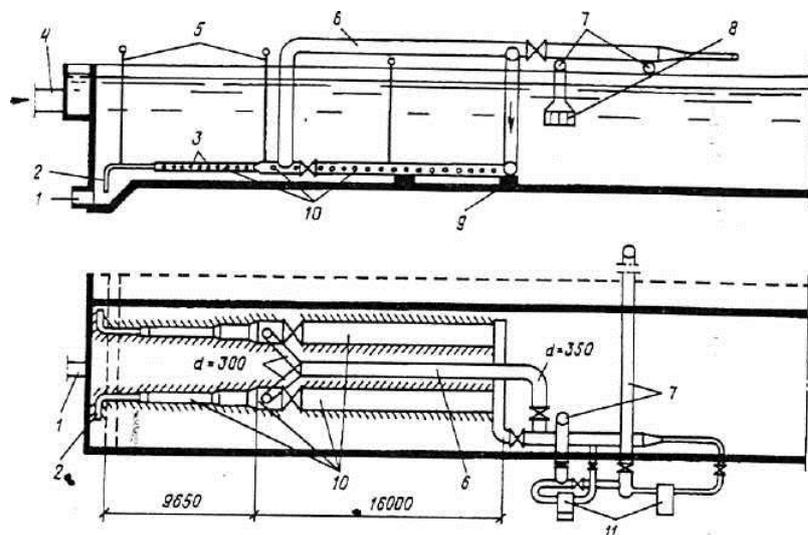
Горизонтальные отстойники с рассредоточенным по площади сбором осветленной воды в условиях нашей страны с продолжительными периодами минусовых температур

размещают в здании или сооружают с покрытиями и обсыпают землей с боков и сверху. В перекрытии отстойников предусматривают люк для спуска в сооружение, отверстия для отбора проб, располагаемые на расстоянии до 10 м друг от друга, и вентиляционные трубы. Со стороны входа воды отстойники совмещают с камерами хлопьеобразования. В южных районах с теплым климатом отстойники устраивают открытыми.

Для равномерности распределения воды в поперечном сечении отстойника его объем делят в продолжительном направлении перегородками на самостоятельно действующие секции шириной 3 - 6 м. При числе отстойников менее шести следует предусматривать один резервный. Дно отстойника должно иметь продольный талон не менее 0,005 в направлении, обратном движению воды, а в поперечном направлении оно может быть плоским или призматическим с углом наклона граней 45°. Для удаления осадка без отключения отстойника из работы, по предложению И.М.Миркиса, предусматривают гидравлические системы в виде перфорированных коробов или труб, которые обеспечивают его удаление в течение 20 - 30 мин. При открытой задвижке на сбросе осадок под действием гидростатического давления поступает в систему и в виде пульпы удаляется из отстойника. При шприце секции отстойника до 3 м осадок из песка можно удалять одной дырчатой трубой (коробом), прокладываемой по ее продольной оси, при большей ширине секции нужны две параллельные дырчатые трубы. Поэтому расстояние между осями труб назначают не более 3 м - при призматическом днище и 2 м - при плоском. В трубах для удаления осадка устраивают отверстия диаметром не менее 25 мм, располагаемые с шагом 0,3 - 0,5 м в шахматном порядке вниз под углом 45° к оси трубы. Отношение суммарной площади отверстий к площади сечения трубы должно быть равным 0,5 - 0,7. В верхней части начала сбросной трубы предусматривают отверстие диаметром не менее 15 мм для удаления воздуха. Скорость движения пульпы в конце трубы принимают не менее 1 м/с, а в ее отверстиях - 1,5 - 2 м/с. Потеря воды с осадком не превышает 1,0 % пропускной способности отстойника.

Из открытых горизонтальных отстойников осадок можно удалять специальными плавучими землесосными снарядами, выпускаемыми серийно. При движении такого снаряда по коридору отстойника напорный шланг снаряда попеременно присоединяется к патрубкам трубчатой системы, по которой осадок под напором, развиваемый насосом землесосного снаряда, перекачивается за пределы очистного комплекса.

В.А. Михайловым и В.А. Лысовым для осветления мутных и высокомутных вод была предложена и внедрена напорная гидравлическая система смыва осадка (рис. 7.27). Она состоит из телескопических дырчатых труб с насадками, насосной установки, резервуара промывной воды и емкости для сбора и предварительного уплотнения осадка перед передачей его на сооружения обезвоживания.



**Рис. 7.27.**  
**Напорная гидравлическая система удаления осадка из первичных отстойников конструкции РИСИ**  
1 - сброс осадка; 2 - наездки; 3 - патрубки; 4 - подача исходной воды; 5 - манометры; 6, 7 - нагнетательный и всасывающий трубопроводы; 8 - обратный клапан; 9 - опоры; 10 - телескопические перфорированные

В качестве механизированных средств удаления осадка без отключения отстойника используют скребковые конвейеры, которые сгребают осадок в приямок, откуда он откачивается эжектором или насосом.

Децентрализованный сбор осветленной воды, способствующий увеличению коэффициента объемного использования отстойника, осуществляют системой горизонтально расположенных желобов с затопленными отверстиями или треугольными водосливами, либо перфорированных труб, расположенными на участке  $\frac{2}{3}$  длины отстойника, считая от задней торцевой стенки. Расстояние в осях между водосборными трубами или желобами назначают до 3 м. При установке в отстойнике тонкослойных модулей подобную систему сбора воды устраивают на всю его длину. Кромку водосборного желоба с затопленными отверстиями располагают на 0,1 м выше максимального уровня воды, а отстойнике, а заглубление водосборных труб определяют расчетом по методике А.И.Егорова. Отверстия водосборных устройств диаметром не менее 25 мм размещают на 5 - 8 см выше дна желоба, а в трубах - горизонтально по оси с двух сторон. Скорость входа в отверстия принимают 1 м/с, а скорость движения воды в конце водосборных труб и желобов - 0,6 - 0,8 м/с. Излив воды из водосборных устройств отстойника с торцевой карман (канал) должен происходить без его подтопления.

Высоту отстойников следует определять как сумму высот зоны осаждения и зоны накопления осадка с учетом превышения строительной высоты над расчетным уровнем воды не менее 0,3 м.

Расчет отстойников производят для двух периодов: минимальной мутности при минимальном расходе воды; максимальной мутности при максимальном расходе воды, соответствующем этому периоду. В основе расчета горизонтальных отстойников лежит определение необходимой длины зоны осаждения, которая при принятой средней скорости движения воды в сооружении обеспечит необходимый эффект ее осветления, т.е. осаждение заданного процента взвеси. При этом по В.Т.Турчиновичу. исходят из допущения, что частицы взвеси в отстойнике осаждаются так же, как в неподвижном объеме воды, с той лишь разницей, что этот объем перемещается в горизонтальном направлении со скоростью движения воды в отстойнике.

При длине отстойника  $L$  и скорости горизонтального движения потока в нем  $v$  теоретическая продолжительность пребывания воды в отстойнике будет

$$t_p = L/v. \quad (7.18)$$

Это время, определяемое из соотношения (7.17), должно быть равно продолжительности осаждения, необходимой для получения заданного эффекта осветления воды. Как уже отмечалось выше, при расчете отстойников пользуются обычно фиктивной скоростью осаждения (или так называемой "процентной скоростью осаждения"), которая определяется по формуле  $u = h_p/t_p$ . Подставляя в эту формулу значения  $L$  из уравнения (7.18), получим

$$L = h_p v/u,$$

где  $h_p = 3..3.5$  - глубина зоны осаждения отстойниках;  
 $v$  - скорость горизонтального движения воды в начале отстойника, принимаемая равной 6 - 8; 7 - 10 и 9 - 12 мм/с соответственно для вод маломутных, средней мутности и мутных  
 $u$  - скорость осаждения взвеси, мм/с.

Значения  $u$ , мм/с, принимают равным для вод:

Мутных:

не обрабатываемых коагулянтom	0,08 - 0,15
обрабатываемых коагулянтom	0,5 - 0,6
обрабатываемых флокулянтom	0,2 - 0,3
Средней мутности, обрабатываемых коагулянтom	0,45 - 0,5
Маломутных цветных, обрабатываемых коагулянтom	0,35 - 0,45

При коагулировании и применении флокулянтов скорость осаждения взвеси следует увеличить на 15 - 20 %. После нахождения длины отстойника следует проверить отношение  $L/h$ , которое должно быть не менее 10.

П.И.Пискуиовым, К.В.Гпединым и др. доказано, что режим » движения воды в горизонтальных отстойниках турбулентный, вследствие чего выпадение частиц взвеси в воде тормозится наличием вертикальных составляющих скоростей турбулентного потока. Поэтому действительная продолжительность пребывания поды в отстойнике всегда меньше теоретической из-за неизбежного неравномерного распределения скоростей потока по сечению отстойника, поэтому действительная скорость движения воды в отстойнике больше скорости  $v$  в формуле (7.18), вследствие чего эффект осветления воды ухудшается. Следовательно, для обеспечения заданного эффекта осветления воды площадь отстойника, вычисляемая по формуле (7.19), должна быть несколько увеличена. Это достигается введением в указанную формулу коэффициента  $\alpha$ , всегда большего единицы.

Площадь горизонтальных отстойников в плане,  $m^3$ , находят из. Выражения

$$A_{ro} = \alpha_{об} q / (3,6u), \quad (7.19)$$

где  $\alpha_{об} = 1,3$  - коэффициент объемного использования отстойников;  
 $q$  - расчетный расход воды для периодов максимального и минимального суточного водопотребления,  $m^3/ч$ .

Применение горизонтальных отстойников со встроенной камерой хлопьеобразования и отбором осветленной воды через тонкослойные блоки, размещаемые в зоне осаждения, обеспечивает значительные технологические преимущества. Принципиальное отличие отстойников данной конструкции состоит в том, что осветление воды происходит не в свободном объеме отстойника, а в тонкослойных элементах высотой 3 - 5 см с ламинарным движением воды в них. Блоки из полимерных пленок или листовых материалов размерами в плане  $1 \times 1 - 1,5 \times 1,5$  м устанавливаются наклонно под углом 50 - 60°, что способствует постоянному сползанию осадка и его удалению. Применение отстойников с тонкослойными блоками вместо обычных в результате сокращения времени отстаивания воды позволяет значительно увеличить нагрузку (2 - 3 раза) или снизить объем сооружений. При установке в зоне осаждения тонкослойных блоков по всей длине отстойника его площадь при коагулировании примесей следует определять, исходя из удельных нагрузок, отнесенных к площади зеркала воды, занятой тонкослойными модулями: для мутной - 4,6 - 5,5; средней мутности - 3,6 - 4,5; для маломутной и цветной вод - 3 - 3,5  $m^3/(ч m^2)$ .

Объем зоны накопления и уплотнения осадка  $V_{зн}$  определяют для отстойников с механизированным удалением осадка скребковыми механизмами в зависимости от размеров скребков, а при гидравлическом удалении или напорном смыве осадка при продолжительности работы отстойника между чистками не менее 12 ч из выражения

$$V_{зн} = q T_p (C_u - M_o) / (\delta N), \quad (7.20)$$

где  $T_p$  - где период работы отстойника между сбросами осадка, ч;  
 $M_o = 8..15$  - мутность воды, выходящей из отстойника, г/м<sup>3</sup>;  
 $\delta$  - средняя по высоте осадочной части концентрация твердой фазы осадка, г/м<sup>3</sup>, зависящая от мутности исходной воды и продолжительности периода между сбросами; принимается по СНиПу;  
 $N$  - число рабочих отстойников;  
 $C_u$  - концентрация взвешенных веществ в поступающей и отстойник воде, равная

$$C_u = M_o + K_k D_k + 0,25Ц + B_u \quad (7.21)$$

здесь  $M_o$  - здесь мутность исходной воды, г/м<sup>3</sup>;  
 $K_k$  - коэффициент, принимаемый равным: для очищенного сульфата алюминия - 0,5, для нефелинового коагулянта - 1,2, для хлорного железа - 0,7;  
 $D_k$  - доза коагулянта по безводному продукту, г/м<sup>3</sup>;  
 $Ц$  - цветность исходной воды, град;  
 $B$  - количество нерастворимых примесей, вводимых с известью, г/м<sup>3</sup>, определяемое по формуле  $B_{и} = D_{и} / K_{и} - D_{и}$  (где  $K_{и}$  - долевое содержание СаО в извести,  $D_{и}$  - доза извести по СаО, г/м<sup>3</sup>).

### 23.3.4. Вертикальные отстойники

Вертикальные отстойники (см. рис. 7.15) находят применение на водоочистных комплексах с суточной подачей воды до 5 тыс. м<sup>3</sup>. Непременным условием их успешной работы является коагулирование примесей воды. Вертикальный отстойник представляет собой круглый или квадратный в плане резервуар с камерой хлопьеобразования водоворотного или вихревого типа в центральной трубе и с конусным днищем для накопления и уплотнения осадка. Угол между наклонными стенками, образующими днище, следует принимать 70 - 80°. Сбор осветленной воды предусматривается периферийными и радиальными желобами с затопленными отверстиями или с треугольными водосливами. Сечение водосборных желобов определяют по скорости движения воды в них 0,5 - 0,6 м/с. При площади отстойника до 12 м<sup>2</sup> предусматривается только периферийный кольцевой желоб, при площади 12 - 30 м<sup>2</sup> добавляются еще четыре радиальных (в круглых отстойниках) или промежуточных (в квадратных отстойниках); при площади свыше 30 м<sup>2</sup> предусматривается шесть - восемь дополнительных желобов.

Расчет вертикальных отстойников производят на те же два случая, что и для горизонтальных отстойников. Площадь зоны осаждения отстойника  $A_{в.о.}$ , м<sup>2</sup>, должна соответствовать наибольшему значению

$$A_{в.о.} = \alpha_{об} q / (3,6 v_p), \quad (7.22)$$

где  $\alpha_{об}$  - коэффициент объемного использования, принимаемый равным 1,3 - 1,5 (нижний предел - при  $D/H = 1$ , верхний - при  $D/H = 1,5$ , здесь  $D$  и  $H$  - диаметр и высота вертикальной части отстойника);  
 $v_p$  - расчетная скорость восходящего потока, мм/с; принимается не более указанных выше.

При размещении в зоне осаждения тонкослойных блоков площадь зоны осаждения рассчитывается аналогично описанному выше. При условии более или менее равномерного распределения воды по площади зоны осаждения отстойника реальными скоростями восходящего потока являются скорости 0,4 - 6 мм/с, которые и следует вводить в расчет. Как показывает опыт эксплуатации вертикальных отстойников, при

наличии таких скоростей восходящего потока основное количество коагулированной взвеси осаждается в отстойнике. Это объясняется тем, что в медленно восходящем потоке воды коагулированная взвесь, постепенно агломерируясь достигает таких размеров, что скорость ее падения становится больше скорости восходящего потока.

В вертикальном отстойнике при наличии конусообразного днища и отражательного щита выпуск накопившегося и уплотненного осадка может производиться во время работы отстойника, без его отключения.

При найденном диаметре отстойника и заданном угле конусности днища объем осадочной части  $V_{з.п.}$  является фиксированным. Поэтому его лишь проверяют по продолжительности работы отстойника  $T_p$ , ч, между выпусками осадка, которая должна быть не менее 6 ч. Проверку производят по формуле

$$T_p = V_{з.п.} \cdot c' / [q(C_{II} - M_0)]. \quad (7.23)$$

При числе рабочих отстойников менее шести необходимо предусматривать один резервный.

### 23.3.5. Радиальные отстойники

В системах оборотного водоснабжения и для осветления высокомутных вод на первой ступени рекомендуется применять радиальные отстойники (см. рис. 7.25) - круглые в плане резервуары, в которых осветляемая вода подводится снизу в центр и изливается через воронку, обращенную широким концом кверху. Вокруг воронки располагается цилиндр - успокоитель радиусом 1.5 - 2,5 м с глухим дном и с дырчатой стенкой, суммарную площадь отверстий которой находят при скорости движения воды в них 1 м/с, диаметр отверстия принимают 40 - 50 мм. Наличие такого цилиндра способствует равномерному распределению воды по рабочей высоте отстойника. Вода медленно движется от центра к периферии и сливается в периферийный желоб с затопленными отверстиями или треугольными водосливами.

Для равномерного сбора осветленной воды по периметру кольцевого периферийного желоба в его стенках на глубине 120 - 150 мм от поверхности воды устраивают отверстия диаметром 25 - 30 мм или треугольные водосливы высотой 40 - 60 мм, размещаемые на расстоянии 100 - 150 мм в осях. Общую площадь отверстий находят по скорости движения воды в них 0.7 м/с. Скорость движения воды в желобе принимают 0,5 - 0.6 м/с. Для удаления осадка используют медленно вращающуюся металлическую ферму с укрепленными на ней скребками, сгребающими осадок к центру отстойника, откуда он выпускается или откачивается. Одним концом ферма опирается на опору в центре отстойника, а другим - на тележку,двигающуюся по стенке отстойника.

Расчет радиального отстойника производят в следующем порядке. Задаются необходимым процентом задерживания взвеси отстойником. Затем определяют скорость выпадения взвеси  $u$ , соответствующую задержанию заданного процента ее, после чего определяют площадь  $A$ , м<sup>2</sup>, радиального отстойника

$$A_{po} = 0,2 (q/u^{1,07} + A_{вз}), \quad (7.24)$$

где  $q$  - расход воды, поступающий в отстойник, м<sup>3</sup>/с;  
 $u = 0,5..0,6$  - скорость выпадения взвеси, мм/с;  
 $A_{вз}$  - площадь, м<sup>2</sup>, вихревой зоны отстойника, радиус которой принимают на 1 м больше радиуса распределительного цилиндра, где вследствие вихреобразного движения воды осаждение взвеси почти не происходит.

По найденному значению  $A_{p o}$  находят радиус отстойника. Глубину отстойника в центре можно определить по формуле

$$H_u = h + R i,$$

где  $h = 1,2..1,3$  - где глубина отстойника у периферийного водосборного желоба, м;  
 $R$  - радиус отстойника, м;  
 $i = 0,04..0,05$  - уклон дна отстойника.

### 23.3.6. Отстойники с малой глубиной осаждения

В последнее время при проектировании новых и реконструкции действующих водоочистных комплексов получили широкое распространение тонкослойные отстойные сооружения. Требования к методам и качеству обработки воды, поступающей на тонкослойные отстойные сооружения, аналогичны таковым к отстойным сооружениям других типов. Их производительность не ограничивается.

В тонкослойном отстойнике (см. рис. 7.26) осаждение взвеси происходит в малом слое воды, образуемом наклонными элементами, обеспечивающими быстрое выпадение взвеси и ее сползание по наклонной поверхности элементов в зону хлопьеобразования и осадкоуплотнения. Уменьшение высоты потока снижает удельную нагрузку на площадь отстаивания, что обуславливает сокращение количества жидкости, переносимой частицами, повышает стабильность его гидродинамической структуры. Стабилизация течения возможна в случае, если энергия движения частиц воды будет преобладать над силой тяжести. При  $Fr = u^2/(g R) > 10^5$  всегда обеспечивается стабильность течения. Поскольку турбулентность повышает транспортирующую способность потока, режим течения в отстойнике должен быть ламинарным, т.е. для открытого канала прямоугольной формы число Рейнольдса не должно превышать  $Re = v H \eta - o < 700$ , а для закрытого  $Re = v R/J < 500$ .

Отдельные тонкослойные ячеистые элементы, объединяемые в сотоблоки, выполняются из мягких или полужестких полимерных пленок, соединенных в соответствующую конструкцию, или из жестких листовых материалов в виде отдельных полок. Размеры в плане отдельных блоков для удобства их монтажа и эксплуатации следует принимать в пределах  $1 \times 1 - 1,5 \times 1,5$  м с учетом фактических размеров сооружения. Высоту поперечного сечения тонкослойного ячеистого элемента рекомендуется принимать в пределах  $0,03 - 0,05$  м. Ячейки могут быть приняты любой формы, исключаяющей накопление в них осадка. Угол наклона элементов необходимо принимать в пределах  $50 - 60^\circ$  (меньшие значения для более мутных вод, большие - для маломутных цветных). Длину тонкослойных элементов следует определять специальным расчетом в пределах  $0,9 - 1,5$  м. Установку отдельных блоков осуществляют с помощью специальных несущих конструкций, расположенных под или над ними, а также путем их крепления к элементам водосборной системы (желобам, лоткам, трубам) и промежуточным стенкам сооружений. При этом могут быть использованы стальные или полимерные *трубы*, арматурная проволока, профилированные конструкции. При монтаже блоков необходимо обеспечить герметичность их примыкания к внутренним стенкам сооружений, например, с помощью резиновых прокладок. Сбор осветленной воды из тонкослойных отстойников осуществляют желобами с затопленными отверстиями или открытыми водосливами, например треугольного профиля, расположенными на расстоянии не более 2 м один от другого.

Расчет тонкослойных отстойников сводится к определению его геометрических размеров - длины, ширины, высоты канала при заданной нагрузке, начальной и конечной концентрации взвеси и ее характеристики (дисперсности и плотности). Необходимыми

условиями, обеспечивающими надежность работы и стабильность качества осветленной воды, являются ламинарный режим течения и устойчивость потока в тонкослойном элементе. При расчете тонкослойных отстойников определяют скорость движения жидкости  $u$ , рабочую длину зоны осаждения  $L$  и объем зоны накопления осадка  $V$ . По В.М.Карабельшкову, при обработке маломутных цветных вод расчет технологических и конструктивных параметров сооружения, а также отдельных тонкослойных элементов следует производить по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} v_{ii} &= (u \beta k_m / k_1) [L / (k_2 H) + 1]; \\ L &= k_2 k_0 [v_{ii} k_1 / (u_0 \beta k_m) - 1]; \\ k_1 &= 1 / (k_{ct} k_{он} k_{\alpha}); k_2 = \varphi k_{\phi} k_{\alpha} / (\sin \alpha \cos \alpha), \end{aligned} \quad (7.25)$$

- где  $V_{ii}$  - удельная нагрузки или производительность сооружения в расчете на площадь зеркала воды  $\text{м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ ;
- $L$  - длина тонкослойного элемента блока, м;
- $H$  - высота тонкослойного элемента, м;
- $u$  - расчетная (охватываемая) скорость осаждения взвеси, м/ч;
- $\alpha$  - угол наклона тонкослойных элементов, град;
- $V_0$  - средняя скорость потока в тонкослойных элементах, м/ч;
- $\omega$  - коэффициент, учитывающий влияние гидродинамических условия потока в тонкослойных элементах;
- $k_{\phi}$  - коэффициент, учитывающий форму поперечного сечения тонкослойных элементов;
- $k_{ct}$  - коэффициент, учитывающий стеснение сечения потока в тонкослойном элементе, сползающим осадком;
- $k_{он}$  - коэффициент, учитывающий гидравлическое совершенство тонкослойного сооружения и степень его объемного использования (отношение фактического и расчетного времени пребывания воды);
- $\beta$  - коэффициент стесненного осаждения взвеси под тонкослойными элементами;
- $k_a$  - коэффициент агломерации;
- $k_{и}$  - конструктивный коэффициент, учитывающий фактическую, открытую для движения потока площадь сооружения на выходе из тонкослойных сооружений;
- $k_1$  и  $k_2$  - обобщенные расчетные коэффициенты.

Расчетную скорость осаждения взвеси принимают в соответствии с опытом эксплуатации сооружений, работающих в аналогичных условиях, или по результатам технологического моделирования процессов хлопьеобразования и тонкослойного осаждения с целью определения требуемого значения. Коэффициент  $\phi$  зависит от отношения  $V/H$ , где  $V$  - ширина тонкослойного элемента, а  $H$  - высота тонкослойного элемента:

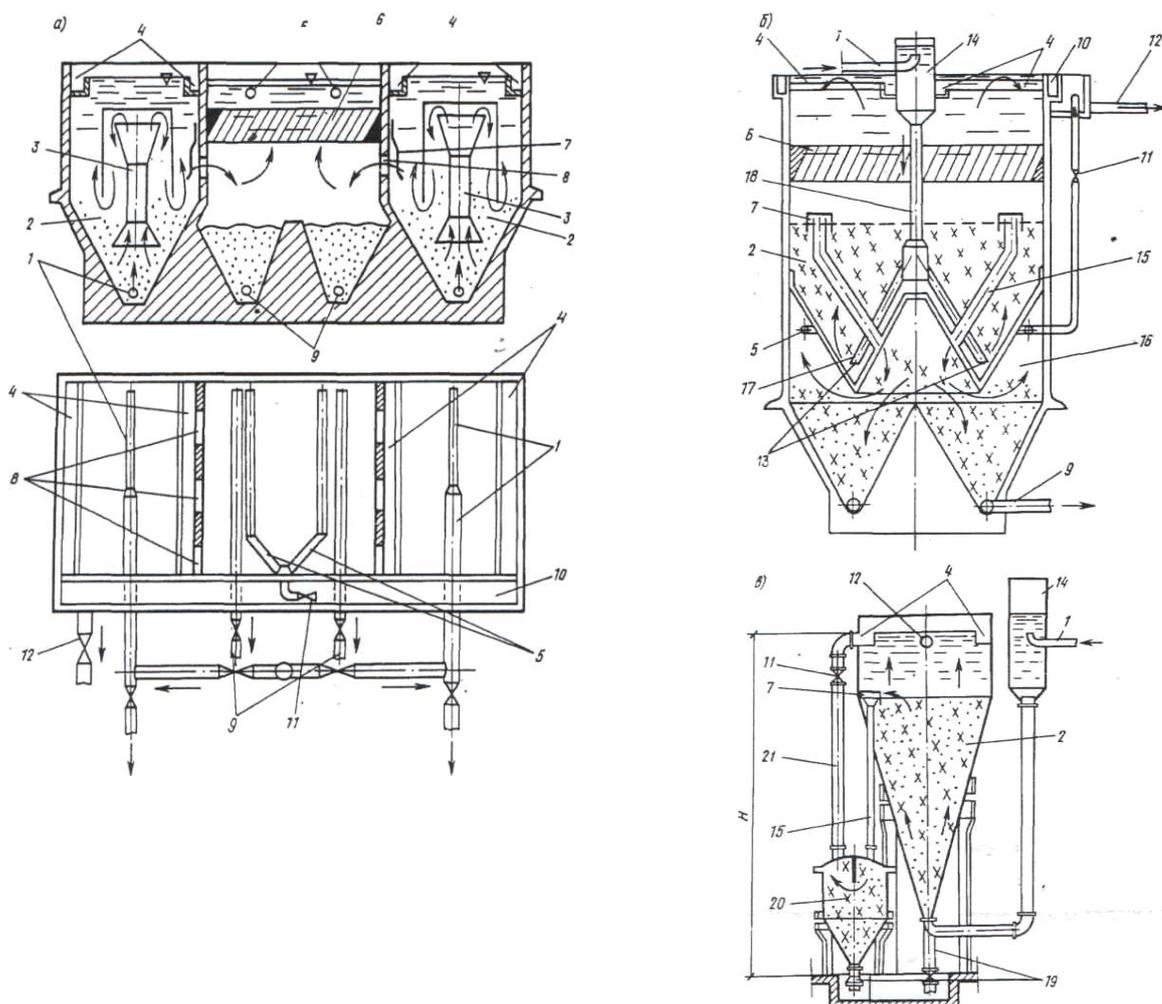
$V/H$ .....	1..2,5	2,5..5,0	5,0. - 10	>10
$V$ .....	- 1,25	1,15	1,05	1.0

Значение  $k_{ct}$  рекомендуется принимать в среднем равным 0,7 - 0,8 (большие значения - для более мутных вод, меньшие - для маломутных цветных вод). Произведение  $\beta k_{и}$  следует принимать в пределах 1,15 - 1,3. Значения остальных величин, входящих в формулы (7.25), берут по СНиПу.

## 23.4. ОБРАБОТКА ВОДЫ В СЛОЕ ВЗВЕШЕННОГО ОСАДКА

Метод обработки воды в слое ранее образованного взвешенного осадка широко используют в технологии ее осветления, обесцвечивания, умягчения, дефторирования, обезжелезивания и обескремнивания. Первые водоочистные сооружения, работающие по этому принципу, были разработаны Е.Н.Тетеркиным и Сполдингом и получили название суспензионных сепараторов, пресипитаторов, акселераторов, осветлителей со слоем взвешенного осадка. Эти сооружения применяют на первой ступени водоподготовки вместо отстойников и камер хлопьеобразования. Они могут успешно работать только при условии предварительной обработки примесей воды коагулянтom или флокулянтom. Осветлители со взвешенным слоем обеспечивают более высокий эффект осветления воды (до 5 - 8 мг/л) и имеют более высокую производительность, чем отстойники. Однако конструктивно и в эксплуатации они более сложны.

Схема работы осветлителей с взвешенным осадком показана на рис. 7.28.



**Рис. 7.28. Осветлитель коридорного типа с рециркуляцией осадка и тонкослойными модулями (а), с поддонным (б) и выносным (в) осадкоуплотнителем**

1, 12 - подача исходной и отвод осветленной воды; 2 - слой взвешенного осадка; 3 - рециркулятор; 4 - желоба сбора осветленной воды; 5 - перфорированные трубы отвода осветленной воды из осадкоуплотнителя с рециркулирующей задвижкой 11; 6 - тонкослойные модули; 7 - защитные козырьки; 8 - окна отвода избытка осадка из рабочих коридоров в осадкоуплотнитель; 9 - перфорированные трубы сброса осадка из осадкоуплотнителя; 10 - боковой карман сбора осветленной воды; 13 - сопло; 14 - воздухоотделитель; 15 - осадковые трубы; 16 - поддонный осадкоуплотнитель; 17 - водораспределительные трубы; 18 - центральный подающий стояк; 19 - сброс осадка; 20 - выносной осадкоуплотнитель; 21 -

трубопровод отвода осветленной воды из осадкоуплотнителя с регулирующей задвижкой

Обрабатываемая вода, смешанная с реагентами, вводится в осветлитель снизу и равномерно распределяется по площади рабочих коридоров. Далее вода движется снизу вверх и проходит через слой ранее образованного взвешенного осадка, состоящего из массы взвешенных в восходящем потоке хлопьев, которые непрерывно хаотично движутся, но весь слой в целом неподвижен. Он находится в состоянии динамического равновесия, обусловленного равенством скорости восходящего потока воды и средней скорости осаждения хлопьев. Необходимо отметить, что средняя скорость осаждения хлопьев во взвешенном слое отлична от их гидравлической крупности. Это объясняется так называемым стесненным осаждением частиц, на котором основана работа осветлителей. Проходя через слой взвешенного осадка, обрабатываемая вода осветляется и обесцвечивается в результате контактной коагуляции.

При движении воды через взвешенный слой извлекаемые из нее примеси остаются в нем, при этом объем слоя должен непрерывно увеличиться, но этого не происходит, так как избыточный осадок из взвешенного слоя непрерывно удаляется в осадкоуплотнитель, откуда сбрасывается в водосток. Обработанная вода, прошедшая через слой взвешенного осадка, собирается помощью сборных желобов или труб и отводится за пределы аппарата, стабильная работа которого достигается при постоянстве расхода и температуры обрабатываемой воды. Спонтанные колебания расхода воды вызывают размыв взвешенного слоя и вынос хлопьев в зону осветления. Колебания температуры воды влекут за собой возникновение конвективных токов, приводящих к нарушению взвешенного слоя и замутнению осветленной воды. Для обеспечения нормальной работы осветлителя дотекают в течение часа колебания расхода  $+15\%$  и температуры обрабатываемой воды  $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

При осаждении взвешенной массы хлопьев наблюдается стесненное осаждение. Его характерная особенность в том, что скорость осаждения, которая всегда меньше скорости свободного падения, т.е. гидравлической крупности частиц, зависит не только от их размеров и массы, но и от их концентрации. Так, при объемной концентрации, равной  $10\%$ , скорость осаждения частиц в 2 раза меньше по сравнению с их гидравлической крупностью, при концентрации  $25\%$  - в 6 раз. Взвешенный в восходящем потоке слой хлопьев находится в состоянии стесненного осаждения, поэтому частицы не выносятся с потоком в зону осветления и не декантируют.

Е.Ф.Кургаевым показано, что взвешенный слой не мог бы существовать, если бы скорость стесненного осаждения не зависела от его концентрации. Изменение скорости восходящего потока адекватно вызвало бы вынос или выпадение частиц. Однако благодаря тому, что скорость стесненного осаждения зависит от концентрации взвешенного слоя, он сохраняется в широком диапазоне изменения скоростей восходящего потока. С изменением скорости восходящего потока в соответствии с гидродинамическими законами стесненного осаждения изменяется объемная концентрация частиц в слое.

Следовательно, каждому значению восходящей скорости потока отвечает определенная в данных условиях концентрация частиц слоя. Чем больше скорость, тем меньше концентрация. Когда скорость потока приближается к скорости свободного падения частиц, находящихся во взвешенном слое, слой размывается, происходит вынос частиц с потоком воды. Следовательно, скорость свободного осаждения частиц является верхним пределом существования взвешенного слоя. Известен и нижний предел существования последнего - минимальная скорость потока, при которой силы гидродинамического воздействия потока на частицы меньше их силы тяжести. В этом случае частицы плотной массой декантируют. Скорость восходящего потока воды в осветлителях всегда лежит между верхним и нижним пределами. Стесненное осаждение играет очень важную роль в работе осветлителей со взвешенным осадком.

Оно определяется поведением взвешенного слоя - основного рабочего элемента этих сооружений, в котором идет процесс обработки воды.

### 23.4.1. Теоретические основы работы взвешенного слоя

Основные закономерности стесненного осаждения были установлены Д.М.Минцем, Е.Ф.Кургаевым и др., физическая сущность которого заключается в изменении гидродинамических условий обтекания частиц жидкостью при увеличении их концентрации. Из-за взаимной близости частиц свободное обтекание, имеющее место при осаждении индивидуальной частицы в безграничном объеме жидкости при весьма малой концентрации частиц, трансформируется в особый род движения через своеобразную пористую среду, которой является концентрированная масса осаждающихся частиц или взвешенный в восходящем потоке их спой. По данным Д.М.Минца, движение воды через взвешенные в потоке слои частицы рассматривается как движение через пористую зернистую среду, закономерности которого устанавливаются в виде функциональной зависимости между безразмерными числами - коэффициентом сопротивления  $\psi$  и числом Рейнольдса  $Re$ , определяемыми из выражений:

$$\left. \begin{aligned} \Psi &= Pm^3d/[6\rho_1v^2(1-m)L]; \\ Re &= \rho_1vd/[6\eta(1-m)] \end{aligned} \right\} \quad (7.26)$$

где  $P$  - потери напора в слое зернистого материала;  
 $L$  - толщина взвешенного слоя;  
 $v$  - скорость фильтрования;  
 $m$  - пористость слоя, определяемая как отношение объема пустит и слое к общему его объему;  
 $d$  - диаметр зерен;  
 $\rho_1$  и  $\eta$  - плотность и вязкость жидкости. При этом объемная концентрация зерен в слое  $G = 1 - m$ .

Формулы (7.26) выражают коэффициент сопротивления и число Рейнольдса в форме, отвечающей физическим условиям движения жидкости в пористой среде. При движении жидкости через взвешенный в потоке слой частиц, находящихся в состоянии динамического равновесия, сила давления жидкости на слой уравнивается массой слоя. При площади горизонтального сечения слоя  $A$  сила давления равна  $PA$ , а масса, стоя в жидкости, определяется как

$$G = Ag(\rho_2 - \rho_1)(1 - m)L \quad (7.27)$$

Так как

$$PA = G,$$

Получим

$$P = (\rho_2 - \rho_1) g (1 - m)L \quad (7.28)$$

Из формулы (7.28) следует, что падение гидродинамического давления во взвешенном слое равно массе в жидкости этого слоя с единичной площадью основания. Подставляя выражение (7.28) в формулу (7.26), получим для коэффициента сопротивления при движении жидкости через взвешенный слой

$$\Psi = m^3 dg(\rho_2 - \rho_1) / 6v^2\rho_1 \quad (7.29)$$

Исследованиями Д.М.Минца и С.А.Шуберта показано, что зависимость между коэффициентом сопротивления и числом Рейнольдса выражается как

$$\psi Re = \psi_{пр} Re + \varepsilon \quad (7.30)$$

Обозначив коэффициент сопротивления и число Рейнольдса для взвешенного слоя через их значения для свободно падающих зерен и преобразуя уравнение (4.30), получим

$$\psi = \psi_3 \frac{m^3}{\beta^2 \pi}, \quad Re = Re_3 \frac{\beta}{6(1-m)}. \quad (7.31)$$

где  $\beta = v/u$  - отношение скорости восходящего потока жидкости  $v$  или скорости стесненного осаждения к скорости свободного осаждения  $u$  или к гидравлической кротости зерен.

С учетом этих изменений из уравнения (7.30) следует

$$\psi_3 \frac{m^3}{\beta^2 \pi} = \frac{\varepsilon 6(1-m)}{Re_3 \beta} + \psi_{пр} \quad (7.32)$$

Увеличение скорости восходящего потока  $v$ , когда она приближается к скорости свободного осаждения, делает долю свободного объема взвешенного, слоя  $m$  приближающейся к единице и соответственно объемная концентрация зерен в слое  $C_v$  приближается к нулю. При  $v = u$ ,  $\beta = 1$ ,  $m = 1$ ,  $1 - m = 0$  из равенства (7.32) получаем  $\psi_{пр} = \psi_3/\pi$ . Отсюда видно, что тангенс угла наклона прямых, уравнения которых представлены формулой (7.30), выражается через коэффициент сопротивления свободно падающей частицы и может быть определен по экспериментальным графикам зависимости  $\psi_3 = f(Re)$ , приведенным выше. Решая уравнение (7.32) относительно  $\beta$  получим

$$\beta = \frac{v}{u} = - \frac{3\pi \varepsilon (1-m)}{Re_3 \psi_3} + \left\{ \left[ \frac{3\pi \varepsilon (1-m)}{Re_3 \psi_3} \right]^2 + m^3 \right\}^{0.5} \quad (7.33)$$

Формула (7.33) дает в общем виде решение задачи о скорости стесненного осаждения частиц в жидкости. Она связывает скорость стесненного осаждения с концентрацией частиц в слое и показывает, что скорость стесненного осаждения зависит также от гидродинамических характеристик частиц: скорости  $u$ , числа  $Re_3$  и коэффициента сопротивления  $\psi_3$  при свободном осаждении. Параметр  $\varepsilon$ , входящий в уравнение (7.33), согласно экспериментам также зависит от гидродинамических характеристик частиц. Это позволяет уравнение (7.33) представить в виде:

$$\beta = - \varepsilon' (1 - m) + \{[\varepsilon'(1 - m)]^2 + m^3\}^{0.5}, \quad (7.33)$$

где  $\varepsilon'$  - безразмерная гидродинамическая характеристика частиц, которая сохраняет

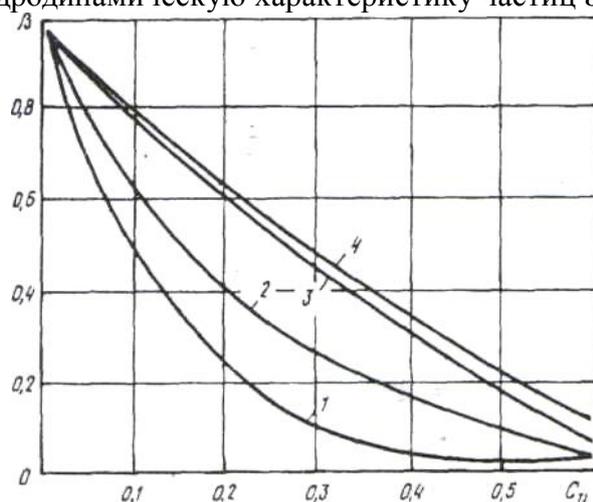
где  $\varepsilon$  - постоянное значение (зависящее только от формы частиц) при малых числах  $Re_3 < 1$ , т.е. при ламинарном режиме свободного осаждения и при очень больших числах  $Re_3$ , соответствующих турбулентному режиму свободного осаждения. Поэтому для мелких частиц,

так же как и для крупных, отношение скорости стесненного осаждения к скорости свободного падения зависит только от их концентрации в слое и не зависит от их размера. Однако размер частиц существенно влияет в переходной области (от ламинарного к турбулентному режиму) обтекания, где значение  $\epsilon'$  меняется с изменением крупности частиц.

На рис. 7.29 представлены зависимости  $\beta = \varphi(C_v)$  от объемной концентрации взвешенного слоя, построенные по формуле (7.34). Из них следует, что при стесненном осаждении мелких частиц, т.е. частиц с небольшой гидравлической крупностью, влияние объемной концентрации на скорость стесненного осаждения проявляется наиболее заметно. Следовательно, для расчета стесненного осаждения необходимо знать две величины, характеризующие осаждающиеся частицы: их гидравлическую крупность и гидродинамическую характеристику  $\epsilon'$ . Когда эти величины известны, можно определить скорость стесненного осаждения или скорость восходящего потока при любой концентрации взвешенного слоя или осаждающихся частиц. Если заранее не известны гидравлическая крупность и гидродинамическая характеристика частиц, эти параметры определяют из опыта. Методика их экспериментального определения основана на использовании линейной зависимости (7.30) - минимально по двум значениям скорости восходящего потока и соответствующих им двух значениям объемной концентрации взвешенного слоя  $C_v$ . После подстановки в уравнение (7.30) выражения (7.31) и  $\psi_{пр} = \psi_3/\pi$  и деления правой и левой частей уравнения на постоянные множители, получим

$$\frac{m^3}{(1-m)v} = \frac{1}{u^2} \cdot \frac{v}{1-m} + \frac{2\epsilon'}{u} \quad (7.35)$$

Обозначая на графике по оси ординат экспериментальные значения чисел  $y = m^3 / [(1-m)v]$ , а по оси абсцисс  $x = v/(1-m)$ , получим прямую линию; тангенс угла наклона которой равен  $1/u^2$ , а отрезок, отсекаемый на оси ординат,  $2\epsilon'/u$ . Таким образом, из эксперимента по стесненному осаждению массы частиц можно определить среднюю скорость их свободного падения  $u$  и гидродинамическую характеристику частиц  $\epsilon'$ .



**Рис. 7.29. Графики  $\beta = \varphi(C_v)$**

1 - для мелких зерен  $C_v = 4,5$ ; 2, 3 - для переходной области значений размеров зерен; 4 - для крупных зерен  $C_v = 0,23$

Е.Ф.Кургаевым, З.В.Черновой, В.В.Ашаниным выполнены обширные экспериментальные исследования стесненного осаждения хлопьев взвешенного осадка осветлителей, на основании которых доказано соответствие закономерностей стесненного

осаждения общим закономерностям стесненного осаждения, описываемым формулой (7.34). Для удобства расчетов З.В.Чернова предложила логарифмическую формулу

$$\text{Lg } \beta = - 2,75 C_v, \quad (7.36)$$

которая в точности соответствует формуле (7.34) при объемных концентрациях  $C_v = 1 - m$  от 0 до 25 %, т.е. в диапазоне, перекрывающем значения объемных концентраций, обычно имеющих место в осветлителях со взвешенным осадком. Заменяя в формуле (7.36) объемную концентрацию  $C_v$  массовой  $C_m$  (которая значительно проще определяется), получим

$$\text{lg } \beta = -\text{lg } \frac{v}{u} = -2,75 \frac{C_m}{\gamma} ; \quad (7.37)$$

где  $\gamma = C_m/C_v$  концентрация твердых частиц, входящих и структуру хлопьев.

Из выражения (7.37) следует, что минимально по двум значениям восходящей скорости потока и соответствующим им значениям массовой концентрации взвешенного осадка могут быть определены гидравлическая крупность хлопьев  $\gamma$  и концентрация твердых частиц, входящих в структуру хлопьев  $\gamma$  или их плотность. Определение значений  $u$  и  $\gamma$  производят графически в координатах  $\text{lg } v - C_m$ , в которых уравнение (7.37) представляет прямую линию, ее тангенс угла наклона равен  $- 2,75/\gamma$ , а отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат,  $\text{lg } u$ . Оба параметра  $u$  и  $\gamma$  являются важными физическими характеристиками взвешенного слоя, зависящими от состава обрабатываемой воды и технологии ее обработки. Особый интерес представляет скорость свободного осаждения хлопьев, которая определяет верхнюю границу существования взвешенного слоя, а минимальные значения  $u$  и  $\gamma$  соответствуют обработке цветных под при низких температурах.

Ранее отмечалось, что процесс обработки воды в слое взвешенного осадка является физико - химическим, коагуляционным. Агрегативно неустойчивые взвешенные и коллоидные примеси, содержащиеся в обрабатываемой воде, адсорбируются на поверхности хлопьев взвешенного осадка, при этом скорость изменения концентрации мелких частиц пропорциональна их мгновенной концентрации и концентрации крупных частиц.

$$dC_1/dC_1C_2; \quad (7.38)$$

здесь  $C_1$  и  $C_2$ , - концентрация взвеси в обрабатываемой подо и хлопьев извещенного слоя;

$b$  - параметр процесса, характеризующий интенсивность прилипания и зависящий от физико - химических свойств воды и взвеси.

При рассмотрении процесса контактной коагуляции во взвешенном слое Д.М.Минц делает допущение, что взвесь, содержащаяся в обрабатываемой воде, однородна по своим физико - химическим свойствам. Для этого случая дифференциальное уравнение (7.38) справедливо для любого горизонтального сечения взвешенного осадка. При этом концентрация взвешенного осадка  $C_x$  при установившемся режиме работы осветлителя не изменяется во времени и практически постоянна по высоте слоя. Заменяя независимую переменную  $dl = dx/v$  и разделяя переменные, получим

$$dC_1/C_1 = (- bC_x/v)dx;$$

и после интегрирования

$$C_1/C_0 = \exp(- bxC_x/v)x, \quad (7.39)$$

здесь  $C_0$  - концентрация взвеси в воде, поступающей в осветлитель;  
 $x$  - расстояние до рассматриваемого сечения.

Выражение (7.39) учитывает влияние основных факторов на ход процесса обработки воды в слое взвешенного осадка, эффект которого зависит от физико-химических условий его протекания, т.е. интенсивности адсорбции примесей на хлопьях взвешенного осадка  $b$ , толщины слоя взвешенного осадка  $x$ , скорости восходящего потока  $v$  и концентрации взвешенного осадка  $C_x$ . Из уравнения (7.39) можно заключить, что вес теоретические кривые, характеризующие изменения относительной концентрации взвеси  $C_1/C_0$  по толщине слоя взвешенного осадка  $x$ , соответствующие различным условиям протекания процесса, подобны и отличаются только масштабом оси абсцисс. При этом одинаковый эффект осветления воды достигается при равных значениях безразмерного комплекса

$$X = bC_x x/v.$$

Если масштаб оси абсцисс изменить и вместо значений толщины слоя взвешенного осадка  $x$  отложить значения безразмерного комплекса  $X$ , то все теоретические кривые совместятся в одну, уравнение которой записывается в виде

$$C_1/C_0 = e^{-X}. \quad (7.40)$$

Следовательно,  $X$  можно рассматривать как критерий подобия для технологических процессов осветления воды в слое взвешенного осадка при однородном составе взвеси. Используя этот критерий, устанавливают единую обобщенную закономерность (7.40) для всего разнообразия технологических процессов обработки воды разного состава в слое взвешенного осадка. В частном случае очистки воды определенного качества при различных режимах обработки, т.е. при различных значениях скорости восходящего потока воды, критерием подобия может служить размерный комплекс

$$X' = X/b = C_x x/v, \quad (7.41)$$

так как параметр  $b$  сохраняет постоянное значение. Подставляя выражение (7.39) в формулу (7.41), получим

$$C_1/C_0 = \exp(-bX'). \quad (7.42)$$

Из уравнения (7.42) следует, что в этом случае равным значениям критерия  $X'$  отвечают одинаковые значения  $C_1/C_0$ .

Для неоднородной по физико-химическим свойствам взвеси и для произвольного поперечного сечения взвешенного осадка следует написать вместо одного уравнения (7.39) систему таких уравнений, в которой каждое относится только к одной определенной фракции частиц:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dC_1}{C_1} &= -b_1 \frac{C_x}{v} dx; \\ \frac{dC_2}{C_2} &= -b_2 \frac{C_x}{v} dx; \\ \dots\dots\dots \\ \frac{dC_n}{C_n} &= -b_n \frac{C_x}{v} dx. \end{aligned} \right\} \quad (7.43)$$

Индексами 1,2,..,n обозначены фракции взвеси. Соответственно  $C_1, C_2, \dots, C_n$  – мгновенные концентрации каждой фракции;  $b_1, b_2, \dots, b_n$  – параметры, характеризующие интенсивность адсорбции частиц взвеси каждой фракции на хлопьях взвешенного осадка. Вводя новую независимую переменную  $X' = C_x x/v$ , получим

$$dX' = C_x dx/v$$

и тогда система дифференциальных уравнений (7.43) предстанет в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} dC_1 / C_1 &= -b_1 dX'; \\ dC_2 / C_2 &= -b_2 dX'; \\ \dots\dots\dots \\ dC_n / C_n &= -b_n dX'. \end{aligned} \right\} \quad (7.43)$$

Решение этой системы приводит к уравнению

$$C_1/C_0 = \delta_1 e^{-b_1 X'} + \delta_2 e^{-b_2 X'} + \dots + \delta_n e^{-b_n X'} \quad (7.44)$$

где  $\delta_1, \delta_2 \dots \delta_n$  – относительное содержание каждой фракции примесей в воде, поступающей в осветлитель;  
 $C_0$  – их суммарная концентрация;  
 $C_1$  – суммарная концентрация всех мелких частиц, изменяющаяся в процессе осветления.

Анализ уравнения (7.44) позволяет заключить, что при кондиционировании вод с однородной взвесью подобие процессов во взвешенном слое сохраняется только для различных режимов обработки воды одинакового качества. Равным значениям размерного комплекса (7.41) отвечает одинаковый эффект водообработки. Этот вывод имеет важное значение для расчета и проектирования осветлителей со взвешенным осадком, так как позволяет в каждом случае адекватно заданному эффекту осветления воды назначать расчетную скорость восходящего потока и толщину слоя взвешенного осадка с учетом физико - химических свойств исходной воды и взвеси. Для этого в лабораторных условиях на модели осветлителя при определенном режиме его работы получают экспериментальную кривую зависимости  $C_1/C_0 - f(x)$ , называемую кривой осветления. Затем по заданному эффекту осветления  $P = C_1/C_0$  с помощью кривой определяют необходимую толщину слоя взвешенного осадка  $x_1$  соответствующую этому эффекту осветления воды на модели. Перерасчет результатов, полученных на модели для проектирования натурального сооружения, в соответствии с выводами о подобии процессов производится по формуле

$$(C_x x/v)_n = (C_x x/v)_m = X' = \text{const.}$$

При этом концентрация взвешенного осадка  $C_x$  и скорость восходящего потока воды  $v$ , согласно теории стесненного осаждения, связаны соотношением (7.37). Очевидно, что

размерный комплекс следует рассматривать как некоторую обобщенную характеристику качества обрабатываемой воды, учитывающую совокупное влияние физико-химических свойств примесей и воды на процесс адсорбции взвеси на хлопьях взвешенного осадка. При обработке вод различного качества в осветлителях необходимый эффект их кондиционирования достигается при различных значениях  $X$ .

### 23.4.2. Конструкции осветлителей

Осветлители со слоем взвешенного осадка классифицируют следующим образом: с предварительным образованием хлопьев в камерах реакции и без них; по рабочему давлению - на открытые и напорные; по способу удаления избытка осадка с естественным отбором и с принудительным отсосом; по расположению осадкоуплотнителя - с вертикальным, поддонным и выносным. Отечественная практика эксплуатации осветлителей показала, что поддержание взвешенного слоя осадка на заданном уровне и определенной концентрации и обеспечение тем самым устойчивой работы аппарата возможно только при наличии регулируемого непрерывного принудительного удаления избыточного осадка из взвешенного слоя в осадкоуплотнитель. Поэтому в отечественной практике применяют осветлители с принудительным отсосом осадка и расчетные параметры, приведенные в СНиПе, относятся к этому типу аппаратов.

Основными условиями надежной работы осветлителей являются равномерное распределение обрабатываемой воды по площади зоны взвешенного осадка, равномерный сбор и отведение осветленной воды, а также рациональная организация непрерывного отвода избытка осадка в осадкоуплотнитель. Практика показала, что наличие распределительных дырчатых днищ в осветлителях приводит к нарушению нормальной работы аппаратов из-за завала осадком части их площади. Только при осветлении маломутных цветных вод осветлители с дырчатым дном типа ВНИИГС - 2 работают устойчиво, без завала дырчатых днищ осадком. При обработке мутных вод с современных конструкциях осветлителей дырчатые днища устранены, а нижняя их часть выполнена в виде наклонных, сходящихся книзу стенок (см. рис. 7.28,а). Прямоугольная форма осветлителя обуславливает простоту его компоновки в пределах здания водоочистного комплекса. При использовании коридорных осветлителей на маломутной и цветной воде процесс хлопьеобразования протекает малоэффектно. Для его интенсификации целесообразно произвести пригрузку водораспределительных труб гравием или щебнем. В гравийном слое благодаря тесному контакту\* воды с хлопьями процесс хлопьеобразования протекает с образованием плотных и крупных хлопьев, обеспечивающих затем хороший эффект обработки воды. Пригрузку производят на высоту 70 см, крупность зерен гравия или щебня - 20 - 50 мм. Их механическая прочность и химическая стойкость должны соответствовать требованиям, предъявляемым к фильтрующей загрузке. Применение осветлителей со взвешенным осадком с гравийной пригрузкой распределительных труб благодаря совершенствованию гидравлической характеристики сооружения и улучшению процесса формирования взвеси позволяет увеличить их производительность на 15 - 20 % и сократить при этом расход коагулянта на 15 - 20 %.

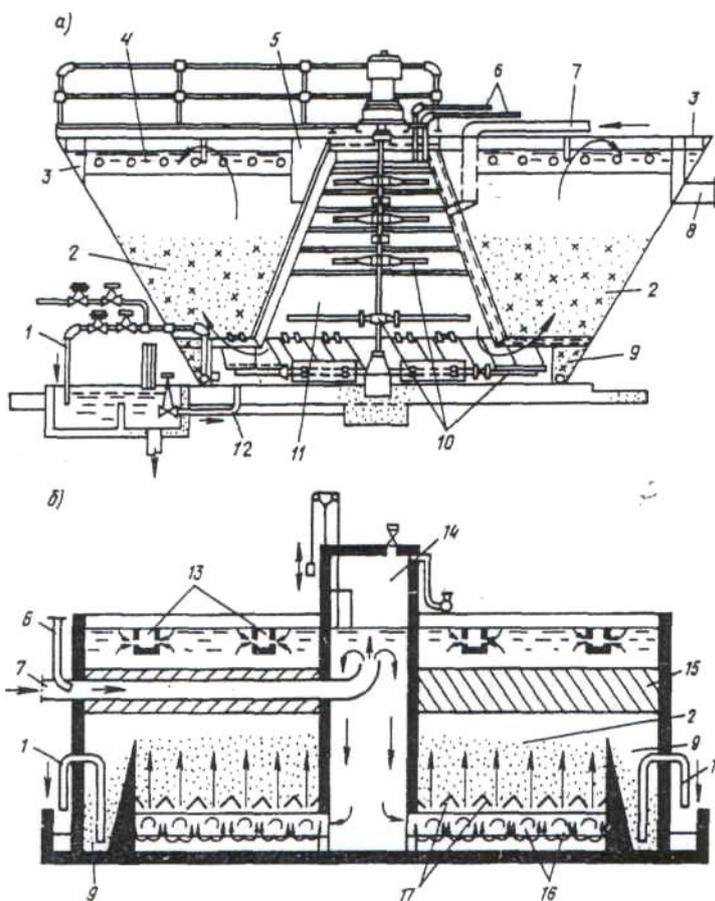
С той же целью в осветлители с вертикальными осадкоуплотнителями при обработке маломутных цветных вод вносят специальную контактную массу из зерен кварцевого песка ПТП дробленого керамзита крупностью 0,1 - 0,15 мм из расчета 10 - 12 кг на 1 м<sup>2</sup> площади взвешенного слоя. Зерна взвешенной контактной массы являются центрами коагуляции примесей воды, способствуя интенсификации ее обработки и позволяя увеличить производительность аппарата на 15 - 20 %. Круглый в плане осветлитель с поддонным осадкоуплотнителем занимает меньшую площадь, но для него требуется значительная высота (см. рис. 7.28,б).

В системах производственного водоснабжения получили распространение напорные осветлители с выносным осадкоуплотнителем (см. рис. 7.28,в). Они характеризуются компактностью и возможностью автоматизации их работы.

Хорошо себя зарекомендовали при осветлении, умягчении и обескремнивании воды осветлители ЦНИИ - 3 конструкции Е.Ф.Кургаева. Их большая высота (до 9 м при диаметре до 12 м) при небольшом объеме осадкоуплотнителя выгодно отличает эти аппараты от подобных при реагентом умягчении и обескремнивании, когда необходим длительный контакт обрабатываемой воды со взвешенным осадком.

За рубежом осветление воды с использованием слоя взвешенного осадка в основном применяют в конструкциях осветлителей двух типов: с камерами хлопьеобразования (пресипитаторы, акселейторы) и без камер (реактиваторы, пульсаторы). Конструкции осветлителей, применяемых в США и Германии, характеризуются наличием встроенных камер хлопьеобразования с механическим перемешиванием воды с реагентами и осадком, что способствуют интенсификации процессов его осветления и умягчения (рис. 7.30,а). В осветлителях американских конструкций осадкоуплотнители гравитационного типа с малой продолжительностью уплотнения осадка как предусматривают, так и нет. В США также применяют осветлители коридорного типа, отличающиеся от отечественных коридорных аппаратов наличием встроенных флокуляторов с мешалками на горизонтальной оси и отсутствием принудительного удаления избытка взвешенного осадка.

На рис. 7.30,б показана схема суперпульсатора, сущность работы которого заключается в пульсирующей подаче осветляемой воды (с помощью вакуумной камеры) под слой взвешенного осадка, что препятствует оседанию его на дно и образованию завалов. Взвешенный слой совершает возвратно - поступательное движение и может увеличиваться в объеме за счет примесей обрабатываемой воды и реагентов. Отличительной особенностью аппарата является размещение в слое взвешенного осадка под углом  $60^\circ$  тонкослойных модулей с отражателями на нижней стороне каждой полки, что способствует формированию медленного зигзагообразного движения воды. Благодаря этому в «суперпульсаторе» сочетаются преимущества обработки воды в слое взвешенного осадка, его пульсация, обеспечивающая более интенсивное коагулирование примесей воды и осаждение в тонком слое. Полки с отражателями, расположенными перпендикулярно илосборнику, дают возможность поддерживать в 2 раза большую концентрацию осадка во взвешенном слое при тех же скоростях восходящего потока, чем обычно. Это обеспечивает стабильный эффект обработки воды при восходящей скорости до 3 - 4 мм/с.



**Рис. 7.30. Прессипитатор конструкции Ч. Сполдинга (а) и суперпульсатор (б)**

1 - сброс осадка; 2 - слой взвешенного осадка; 3, 4 - кольцевой и радиальный водосборный лоток; 5 - кольцевой воздухоотделитель; 6 - подача реагентов; 7, 8 - подача исходной и отвод осветленной воды; 9 - гравитационный осадкоуплотнитель; 10 - мешалки; 11 - флокулятор; 12 - опорожнение; 13 - сборный лоток; 14 - вакуумная камера; 15 - тонкослойные элементы; 16 - перфорированные распределительные трубы; 17 - гасители

Верхняя граница взвешенного слоя обусловлена переливом в илосборник, в котором не действуют силы, вызывающие движение воды вверх, где и происходит осаждение осадка. Сбор и удаление осветленной воды осуществляются системой перфорированных труб, примыкающих к торцевому сборному лотку.

Большинство зарубежных конструкций осветлителей отличаются большими площадями аппаратов в плане (до 1000 м<sup>2</sup> и более), отсутствием принудительного отсоса осадка из взвешенного слоя в осадкоуплотнитель, сложностью конструктивного оформления, определенными эксплуатационными трудностями.

Современные отечественные конструкции осветлителей значительно проще и надежнее по своему устройству и эксплуатации, а поэтому экономичнее при строительстве. Системы принудительного отсоса осадка в отечественных конструкциях осветлителей обеспечивают их стабильную работу, а простая и рациональная конструкция аппаратов позволяет получить высокий эффект осветления воды при минимальных эксплуатационных затратах.

### 23.4.3. Расчет и проектирование осветлителей

Расчет и проектирование осветлителей выполняют с учетом годовых колебаний качества обрабатываемой воды, ориентируясь на характерные периоды: минимальной мутности при минимальном зимнем расходе воды и максимальной мутности при наибольшем, ей соответствующем, летнем расходе воды. Определяющими расчетными параметрами работы осветлителей являются скорость восходящего движения воды в зоне осветления  $v_{ос}$ , определяемая по результатам технологических исследований, и коэффициент распределения воды между зоной осветления и зоной отделения осадка  $K$ . При отсутствии данных эксперимента эти величины определяют по табл. 7.8.

Таблица 7.8.

Мутность исходной	$K_p$	$v_{ос}$ , мм/с в период
-------------------	-------	--------------------------

воды, мг/л		зимний	летний
50 - 100	0,7 - 0,8	0,5 - 0,6	0,7 - 0,8
101 - 400	0,8 - 0,7	0,6 - 0,8	0,8 - 1,0
401 - 1000	0,7 - 0,65	0,8 - 1,0	1,0 - 1,1
1001 - 1500	0,64 - 0,6	1,0 - 1,2	1,1 - 1,2

Примечание: Нижние пределы  $v_{oc}$  принимают для хозяйственно-питьевых водопроводов.

Зная расчетный расход воды  $q$ ,  $m^3/ч$ , площадь зоны осаждения воды определяют по формуле

$$A_{от} = qK_p / 3,6 v_{oc},$$

а площадь зоны отделения и уплотнения осадка - по формуле

$$A_{от} = q(1 - K_p) / 3,8 v_{oc}.$$

При встраивании в зонах осветления, отделения и уплотнения осадка тонкослойных модулей площадь зоны осветления определяют по удельным нагрузкам, отнесенным к площади зеркала вод, запятой тонкослойными блоками: мутных - 4,6 - 5,5; средней мутности - 3,6 - 4,5; маломутных и цветных вод, обработанных коагулянтном, - 3 - 3,5  $m^3/(ч \cdot m^2)$ .

Высоту взвешенного слоя принимают 2 - 2,5 м, потерю напора в нем определяют из расчета 1 - 2 см на 1 м его высоты, а высоту зоны осветления - 2 - 2,5 м. В осветлителе коридорного типа угол между наклонными стенками нижней части зоны взвешенного осадка принимают 60 - 70°. Низ осадкоприемных окон или кромку осадкоотводящих труб располагают на 1 - 1,5 м выше перехода наклонных стенок зоны взвешенного осадка в вертикальные. Осадкоприемные окна рассчитывают по скорости движения воды с осадком 36 - 54 м/ч, а осадкоотводящие трубы - 144 - 216 м/ч. Высота стенок должна на 0,3 м превышать расчетный уровень воды в нем. Шаг сборных желобов с треугольными водосливами или перфорированными трубами в зоне осветления принимают не более 3 м. Для круглых в плане осветлителей диаметром до 4 м устраивают только периферийный желоб, а при большем диаметре добавляют радиальные: при диаметре аппарата 4 - 6 м - четыре - шесть радиальных желобов, а при диаметре 6 - 10 м - шесть - восемь желобов. Высоту водосливов принимают 4 - 6 см, а расстояние между их осями 10 - 15 см при угле между кромками водослива 60°. Расчетная скорость движения воды в сборных желобах или трубах 0,5 - 0,6 м/с.

Распределителем обрабатываемой воды по площади осветлителя производят перфорированными трубами, размещаемыми на расстоянии не более 3 м в осях и рассчитываемыми по скорости движения воды 0,5 - 0,6 м/с. Суммарную площадь отверстий в них диаметром не менее 25 мм определяют по скорости выхода воды  $L, 5 - 2$  м/с, а расстояние между отверстиями, располагаемыми вши под углом 45° по обе стороны трубы в шахматном порядке, принимают до 0,5 м.

Объем зоны накопления и уплотнения осадка рассчитывают по формуле (7.20), продолжительность уплотнения принимают 2 - 3 ч при наличии сгустителей и не менее 6 ч - при их отсутствии. Угол между наклонными стенками осадкоуплотнителя принимают 70°. Удаление осадка из осадкоуплотнителя производят периодически перфорированными трубами диаметром не менее 150 мм не более чем за 15 - 20 мин. Расстояние между осями соседних труб (канатов) принимают до 3 м. Скорость входа осадка в отверстия диаметром не менее 20 мм, располагаемым с шагом до 0,5 м, назначают до 3 м/с, а скорость движения осадка в конце сбросной трубы не менее 1 м/с. Количество удаляемой с осадком воды определяют по СНиПу с учетом коэффициента разбавления осадка, равным 1,5.

Во избежание подсоса в осадкоуплотнитель осветленной воды и для направленного отведения осадка в осадкоуплотнитель осадкоприемные окна и трубы перекрывают козырьками. Сбор и отведение осветленной воды из осадкоуплотнителя производят затопленными перфорированными трубами, рассчитываемыми по скорости движения в них воды до 0,5 м/с, с отверстиями диаметром 15 - 20 мм при скорости входа воды в них не менее 1,5 м/с. Верх водосборных дырчатых труб располагают не менее чем на 0,3 м ниже уровня воды в вертикальном осадкоуплотнителе и не менее чем на 1,5 м выше верха осадкоприемных окон. Сборные перфорированные трубы для отвода осветленной воды из поддонных осадкоуплотнителей располагают под герметичным перекрытием. На водосборных трубах при выходе их в сборный канат (карман) или при присоединении к отводному трубопроводу устанавливают дросселирующую задвижку, регулирующую величину отсоса избытка осадка из взвешенного слоя. Между низом сборной трубы и уровнем воды в общем, сборном канале осветлителя должен быть перепад не, менее 0,4 м. При числе осветлителей меньше шести следует предусматривать один резервный.

## **23.5. ОБРАБОТКА ВОДЫ ФЛОТАЦИЕЙ**

### **23.5.1. Теоретические основы и методы флотации**

Сущность процесса флотации состоит в специфическом проявлении молекулярных сил, способствующих слипанию взвешенных примесей воды с пузырьками высокодиспергированного в воде газа, всплыванию образующихся агрегатов и формированию на поверхности воды пенного слоя, насыщенного извлеченными веществами. Флотируемость примесей различной крупности определяется размерами пузырьков газа ( $15 \cdot 10^{-6}$  -  $30 \cdot 10^{-6}$  м), которые зависят от поверхности натяжения на границе вода - газ. При понижении поверхностного натяжения до 0,06 - 0,065 н/м и ниже эффект очистки воды флотацией повышается в отличие от процессов отстаивания и фильтрования. Предварительное коагулирование примесей воды повышает эффект флотации, так как понижает поверхностное натяжение.

При сближении газового пузырька с гидрофобной поверхностью частички взеси разделяющей их тонкий слой воды при достижении определенного критического значения становится неустойчивым и разрывается. Вероятность слипания пузырька и взеси при их кратковременном (0,001 - 0,002 с) контакте определяется кинетикой формирования краевого угла смачивания. Очевидно, что масса флотируемых частичек не должна превышать силы их прилипания к газовым пузырькам и подъемной силы последних. Как показала практика, оптимальная крупность флотируемых примесей находится в пределах  $10^{-3}$  -  $10^{-1}$  см.

Улучшение процесса флотации достигают гидрофобизацией поверхности примесей коагулянтами и флокулянтами, которые, сорбируясь на поверхности удаляемых частичек, понижают их смачиваемость, что интенсифицирует прилипание примесей к пузырькам газа. Образующиеся гидроксиды алюминия (III) и железа (III), сортируя примеси воды, формируют сверхмицеллярные агрегаты с гидрофобной поверхностью. Использование коагулянтов позволяет значительно повысить эффективность флотационной очистки и удалять загрязнения, находящиеся в воде в виде стойких эмульсий и взвесей, а также в коллоидном состоянии. После флотационного разделения гидрофобный осадок отработанных гидроксидов занимает значительно меньший объем и влажность его ниже влажности осадка, полученного при декантировании.

Существует несколько видов флотации, среди которых по размерам пузырьков газа или воздуха можно выделить:

флотацию с выделением из воды воздуха - установки вакуумные, эрлифтные и напорные;  
флотацию с механическим диспергированием воздуха - установки безнапорные (пенные), импеллерные и пневматические; электрофлотацию.

При обработке природных вод наиболее эффективна напорная флотация, при которой в части воды (до 10 %) в напорном резервуаре растворяется воздух, а в другую часть обрабатываемой воды вводятся реагенты. При входе во флотационную камеру оба потока смешиваются. Подготовку водовоздушной смеси осуществляют в абсорберах (или напорных резервуарах) под давлением 0,6 - 0,8 МПа, куда подают воду после фильтров и воздух в количестве 0,9 - 1,2 % расхода очищаемой воды. В зоне меньшего давления из насыщенной воздухом воды выделяются мельчайшие пузырьки, необходимые для флотации легкой взвеси. Способ напорной флотации позволяет путем регулирования давления легко изменять количество растворенного воздуха и размер пузырьков, вводимых в обрабатываемую воду, в зависимости от состава взвеси в исходной воде.

Флотационные сооружения - флотаторы (рис. 7.31) применяют для предварительной обработки маломутных (до 150 мг/л) и цветных (до 200 град) вод, содержания планктон и плавающие нефтепродукты. Остаточная мутность воды после флотаторов 3 - 5 мг/л (до 10 мг/л).

Преимущества флотаторов перед осветлителями со взвешенным осадком и отстойниками заключаются в следующем:

интенсифицируется процесс выделения взвеси из воды, поэтому уменьшается общий объем очистных сооружений;

эффективно удаляется фитопланктон, что позволяет отказаться от микрофильтров;

удаляются из воды плавающие и плохооседающие примеси;

улучшается санитарное состояние очистных сооружений вследствие постоянного удаления выделенных загрязнений.

При напорной флотации в жидкости происходит ряд процессов: растворение и выделение воздуха, прикрепление воздушных пузырьков к частицам взвеси и всплывание их на поверхность с образованием пены. Условия протекания этих процессов существенно влияют на эффект осветления воды. Важное значение также имеют условия и способы удаления пены, поэтому необходимо рассмотреть принцип действия и конструктивные особенности всех основных элементов схемы: узла подготовки водовоздушного раствора, распределителей для выделения воздуха из водовоздушного раствора, флотационной камеры и устройств для сбора и отведения пены.

Количество воздуха, которое может быть растворено в воде, зависит от давления, температуры, времени насыщения и способа их взаимодействия. Эта зависимость описывается уравнением

$$X = pV (1 - \exp(-Rt)),$$

где  $X$  - количество воздуха, растворенного в воде, мг/л;

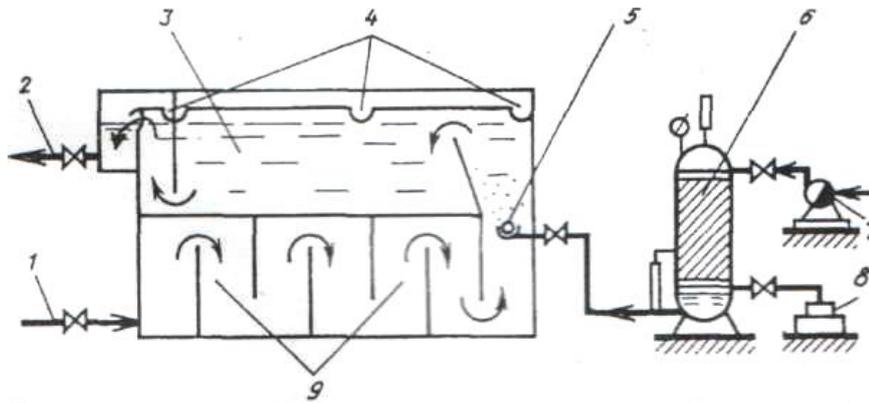
$p$  - давление насыщения, Па;

$V$  - растворимость воздуха в воде, мг/л;

$R$  - константа скорости растворения, мин<sup>-1</sup>;

$t$  - время насыщения, мин.

Давление влияет не только на количество воздуха, которое может быть растворено в воде, но и на размер выделяющихся затем пузырьков. По В.А.Глембоцкому, это давление колеблется в широких пределах - от  $3 \cdot 10^2$  до  $9 \cdot 10^2$  МПа, что связано с характеристикой выделяемой взвеси.



**Рис. 7.31. Флотационная установка**

1, 2 - подача исходной воды с реагентами и отвод осветленной; 3 - флотационная камера; 4 - лотки сбора пены; 5 - система распределения водовоздушной смеси; 6 - напорный бак; 7,8 - насос и компрессор; 9 - перегородчатая камера хлопьеобразования

Минимальный размер пузырьков воздуха, см, образующихся при понижении давления, определяется уравнением

$$R_{\min} = 2\sigma_{\text{г-ж}} / (p_1 - p_2)$$

где  $\sigma_{\text{г-ж}}$  - поверхностное натяжение на границе раздела газ-жидкость, МН/м;  
 $p_1 - p_2$  - перепад давления, Па.

По В.И.Классену возникновение пузырьков воздуха из перенасыщенного раствора происходит практически мгновенно. Для определения количества пузырьков  $N_t$ , образующихся при этом, можно воспользоваться формулой

$$N_t = 0,03 \frac{K^3 (C - C_1)^4}{\sigma_{\text{г-ж}}^3 \rho \lambda} \quad (7.46)$$

где  $K$  - где константа Генри, Па;  
 $C - C_1$  - перенасыщение водовоздушного раствора, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho$  - плотность газа в пузырьках, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\lambda$  - линейная скорость роста пузырьков, см/с.

Прикрепление пузырьков к частице характеризуется краевым углом смачивания, в который образуется поверхностью минеральной частицы и касательной к поверхности пузырька. Значение краевого угла определяется размерами частицы и пузырька, а также поверхностным натяжением на границе раздела трех фаз: твердого тела (частицы), жидкости и воздуха. Для системы, находящейся в равновесии, должно выполняться условие:

$$\sigma_{\text{г-ж}} \cos \theta + \sigma_{\text{г-ж}} = \sigma_{\text{т-г}}$$

где  $\sigma_{\text{г-ж}}$  - поверхностное натяжение на границе газа и жидкости, МН/м;  
 $\sigma_{\text{г-ж}}$  - поверхностное натяжение на границе твердого тела и жидкости, МН/м;  
 $\sigma_{\text{т-г}}$  - поверхностное натяжение на границе твердого тела и газа, МН/м;  
 $\theta$  - краевой угол смачивания, град;  
 $F$  - сила, удерживающая пузырек на поверхности твердого тела, Н.

Запас свободной энергии флотационной системы до прилипания

$$W_1 = A_{г-ж} \sigma_{г-ж} + A_{т-ж} \sigma_{т-ж}$$

где  $A_{г-ж}$  - площадь поверхности раздела газа и жидкости, м<sup>2</sup>;  
 $A_{т-ж}$  - площадь поверхности раздела твердой частицы и жидкости, м<sup>2</sup>.

Запас свободной энергии системы после прилипания

$$W_2 = (A_{г-ж} - 1) \sigma_{г-ж} + \sigma_{т-ж} + (A_{т-ж} - 1) \sigma_{г-ж},$$

Прилипание твердой частицы к пузырьку возможно, если  $W_1 - W_2 > 0$ ;

$$W_1 - W_2 = \Delta W = \sigma_{г-ж} + \sigma_{т-ж} - \sigma_{т-г} > 0. \quad (7.47)$$

В жидкости, проходящей через флотационную камеру, возникают силы, стремящиеся оторвать твердые частицы от пузырьков воздуха: силы трения, силы тяжести, силы инерции. Для успешного протекания процесса флотации необходимо, чтобы твердые частицы и пузырьки воздуха прочно прикрепились друг к другу. Сила прилипания  $F_a$  действует по периметру площади контакта:

$$F_{пр} = \pi d \sigma_{г-ж} \sin \theta. \quad (7.48)$$

где  $d$  - диаметр площади контакта, м;  
 $\sigma_{г-ж}$  - поверхностное натяжение на границе раздела газ - жидкость, МН/м;  
 $\theta$  - краевой угол смачивания.

Динамика процесса напорной флотации природных вод должна рассматриваться с момента начала движения пузырьков воздуха (после их выделения из водовоздушного раствора). Первым этапом этого процесса является приближение и прикрепление пузырьков воздуха к хлопьям скоагулированной взвеси. С целью предотвращения разрушения этих хлопьев скорость подхода (столкновение) пузырьков воздуха к ним должна быть не более скорости движения обрабатываемой воды. Скоростью столкновения можно считать скорость подъема пузырьков после их образования. Для определения этой скорости можно воспользоваться уравнением

$$v_B = \frac{gr^2 (\rho_B - \rho_{ж})}{\eta} \quad (7.49)$$

где  $r$  - радиус пузырька, м;  
 $\rho_B$  - плотность воздуха, кг/м<sup>-3</sup>;  
 $\rho_{ж}$  - плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\eta$  - вязкость воды, Па с;  
 $g$  - ускорение свободного падения, Нм/с<sup>2</sup>

Расчеты показывают, что исходя из условий сохранения хлопьев скоагулированной взвеси размер пузырьков воздуха должен быть в пределах 20 - 80 мкм.

Для разработки методики расчета флотационных камер необходимо знать закономерность процесса флотации взвеси из воды по времени и определить величины, которые характеризуют кинетику флотации в целом. Ряд исследователей пытались

установить такие закономерности для удаления частиц из жидкости. Так, по К.Ф.Белоглазову, процесс флотации описывается уравнением

$$dx = KN (n - x) \alpha dt \quad (7.50)$$

где  $x$  - где число частиц, переходящих в пену из жидкости за время  $t$ ;  
 $K$  - коэффициент, учитывающий различные факторы, влияющие на флотацию;  
 $N$  - количество пузырьков воздуха, проходящих через жидкость и единицу времени;  
 $n$  - общее количество частиц в жидкости;  
 $\alpha$  - вероятность закрепления пузырька на частице.

Л.И.Шмидтом получено уравнение по определению эффекта осветления. При выводе уравнения им были сделаны допущения: закрепление пузырьков воздуха осуществляется только в результате столкновения с частицами примесей, пузырьки образуются в объеме жидкости за очень короткий промежуток времени с постоянной по всему объему плотностью, во время подъема пузырьков частицы не перемешиваются.

### 23.5.2. Конструкции флотаторов и их расчет

В состав флотационных установок входят флотационные камеры, камеры хлопьеобразования, узлы подготовки и распределения водовоздушной смеси, устройства для удаления и отвода пены. Флотационные камеры - флотаторы могут быть круглыми или прямоугольными в плане с горизонтальным и радиальным направлением движения воды. Наиболее часто применяют флотаторы с горизонтальным движением воды. Они могут иметь в плане квадратную и прямоугольную форму. Длина камеры назначается 3 - 9 м, ширина до 6 м, отношение ширины к длине 2/3 - 1/3. Глубина слоя воды во флотаторе принимается 1,5 - 2,5 м. Прямоугольные флотаторы чаще всего бывают вытянуты в плане по ходу движения воды (см. рис. 7.31), однако на некоторых установках для очистки природных и сточных вод флотаторы вытянуты в плане в направлении, перпендикулярном движению воды.

Для улучшения использования всего объема флотатора в некоторых случаях устанавливают продольные перегородки. Во входной части прямоугольной флотационной камеры струенаправляющую перегородку размещают под углом 60 - 70° к горизонтали в сторону движения воды. Днище флотационной камеры имеет уклон 0,01 к трубопроводу для опорожнения.

Скорость входа обрабатываемой воды во флотатор не должна превышать скорости ее выхода из камеры хлопьеобразования, поэтому скорость движения обрабатываемой воды над струенаправляющей перегородкой назначают 0,016 - 0,02 м/с. Равномерное распределение водовоздушной смеси в объеме обрабатываемой воды и формирование мелких воздушных пузырьков достигаются устройством перфорированного или пористого трубопровода и размещенного под ним на расстоянии 8 - 10 см кожуха из материала, стойкого к кислородной коррозии. Распределительную трубу располагают на расстоянии 0,25 - 0,35 м от дна во входной части флотатора в отсеке, образованном торцевой стенкой аппарата и струенаправляющей перегородкой. Скорость выхода водовоздушной смеси из отверстий распределителя принимают 20 - 25 м/с, диаметр отверстий 3 - 5 мм. Отверстия следует располагать равномерно по нижней образующей трубы линейно.

Сбор и отвод осветленной воды из флотатора должны производиться равномерно из нижней части камеры с помощью подвесной стенки, направляющей поток к отводу воды из аппарата, либо с помощью отводящей системы из перфорированных труб. Скорость движения воды под подвесной стенкой или в отверстиях водосборной системы принимают 0,8 - 1,2 м/с.

При строительстве новых очистных сооружений предпочтение следует отдавать флотаторам с горизонтальным движением воды прямоугольной формы в плане, совмещенным с

камерами хлопьеобразования, с целью предотвращения разрушения хлопьев, сформированных в процессе коагуляции взвеси в воде.

Образующуюся во флотаторе пену влажностью не менее 94 % удаляют либо кратковременным подъемом уровня воды с отводом ее через подвесные лотки, расположенные равномерно по площади камеры, либо с помощью скребковых механизмов, перемещающих пену к сборным лоткам. Потери воды при сбросе пены подъемом уровня воды принимают 1 - 1,5 % расхода обрабатываемой воды. При удалении пены скребковыми механизмами скорость движения скребков в прямоугольных камерах принимают до 0,02 м/с, в круглых - окружную скорость 0,015 - 0,02 м/с при частоте вращения 6 - 10 с<sup>-1</sup>. Днища лотков выполняют с уклоном 0,025 в сторону отвода пены. Верхние кромки лотков располагают на одной общей отметке на 10 - 15 мм выше уровня воды во флотаторе.

Флотационную камеру рассчитывают на удельную нагрузку 6 - 8 м<sup>3</sup>/ч на 1 м<sup>2</sup> площади. Продолжительность пребывания воды в камере до 40 мин. Высоту флотационной камеры и времени флотации находят по результатам технологических исследований по формуле

$$T_m/T_k = (H_m/H_k)^n,$$

где  $T_m$  и  $T_k$  - время флотации в модели и камере;  
 $H_m$  и  $H_k$  - высота слоя воды в модели и камере;  
 $n$  - показатель степени, принимаемый 0,45 - 0,65 в зависимости от качества обрабатываемой воды.

## Глава 24. ОБРАБОТКА ВОДЫ ФИЛЬТРОВАНИЕМ

### 24.1. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА. КЛАССИФИКАЦИЯ ФИЛЬТРОВ

Сущность процесса заключается в пропуске жидкости, содержащей примеси, через фильтрующий материал, проницаемый для жидкости и непроницаемый для твердых частиц. При этом процесс сопровождается значительными затратами энергии, допускать которые в технике водоочистки можно лишь при обработке небольших количеств воды. Это определяет место фильтровальных сооружений в технологической схеме; в большинстве случаев фильтрование является заключительным этапом обработки воды и производится после ее предварительного осветления в отстойниках, флотаторах или осветлителях. Водоочистные сооружения, на которых осуществляют процесс фильтрования, называются фильтрами. Фильтры по виду фильтрующей среды делятся на тканевые или сетчатые, каркасные или намывные (диатомитовые); зернистые (песчаные, керамзитовые и т.п.). Для водоснабжения плавательных бассейнов и других небольших водопотребителей широко применяют каркасные или диатомитовые фильтры.

Из вышеперечисленных трех групп фильтров наиболее значительной является последняя. Фильтры этой группы в технике водоснабжения применяют наиболее широко. Фильтры с зернистой загрузкой можно классифицировать по ряду основных признаков: 1) по скорости фильтрования: медленные (0,1 - 0,3 м/ч), скорые (5 - 12 м/ч) и сверхскоростные (36 - 100 м/ч); 2) по давлению, под которым они работают: открытые (или безнапорные), напорные; 3) по направлению фильтрующего потока; однопоточные (обычные скорые фильтры), двухпоточные (фильтры АКХ, ДЦФ), многопоточные; 4) по крупности фильтрующего материала: мелкозернистые, среднезернистые, крупнозернистые; 5) по числу фильтрующих слоев: однослойные, двухслойные, многослойные.

Пористая среда зернистых фильтров называется фильтрующим слоем, фильтрование воды через который происходит под действием разности давлений на входе в фильтр и на выходе из него. Эта разность называется потерей напора в фильтрующем слое. Разность давлений для открытого фильтра равна разности отметок поверхности воды в аппарате и пьезометрического

напора в трубе, отводящей профильтрованную воду (фильтрат). Потеря напора в начальный момент работы фильтра называется начальной потерей напора.

Интенсивность процесса фильтрации характеризуется скоростью фильтрации (м/ч), представляющей собой частное от деления расхода фильтруемой сверху вниз воды на площадь поверхности фильтрующего слоя. По мере загрязнения фильтрующего слоя, извлекаемыми из воды примесями потеря напора в нем возрастает до некоторой величины, характеризующей сопротивление предельно загрязненного фильтрующего слоя. По достижении предельной потери напора или при ухудшении качества фильтрата фильтрующей слой необходимо промыть, т.е. очистить от задержанных им загрязнений. Это достигается подачей промывной воды снизу вверх со скоростью превосходящей скорость фильтрации, что вызывает взвешивание фильтрующей загрузки и приводит к ее отмывке.

Схема устройства скорого открытого фильтра площадью до 30 м<sup>2</sup> показана на рис. 7.32. Коагулированная и прошедшая предочистку вода подается в боковой карман, а из него - в камеру фильтра. Высота слоя воды над поверхностью загрузки должна быть не менее 2 м. В процессе фильтрации вода проходит фильтрующий и поддерживающий слой, а затем поступает в распределительную систему, из нее в резервуар чистой воды. Максимальная потеря напора на фильтрующей допускается 2,5 - 3 м.

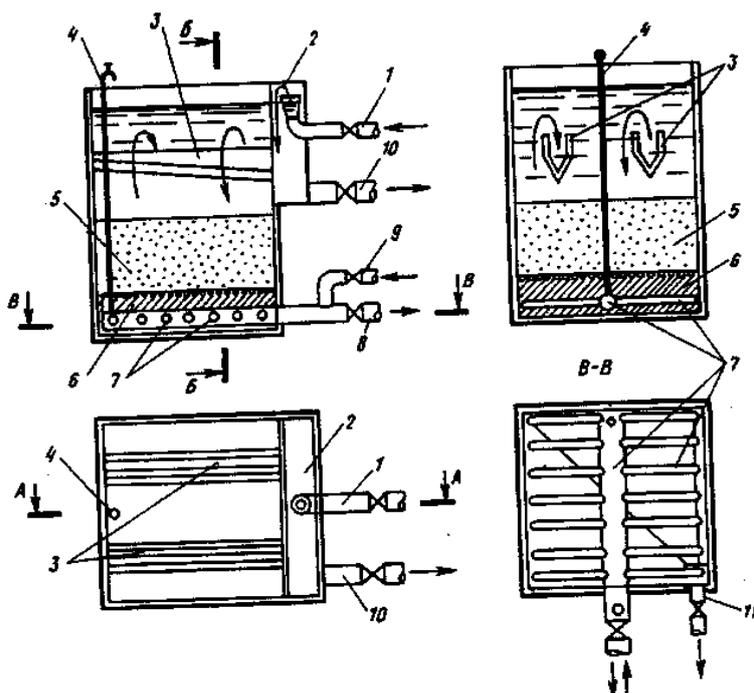
При промывке фильтров путем переключения соответствующих задвижек промывная вода поступает в распределительную систему и далее в фильтрующий слой, который она проходит снизу вверх и расширяет (взвешивает). Дойдя до верхней кромки промывных желобов, промывная вода вместе с вымытыми ею из фильтрующего материала загрязнениями переливается в желоба, а из них в боковой карман и отводится в водосток.

Расчетную скорость фильтрации  $v$  (6 - 10 м/ч) и толщину слоя однослойной фильтрующей загрузки  $h$  (0,7 - 2,0 м) в соответствии со СНиПом следует принимать в зависимости от крупности зерен фильтрующей загрузки (0,5 - 2,0 мм).

**Фильтрующий слой** выполняют из отсортированного материала, чаще всего речного кварцевого песка крупностью от 0,5 до 2,0 мм. Могут быть применены и другие материалы, удовлетворяющие санитарным требованиям и обладающие достаточной химической стойкостью и механической прочностью (дробленый антрацит, керамзит, керамическая крошка, дробленый мрамор, полимеры и др.). Чем крупнее зерна фильтрующего слоя, тем больше принимают его высоту. При фильтрации протекает процесс сорбции агрегативно неустойчивых примесей воды на поверхности зерен фильтрующего слоя. Глубина проникновения загрязнений в толщу фильтрующего слоя тем больше, чем больше скорость фильтрации, крупнее зерна фильтрующего слоя и чем меньше размеры частиц взвеси, которые должны быть задержаны фильтром.

**Поддерживающий слой** (0,45 - 0,5 м), на котором лежит фильтрующий слой, укладывают с целью, чтобы мелкий фильтрующий материал не вымывался из фильтрующего слоя и не уносился вместе с фильтруемой водой через отверстия распределительной системы. Поддерживающий слой в свою очередь состоит из слоев гравия или щебня разной крупности, постоянно увеличивающейся сверху вниз от 2 - 5 до 20 - 40 мм. Толщина каждого слоя также увеличивается сверху вниз. Недостатком поддерживающих слоев является возможность их смещения при промывке, что нарушает работу фильтра.

**Распределительная или дренажная система** является важным элементом фильтра, которая должна собирать и отводить профильтрованную воду без выноса зерен фильтрующего материала, а при промывке равномерно распределять промывную воду по площади фильтра. Для скорых фильтров применяют распределительные системы большого сопротивления. Равномерность распределения промывной воды по площади в таких системах достигается вследствие большого сопротивления движению воды через проходные отверстия.



**Рис. 7.32. Скорый открытый фильтр**  
 1, 8 - подача исходной и отвод фильтрованной воды; 2 - боковой карман; 3 - желоба; 4 - воздушник; 5, 6 - слой фильтрующей (песок, керамзит) и поддерживающей (гравий, щебень) загрузки; 7 - распределительная дренажная система; 9, 10 - подача и отвод промывной воды; 11 - опорожнение фильтра

Наиболее распространены трубчатые распределительные системы - чугунные, полимерные или стальные трубы с отверстиями диаметром 10 - 12 мм, укладываемые параллельно на расстоянии 0,25 - 0,35 м друг от друга в нижних слоях гравия и присоединяемые к коллектору (трубе большого диаметра или каналу), расположенному в середине днища фильтра параллельно его длинной стороне (см. рис. 7.32). Отверстия в трубах располагаются вертикально или в шахматном порядке в нижней части под углом 45° к вертикали. Общая площадь отверстий должна составлять 0,25-0,3 % площади фильтра.

В последние годы в России и за рубежом разработано много новых конструкций распределительных устройств. Из них наибольшее распространение получили колпачковые, пористые, сборные железобетонные и щелевые системы. Большим достоинством этих конструкций является то, что они дают возможность отказаться от поддерживающих слоев гравия, благодаря чему уменьшается высота и, следовательно, стоимость фильтра; кроме того, устраняется опасность неравномерного распределения воды из-за смещения поддерживающих слоев при промывке.

Щелевое распределительное устройство представляет собой систему труб со щелями или ложное щелевое дно. Ширина щелей должна быть на 0,1 мм меньше размера самой мелкой фракции загрузки. Для трубчатого щелевого дренажа следует применять трубы из нержавеющей стали либо полиэтилена серии С или Т. Щели располагают в шахматном порядке по всей поверхности труб. Общая площадь щелей составляет 1,5 - 2 % площади фильтра.

Колпачковая распределительная система представляет собой систему колпачков, монтируемых на дренажном (с отверстиями) дне фильтра или на распределительных трубах. Отечественная промышленность выпускает колпачки двух видов: щелевые пластмассовые (ВТИ - К) и фарфоровые (ВТИ) или пористые. Число колпачков должно быть не менее 35 на 1 м<sup>2</sup> рабочей площади фильтра. Общая площадь проходных отверстий всех колпачков должна составлять 0,8 - 1 % рабочей площади фильтра.

Распределительная система из пористых керамических или бетонных или, устраиваемая в виде промежуточного днища, также не требует поддерживающего слоя. Керамические плиты изготовляют размером 40x40x5 или 25x50x5 см из зерен корунда на керамической связке. После формовки плиты обжигают при температуре около 900 °С, благодаря чему они не поддаются действию влаги и растворов кислот, которые могут быть применены для очистки плит. Размеры пор в плитах в два с лишним раза больше размеров пустот в фильтрующем слое при среднем диаметре зерен песка 0,75 мм. Поэтому загрязнения, прошедшие через фильтрующий слой, проходят и через пористый дренаж, практически не загрязняя его.

Дренажные системы из пористого полимербетона изготавливают из заполнителя (гравия или щебня), скрепленного эпоксидным связующим, трех типов: в виде отдельных полимербетонных плит, сборных дырчатых железобетонных плит, в виде сплошной полимербетонной плит. Все три типа представляют собой ложное дно. Плиты первого типа имеют размер 25 - 35x50 - 60 см, а второго - квадратные 40 - 90x40 - 90 см. Толщина плит в обоих случаях 4 - 5 см. Третий тип дренажа - сплошная полимербетонная плита толщиной 4 - 5 см, изготавливаемая непосредственно в фильтре. Все три типа дренажа нуждаются в довольно сложной опорной системе с вертикальными стенками и колосниками.

Промывку скорых фильтров производят обратным током чистой профильтрованной воды путем ее подачи под необходимым напором в поддонное пространство или в дренажную трубчатую систему. Промывная вода, проходя с большой скоростью (в 7 - 10 раз больше, чем скорость фильтрования) через фильтрующую загрузку снизу вверх, поднимает и взвешивает ее. Зерна расширившегося песка, хаотично двигаясь, соударяются друг с другом, при этом налипшие на них загрязнения оттираются и попадают в промывную воду. Промывная вода вместе с вымытыми ею загрязнениями переливается через кромки сборных (промывных) желобов, расположенных над поверхностью фильтрующей загрузки, и отводится по ним в водосток. Желоба расположены на такой высоте, чтобы в них попали только вымытые из песка загрязнения, но не песок.

Количество промывной воды, приходящейся на 1 м<sup>2</sup> поверхности фильтра, называют интенсивностью промывки. По С.А.Шуберту она зависит от требуемого относительного расширения И типа загрузки, температуры воды и составляет от 12 до 18 л/(с · м<sup>2</sup>). Исходя из принятой интенсивности, производят расчет промывных устройств. Продолжительность промывки обычных скорых фильтров принимают равной 6 - 10 мин.

Поперечное сечение промывного желоба может быть с треугольным дном или полукруглым. Расстояние между желобами (по их осям) принимают в пределах 1,4 - 2,2 м. Дну желоба придается уклон 0,01 по ходу движения воды. Сборные желоба можно изготавливать из железобетона, металла или стеклопластика. В качестве сборного промывного устройства могут быть применены также дырчатые трубы, располагаемые ниже уровня воды, на расстоянии 0,7 - 0,8 м друг от друга.

Вода подается на промывку специальным промывным насосом из резервуара чистой воды или из канала профильтрованной воды. Можно подавать воду и самотеком из специально установленного на требуемой высоте промывного бака или промывной башни. Объем бака должен быть рассчитан на две промывки (при промывке одного фильтра) или на три промывки (при одновременной промывке двух фильтров).

При реагентном умягчении воды или реагентном обезжелезивании наряду с обычной промывкой целесообразно применять поверхностную промывку с целью отмычки загрязнений в верхнем слое загрузки. Ее можно производить с помощью неподвижных или вращающихся промывных труб.

## **24.2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ ФИЛЬТРОВАНИЕМ ЧЕРЕЗ ЗЕРНИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Известны ряд теорий процесса очистки воды фильтрованием, созданных отечественными и зарубежными исследователями. Наибольшее признание получила теория фильтрования малоцентрированных суспензий Д.М.Минца. Эта теория получила экспериментальное подтверждение и доведена до практического использования. С помощью технологического анализа процесса фильтрования, разработанного на основе этой теории, можно определять параметры процесса и использовать их в дальнейшем для расчета оптимального режима работы фильтровальных сооружений. В настоящей главе изложены физические понятия и закономерности процесса фильтрования согласно теории, разработанной Д.М.Минцем. При движении воды, содержащей взвешенные частицы, через зернистую загрузку, частицы взвеси задерживаются загрузкой и вода осветляется. Одновременно в толще загрузки накапливается осадок, вследствие чего уменьшается свободный объем пор, увеличивается гидравлическое сопротивление загрузки,

что приводит к росту потери напора в загрузке. Осветление воды путем фильтрования - это основной рабочий процесс фильтров и контактных осветлителей. Изменение гидравлического сопротивления фильтрующей загрузки и прирост потери напора - это сопутствующий процесс. Однако оба процесса в одинаковой мере должны учитываться при проектировании, расчете и эксплуатации фильтров.

Процесс осветления фильтруемой суспензии - результат двух противоположных процессов: адгезии задерживаемых частичек к макроповерхности и отрыва ранее прилипших частичек и переноса их гидродинамическими силами потока (суффозия). В каждом элементарном слое загрузки вода осветляется до тех пор, пока силы отрыва частичек не начинают превалировать над силами адгезии или аутогезии (взаимодействие между частичками в прилипшем слое). Накопление осадка в зернистом слое приводит к увеличению сил отрыва частичек. При очистке воды процесс фильтрования важен в той стадии, когда прилипание частичек превалирует над их отрывом. Величина силы адгезии в водной среде определяется в основном межмолекулярным взаимодействием соприкасающихся тел; она на несколько порядков ниже, чем сила адгезии в воздухе. Кроме того, в водной среде возникают силы отталкивания, обусловленные свойствами последних.

Силы адгезии зависят от свойств воды и соприкасающихся поверхностей. Если последние резко различаются по смачиваемости, то адгезия минимальна. В водной среде она достигает максимального значения при одинаковой гидрофильности или гидрофобности поверхностей. Однако слипание гидрофобных поверхностей больше, чем гидрофильных. По Р.И.Аюкаеву, силы отталкивания, появляющиеся в водной среде, обусловлены расклинивающим действием тонкого слоя жидкости, находящегося между поверхностями соприкасающихся тел. Расклинивающее действие таких слоев объясняется отличием их термодинамического и химического потенциалов от потенциалов объемной фазы.

Отрыв частички под действием водного потока происходит в случае, если сила  $F_{отр}$  превышает силу адгезии  $F_{ад}$  и массу частичек  $P$ , т.е.

$$F_{отр} > \mu(F_{ад} + P),$$

где  $\mu$  - сила трения

$$\text{Если } F_{отр} > P, \text{ то } F_{отр} \geq \mu F_{ад}.$$

Сила воздействия потока на частичку зависит от плотности и вязкости среды, диаметра частичек, скорости потока и условий обтекания прилипших частичек потоком. Д.М.Минц установил, что изменение концентрации взвеси в воде при фильтровании ее через зернистый слой описывается уравнением

$$C/C_0 = f(X, T),$$

где  $C$  - концентрация взвеси в воде в данный момент времени  $t$ ;

$C_0$  - концентрация взвеси в исходной воде;

$X$  и  $T$  - критерии подобия процесса;

$X = bx$ ;  $T = at$ , здесь  $x$  - толщина зернистого слоя;  $t$  - время, прошедшее от начала процесса;  $b$  и  $a$  - параметры процесса, определяемые методами теории размерности

$b = \beta v^2 d^{\lambda_1} x$ ;  $a = \alpha v^2 d^{\lambda_2}$ ; где  $v$  - скорость фильтрования;  $d$  - диаметр зёрен загрузки;  $\beta$  и  $\alpha$  коэффициенты, учитывающие совокупное влияние физических и физико-химических свойств воды и взвеси; отсюда  $X = \beta v^2 d^{\lambda_1} x$ ;  $T = \alpha v^2 d^{\lambda_2} t$

Для процессов, протекающих при фильтровании воды на фильтрах с различной загрузкой и скоростью фильтрования, коэффициенты  $\beta$  и  $\alpha$  будут одинаковыми и могут не учитываться в расчетах. В таких случаях критерии подобия имеют вид:

$$X = \beta v^2 d^{\lambda_1} x; T = \alpha v^2 d^{\lambda_2} t$$

Обработкой большого количества экспериментальных данных установлено, что показатели степени при  $v$  и  $d$  в широком диапазоне изменения скоростей фильтрования и размеров зерен загрузки при разнообразном составе фильтруемой воды практически не изменяются и составляют:  $\varepsilon_1 = -0,7$ ;  $\varepsilon_2 = 1,0$ ;  $\lambda_1 = -1,7$ ;  $\lambda_2 = -1,0$  Таким образом,

$$b = \beta \frac{1}{v^{0,7} d^{1,7}}; a = \alpha \frac{v}{d};$$

$$X' = \frac{x}{v^{0,7} d^{1,7}}; T' = \frac{tv}{d}.$$

Из уравнения  $C/C_0 = f(X, T)$  следует, что при  $C/C_0 = const$  между критериями  $X$  и  $T$  должна существовать зависимость. Экспериментально установлено, что эта зависимость имеет вид:

$$X' = KT' + X'_0$$

Подставив в это уравнение выражения для  $X'$  и  $T'$ , получим формулу для определения продолжительности защитного действия зернистой загрузки  $t_3$ :

$$t_3 = \frac{1}{K^2} \left( \frac{x}{v^{0,7} d^{1,7}} - \frac{X'_0 d}{v} \right);$$

$$t_3 = \frac{1}{K} \frac{b}{a} \left( x - \frac{X_0}{b} \right), \quad (7.51)$$

где  $X_0$  и  $K$  - константы, зависящие только от  $C/C_0$  и принимаемые по составленным Д.М.Минцем диаграммам;

$b$  - параметр, характеризующий интенсивность прилипания;

$b/a$  - параметр, характеризующий скорость проникания хлопьев в глубь загрузки (эта скорость уменьшается с увеличением прочности хлопьев).

Как следует из формулы (7.51), продолжительность защитного действия загрузки возрастает с увеличением толщины слоя и прочности осадка и уменьшается с увеличением скорости фильтрования и размеров зерен загрузки.

Продолжительность работы фильтра до момента достижения предельной потери напора  $H$  определяется формулой

$$t_n = bx(H_{np} - H_0)/aH_0F(A), \quad (7.52)$$

где  $H_0$  - потеря напора в чистой загрузке;

$$F(A) = h/t \cdot b/ai_0 \quad (h = H_{np} - H_0);$$

$h/t$  - темп прироста потери напора в фильтре;

$i_0$  - гидравлический уклон в чистой загрузке).

Определив методом технологического моделирования процесса фильтрования параметры  $b$  и  $a$ , параметры фильтрования ( $v$ ,  $d$ ,  $x$ ) подбирают так, чтобы процесс протекал в условиях оптимального режима.

Критерием оптимальности процесса служит соотношение между  $t_3$  и  $t_n$ . В технологическом и экспериментальном отношении оптимальным является режим, при котором  $t_n = t_3$ . Однако с точки зрения санитарной надежности,  $t_3$  должно быть несколько больше, чем  $t_n$  т.е.  $t_3 = 1,2t_n$ .

Поскольку подбор загрузки фильтра и выбор скорости фильтрования проводится обычно для какого - то определенного (среднего или характерного для данных местных условий) случая, то изменение физико - химических свойств воды источника или технологического режима

водоочистного комплекса (например, изменение дозы коагулянта) приводит к изменению свойств фильтруемой суспензии и тем самым свойств образующегося в порах загрузки осадка. Это в свою очередь вызывает отклонение от оптимального режима фильтрования. Эффективным методом ведения фильтрования в оптимальном режиме является воздействие на адгезионные свойства фильтруемой взвеси и свойства отложений в зернистой загрузке. Способность флокулянтов увеличивать плотность и прочность хлопьев гидроксидов позволяет использовать их для направленного регулирования указанных свойств и, следовательно, оптимизации режима фильтрования. Практически это достигается введением определенной дозы флокулянта непосредственно перед фильтрующей загрузкой.

### 24.3. СКОРЫЕ ФИЛЬТРЫ

При фильтровании воды через слой зернистого материала в зависимости от заряда и соотношения размеров примесей воды и зерен фильтрующей загрузки могут наблюдаться три вида фильтрования: 1) задержание примесей на поверхности фильтрующего слоя (пленочное фильтрование), описываемое формулой Хацена  $\delta = 0,01 (d_{\text{эф}}v)^{0,5}$ , где  $\delta$  - диаметр наименьших задерживаемых частиц, мм;  $d_{\text{эф}}$  - эффективный диаметр зерен загрузки, мм;  $v$  - скорость фильтрования до 10 м/ч; 2) задержание примесей в порах фильтрующего слоя (объемное фильтрование); 3) одновременное образование примесями пленки и их отложение в порах загрузки.

В большинстве случаев на современных фильтрах пленка не образуется и примеси вместе с водой проникают в толщу фильтрующего слоя, при этом глубина проникания загрязнений в толщу загрузки тем больше, чем больше скорость фильтрования, крупнее зерна фильтрующего слоя и чем меньше размеры частиц взвеси, извлекаемых из воды. На пленочном фильтровании основана работа медленных фильтров. Это процесс чисто механического извлечения из воды диспергированных примесей. В основе объемного фильтрования лежит предварительное коагулирование примесей воды с целью уменьшения и ликвидации их заряда. Так как при обычных значениях рН исходной воды поверхность зерен фильтрующего материала и частицы примесей воды несут отрицательный заряд, взвесь в порах фильтрующего слоя задерживается плохо.

**Фильтрующий слой** (см. рис. 7.32) выполняют из отсортированного зернистого материала, удовлетворяющего требуемому фракционному составу, определенной однородности  $K_n$ , санитарным требованиям и обладающего достаточной химической стойкостью и механической прочностью (кварцевый песок дробленый антрацит, горелые породы, керамзит, керамическая крошка, доменные шлаки, дробленый мрамор, полимеры и др.), а также низкой стоимости.

Фильтрующая загрузка - основной рабочий элемент фильтровальных сооружений, поэтому правильный выбор ее параметров ( $d_{\text{min}}$ ,  $d_{\text{max}}$ ,  $d_{\text{эжв}}$ ,  $K_n$ ) имеет первостепенное значение для их нормальной работы. В табл. 7.9 приведены характеристики зернистых фильтрующих материалов по Р.П.Аюкаеву и В.З.Мельцеру.

Наиболее распространенным фильтрующим материалом является *кварцевый песок* - речной или карьерный. Кварцевый песок при небольшом содержании примесей известняка отвечает всем перечисленным выше требованиям, предъявляемым к фильтрующим материалам.

Таблица 7.9

Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Пористость загрузки, %	Коэффициент формы зерен
Кварцевый песок	2,6 - 2,65	40 - 42	1,17
Антрацит дроблёный	1,6 - 1,7	45	1,15
Керамзит:			
дроблёный	1,2 - 1,5	58 - 62	1,7 - 2,5
недроблёный	1,7 - 1,8	45	1,3
Горелые породы	2,4 - 2,5	52	2
Вулканические шлаки Закавказья:			
мастара	1,7	64	2,67
ангехакот	2,4	54	1,98
Шунгизит дроблёный	1,5 - 1,8	56 - 58	1,7 - 2,0

Доменные шлаки	2,6	42 - 44	-
Шлаки медно - никелевого производства	3,2	48	-
Пенополистирол	0,1 - 0,2	41 - 43	1,05 - 1,1
Гранодиорит	2,6 - 2,81	48 - 56	1,41 - 1,73

Другим фильтрующим материалом, традиционно применяемым для загрузки фильтров, является *дробленый антрацит*. Зерна дробленого антрацита имеют плотность меньшую, чем кварцевый песок, и поэтому он обычно используется в качестве верхнего слоя загрузки двухслойных фильтров (см. табл. 7.9). Предъявляемым требованиям по механической прочности и химической стойкости удовлетворяет антрацит классов АП - антрацитовая плита, АК - кулак и АС - семечко мытое.

*Керамзит* представляет собой гранулированный пористый материал, получаемый обжигом глинистого сырья в специальных печах. Требуемое для загрузки водоочистных фильтров фракции керамзита могут быть получены либо отсевом из общей массы неоднородного керамзита, либо дроблением крупных гранул с последующим отсевом нужных фракций. Зерна дробленого керамзита имеют более развитую поверхность и, соответственно, лучшие технологические свойства по сравнению с окатанными зернами недробленого керамзита.

*Горелые породы* представляют собой метаморфизированные угленосные породы, подвергнутые обжигу при подземных пожарах. Необходимые фракции этого материала получают его дроблением с последующей сортировкой.

*Вулканические шлаки* - материалы, образовавшиеся в результате скопления газов в жидкой остывающей лаве. В Закавказье вулканические шлаки залегают в виде сыпучих материалов или в виде смеси щебня и песка. Свойства вулканических шлаков разных месторождений весьма различны.

*Шунгизит* получают путем обжига природного малоугленосного материала - шунгита, имеющего преимущественное распространение в Карелии. По своим свойствам шунгизит близок к дробленому керамзиту.

В качестве фильтрующих материалов используют отходы промышленных производств: *даменные шлаки и шлаки медно - никелевого производства*. Достоинством шлаков является то, что они обычно имеют фракционный состав, близкий к тому, который требуется для загрузки водоочистных фильтров.

В качестве фильтрующего материала на фильтрах с плавающей загрузкой используют *пенополистирол*. Этот зернистый материал получают вспучиванием за счет тепловой обработки исходного материала - полистирольного бисера, выпускаемого химической промышленностью. В результате вспенивания получают плавающие в воде зерна плотностью от 100 до 200 кг/м<sup>3</sup>.

Перечисленные материалы не исчерпывают всего многообразия местных фильтрующих материалов, предложенных в последние годы. Имеются данные о применении аглопорита, фарфоровой крошки, гранодиорита, габбродиабазы и т.д. Список этих материалов все время пополняется.

Используют также и активные фильтрующие материалы, которые благодаря своим свойствам могут извлекать из воды не только взвешенные и коллоидные примеси, но и растворенные загрязнения, находящиеся в очищаемой воде. Так, для стабилизационной обработки воды применяют мраморную крошку и магномассу. Все более широкое применение находят активные угли для дезодорации воды и извлечения органических примесей. Используют также природный ионообменный материал клиноптилолит для удаления из воды растворенных соединений азота, фтора. Однако этот материал настолько доступен и дешев, что находит все большее применение в качестве инертной загрузки на водоочистных фильтрах.

Крупность и однородность фильтрующего материала определяют ситовым анализом на ряде калиброванных сит. *Калибр сита* определяется диаметром шара, равновеликого по объему наиболее крупным зернам фильтрующего материала, проходящим через данное сито. Имея набор калиброванных сит, можно приступить к рассеву фильтрующего материала для установления его гранулометрического состава и однородности. Для этого из отобранной партии фильтрующего материала отбирают среднюю пробу в количестве 300 г и высушивают ее до постоянной массы при

температуре 105°C. Из этого количества высушенного материала берут навеску 200 г (взвешенную с точностью до 0,01 г) и рассеивают на наборе калиброванных сит. Остатки на ситах взвешивают и записывают по форме, приведенной в табл. 7.10.

На рис. 7.33 по данным табл. 7.10 построен график ситового анализа фильтрующего материала, по которому можно определить основные показатели фильтрующей загрузки. К ним относятся: эквивалентный диаметр зерен, который имеет важное значение при расчете фильтрующей загрузки; параметры, определяющие коэффициент неоднородности фильтрующей загрузки, а именно такой калибр сита, через который прошло 10 % (по массе) просеиваемого материала, и калибр сита, через которое прошло при просеивании 80 % зерен (по массе).

Таблица 7.10

Калибр сита, мм	Остаток на сите		Прошло через сито		Калибр сита, мм	Остаток на сите		Прошло через сито	
	г	%	г	%		г	%	г	%
0,25	18	9,0	1	0,5	0,80	18	9,0	159	79,5
0,50	12	6,0	19	9,5	1,00	11	5,5	174	87,0
0,60	71	35,5	29	14,5	0,50	6	3,0	187	93,5
0,70	60	30,0	129	64,5	2,00	2	1,0	198	99,0

Эквивалентный диаметр зерен определяется из выражения

$$d_{\text{экв}} = 100 / \left[ \sum (p_i / d_k) \right],$$

где  $p_i$  - процентное содержание по массе фракции со средним диаметром зерен  $d_k$  т.е. количество просеиваемых зерен, %, оставшихся на сито калибром  $d_k$ .

Для фильтрующего материала, результаты ситового анализа которого представлены в табл. 7.10, величина  $d_{\text{экв}}$  составит

$$d_{\text{экв}} = \frac{100}{\frac{1}{2,00} + \frac{3}{1,50} + \frac{5,5}{1,00} + \frac{9,0}{0,80} + \frac{30}{0,70} + \frac{35,5}{0,60} + \frac{6}{0,50} + \frac{9}{0,25}} = 0,66 \text{ мм.}$$

Коэффициент неоднородности фильтрующего материала представляет собой отношение 80 % - ного калибра материала к его 10 % - ному калибру:  $k_n = d_{80}/d_{10}$ . Для фильтрующего материала график ситового анализа которого приведен на рис. 7.33, коэффициент неоднородности составит:  $k_n = 0,82/0,42 = 1,95$ . В табл. 7.11 приведены рекомендуемые характеристики фильтрующего материала, загружаемого в скорые фильтры.

Таблица 7.11

Фильтры	Материал загрузки	Характеристика фильтрующего слоя					Скорость фильтрования, м/ч		w, л/(см <sup>2</sup> )	e <sub>3</sub> , %
		диаметр зерен, мм			K <sub>n</sub>	высота слоя, м	v <sub>n</sub>	v <sub>ф</sub>		
		d <sub>min</sub>	d <sub>max</sub>	d <sub>экв</sub>						
Однослойные скорые с загрузкой различной крупности	Кварцевый песок	0,5	1,2	0,7-0,8	1,8-2,0	0,7-0,8	5,0-6,0	6,0-7,5	12,0-14,0	45
		0,7	1,6	0,8-1,0	1,6-1,8	1,3-1,5	6,0-8,0	8,0-9,6	14,0-16,0	30
		0,8	2,0	1,0-1,2	1,5-1,7	1,8-2,0	8,0-10,0	10,0-12,0	16,0-18,0	25
	Дробленый керамзит	0,5	1,2	0,7-0,8	1,8-2,0	0,7-0,8	6,0-7,0	7,0-9,0	12,0-	-
		0,7	1,6	0,8-1,0	1,6-1,8	1,3-1,5	7,0-9,5	8,5-11,5	12,0-15,0	40
		0,8	2,0	1,0-1,2	1,5-1,7	1,8-2,0	9,5-12,0	12,0-14,0	-	-

Скорые с двухслойной загрузкой	Кварцевый песок	0,5	1,2	0,7-0,8	1,8-2,0	0,7-0,8	7,0-10,0	8,5-12,0	14,0-16,0	50
	Дробленый керамзит или антрацит	0,8	1,8	0,9-1,1	1,6-1,8	0,4-0,5	-	-	-	-

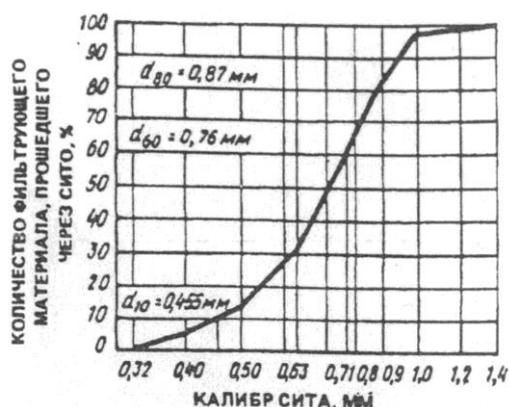


Рис. 7.33. График ситового анализа фильтрующего материала

*Поддерживающие слои*, как уже указывалось, размещают между фильтрующим слоем и дренажем фильтра. Их назначение - поддерживать фильтрующую загрузку и отчасти способствовать более равномерному распределению промывной воды по площади фильтра. Применение поддерживающих слоев влечет удорожание фильтров, а в некоторых случаях наличие этих слоев является причиной нарушения их нормальной работы из-за смещения. Удорожание фильтров при наличии поддерживающих слоев вызвано увеличением общей высоты фильтра и необходимостью в трудоемких операциях по заготовке, транспортировке и расसेву материала. Нарушение нормальной работы фильтров при наличии поддерживающих слоев вызывается тем, что при промывке фильтров в ряде случаев происходит смещение фракций этих слоев. Это явление иногда сопровождается образованием воронок на поверхности фильтрующей загрузки, провалом ее в области дренажа фильтра, что приводит к полному нарушению нормальной работы. Поэтому нецелесообразно применять поддерживающие слои с дренажными устройствами такого типа, которые допускают размещение фильтрующего материала непосредственно на дренаже. В качестве поддерживающих слоев используют гравий или щебень изверженных пород; примесь зерен известняка в них допускается не более 15 %, а примесь зерен мела вообще не допускается.

При наличии дренажных трубчатых систем, располагаемых непосредственно в слоях гравия, Спины рекомендуют принимать следующий фракционный состав и высоту поддерживающих слоев (табл. 7.12).

Таблица 7.12

Пределы крупности зерен слоя, мм	Высота слоя, мм
40 - 20	Верхняя граница слоя должна быть на 10 мм выше отверстий распределительной системы
20 - 10	100 - 150
10 - 5	100 - 150
5 - 2	50 - 100

**Примечание.** При применении трубчатой распределительной системы с отверстиями, направленными вниз, слой крупностью 40 - 20 мм укладывают до верха трубы распределительной системы. При водовоздушной промывке с подачей воды по трубчатой системе высоту слоев крупностью 2 - 5 и 5 - 10 мм необходимо принимать по 150 - 200 мм каждый

*К распределительным (дренажным) системам* скорых фильтров предъявляются следующие основные требования: равномерность распределения промывной воды по площади фильтра; равномерность сбора фильтрованной воды с площади фильтра; достаточная механическая прочность, выдерживающая массу воды и загрузки, а также давление воды при промывке фильтра; незасоряемость отверстий во время рабочего цикла и при промывке.

В настоящее время применяют следующие типы распределительных систем большого сопротивления: из пористых керамических плит, из щелевых труб или щелевого ложного дна большого сопротивления, без гравийных поддерживающих слоев; трубчатый дренаж большого сопротивления, располагаемый непосредственно в слое поддерживающей загрузки фильтра; колпачковый, полимербетонный. Рекомендуется применять распределительные системы большого сопротивления, поскольку такие системы обеспечивают необходимую равномерность распределения промывной воды. Схема такой распределительной системы при наличии в фильтре поддерживающих слоев показана на рис. 7.32.

В фильтрах без поддерживающих слоев применяют специальные дренажные устройства, которые пропускают воду, но не пропускают зерна фильтрующей загрузки и не забиваются ими. Эти устройства выполняются либо в виде *щелевых колпачков*, которые навинчиваются на штуцера распределительной системы или закрепляются в «ложном» (промежуточном) днище фильтра, либо в виде труб, на поверхности которых нарезаны тонкие щели. Колпачковым дренажам свойствен один существенный недостаток. При большом количестве колпачков (40 - 50 и более на 1 м<sup>2</sup> фильтра) возможны случаи, когда хотя бы один колпачок может быть недостаточно хорошо закреплен. При промывке фильтра такой колпачок может быть сорван промывной водой, что вызовет необходимость в перегрузке фильтрующей загрузки для установки нового колпачка. В этом отношении более совершенны системы из щелевых труб на поверхности которых нарезаны щели соответствующей ширины (обычно ширина щелей принимается равной размеру наиболее мелких фракций загрузки). Сначала для этой цели использовали трубы из винипласта, а затем полиэтилена, поскольку на их поверхности легко можно нарезать щели на фрезерном станке. Однако, как показал опыт эксплуатации, винипласт оказался не вполне пригодной для указанной цели. Будучи довольно хрупким сам по себе он после долгого пребывания в воде еще больше теряет свою прочность. В настоящее время у нас и за рубежом освоена электроискровая нарезка щелей на поверхности труб из нержавеющей стали. В случае правильного подбора марок нержавеющей стали (Я1Т, Я1, ЭП402 и др.) распределительные системы из таких труб весьма долговечны и надежны в эксплуатации. Количество щелей и расстояния между ними определяют расчетом.

*Трубчатые распределительные системы* - чугунные, пластмассовые или стальные трубы с отверстиями диаметром 10 - 12 мм, укладываемые параллельно на расстоянии 0,25 - 0,35 м друг от друга в нижних слоях гравия и присоединяемые к коллектору (трубе большого диаметра или каналу), расположенному в середине днища фильтра параллельно его длинной стороне. От низа ответвлений до дна фильтра должно быть 8 - 12 см. Отверстия в трубах располагают вертикально или в шахматном порядке на расстоянии 15 - 20 см в нижней части под углом 45° к вертикали. Общая площадь отверстий должна составлять 0,25 - 0,5 % площади фильтра.

Щелевое распределительное устройство представляет собой систему труб со щелями или ложное щелевое дно. Ширина щелей должна быть на 0,1 меньше размера самой мелкой фракции загрузки. Для трубчатого щелевого дренажа следует применять трубы из нержавеющей стали либо полиэтилена. Щели располагают равномерно поперек оси и по периметру трубы не менее чем в два ряда на расстоянии не менее 20 мм друг от друга. Общая площадь щелей »\* составляет 1,5 - 2 % площади фильтра.

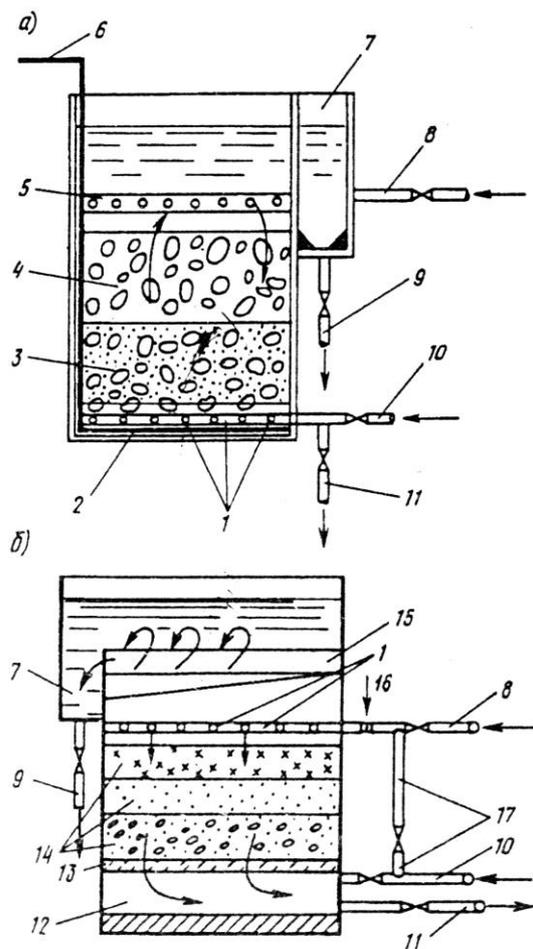
Колпачковая распределительная система монтируется в дренажном (ложном) дне или на распределительных трубах из расчета 35 - 50 колпачков на 1 м<sup>2</sup> площади фильтра. Выпускают колпачки двух видов: щелевые пластмассовые (ВТИ - К) и фарфоровые (ВТИ) или пористые. Скорость движения воды или водовоздушной смеси в щелях колпачков принимают не менее 1,5 м/с. Общая площадь проходных отверстий всех колпачков должна составлять 0,8 - 1,0 % рабочей площади фильтра.

Распределительная система из пористых сборных керамических, полимербетонных или бетонных плит, усваиваемая в виде промежуточного днища, не требует поддерживающего слоя; керамические плиты выпускают размером 40x40x5 или 25x50x5 см. Размеры пор в плитах в два с лишним раза больше размеров пустот в фильтрующем слое при среднем диаметре зерен песка 0,75 мм. Поэтому загрязнения, прошедшие через фильтрующий слой, проходят и через пористый дренаж, практически не загрязняя его. Плиты изготовляют и из пористого бетона и полимербетона сборными и реже монолитными. Замену плит производят через 7 - 8 лет.

#### 24.4. ФИЛЬТРЫ ПОВЫШЕННОЙ ГРЯЗЕЕМКОСТИ

В последние годы в отечественной практике широко применяют скорые фильтры большой грязеемкости. Под грязеемкостью подразумевается количество загрязнения, кг, задержанных с фильтрующей загрузкой аппарата в течение фильтроцикла (т.е. от промывки до другой промывки) и отнесенное к единице площади фильтрования. К числу подобных скорых фильтров относят: двухслойные, крупнозернистые, каркасно - засыпные и контактные фильтры, а также с загрузкой из вспененного полистирола (рис. 7.34), фильтры АКХ и ДДФ.

При площади одного филера более 30 м<sup>2</sup> его делят на две равные части распределительным каналом. Этот канал по высоте разбит на два изолированных друг от друга яруса: через верхний ярус производится подача осветленной воды и отвод промывной воды, а через нижний отвод фильтрата и подвод промывной воды. Вместо нижнего яруса возможна прокладка магистрального трубопровода с ответвлениями.



**Рис. 7.34. Каркасно-засыпной (а) и контактный (б) скорые фильтры**

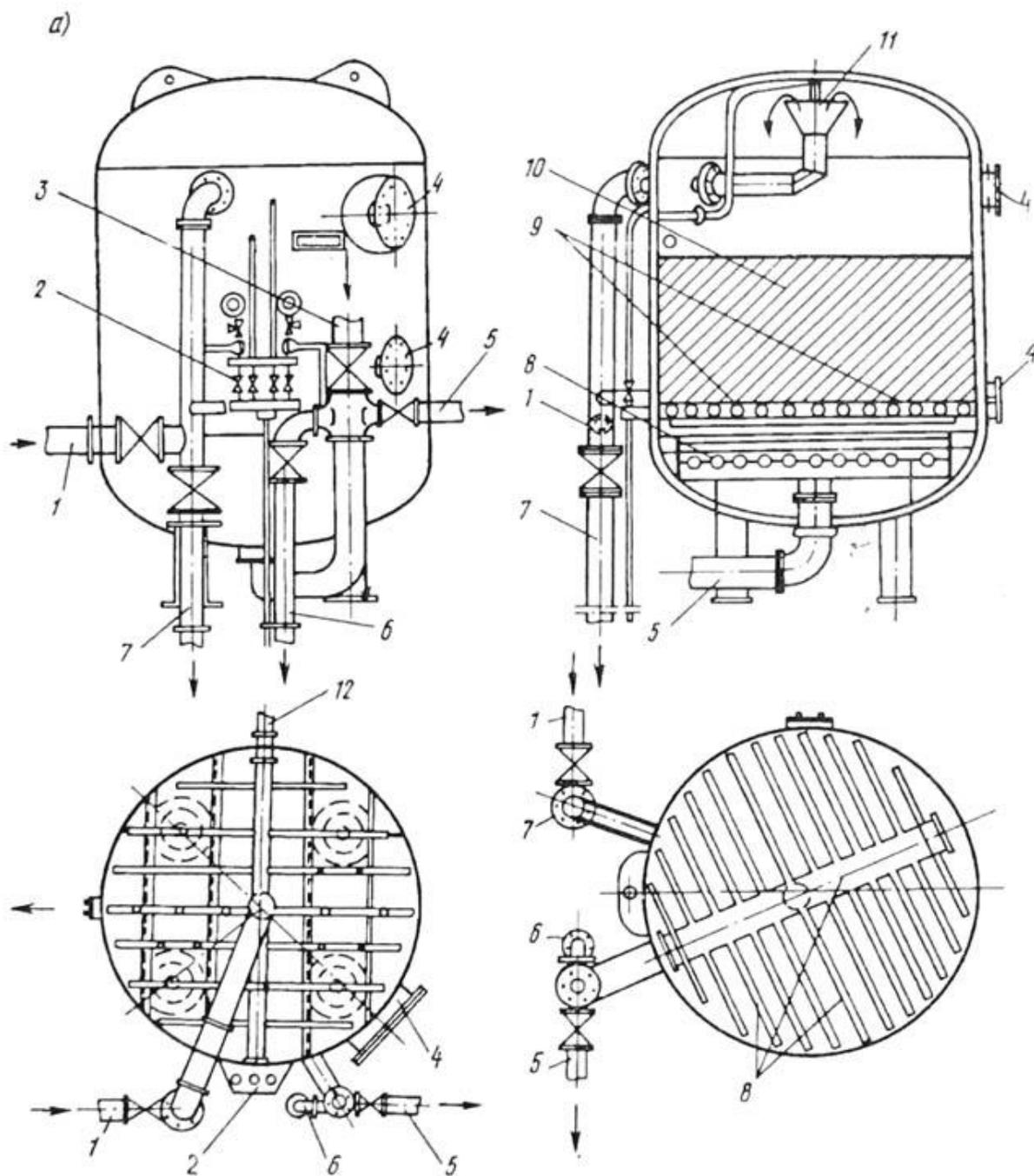
1, 2 - водо - и воздухо - распределительная системы; 3 - гравийно-песчаный слой загрузки; 4 - слой гравия; 5 - трубчатая водосборная система; 6 - подача воздуха при промывке; 7 - боковой карман; 8, 11 - подача исходной и отвод фильтрованной воды; 9, 10 - отвод и подача промывной воды; 12 - поддон; 13 - ложное дно из пористого бетона; 14 - три слоя фильтрующей загрузки; 15 - водосборный желоб; 16 - ввод реагентов; 17 - подача воды для продувки распределительной системы

Скорые фильтры с двухслойной фильтрующей загрузкой (керамзит - песок, антрацит - песок, шунгизит - горелые породы) в конструктивном отношении не отличаются от обычных скорых фильтров. Аналогично можно сказать о фильтрах с крупнозернистой загрузкой (см. табл. 7.11).

В схемах технического водоснабжения значительное распространение получили каркасно - засыпные фильтры (рис. 7.34,а) и напорные сверхскоростные осветительные фильтры системы Г.Н.Никифорова, которые фильтруют воду со скоростью до 100 м/ч. Фильтр представляет собой цилиндрический корпус с круглой камерой внутри. Пространство между этими цилиндрами разделено вертикальными перегородками на восемь отсеков - фильтров с песчано - гравийной загрузкой. В работе находятся семь отсеков, а один - на промывке. В связи с тем, что фильтр очень быстро засоряется, продолжительность фильтрационного цикла в каждом отсеке не превышает одного - двух часов. Учитывая, что производительность фильтра лимитируется его размерами и при диаметре 3 м не превышает 150 м/ч, Г.Н.Никифоров предложил батарейный тип сверхскоростных напорных фильтров с автоматической системой промывки. Все фильтры, входящие в блок, связаны единым гидравлическим режимом.

В водоподготовке нашел применение прямоточный открытый контактный фильтр КФ - 5 (см. рис. 7.34,б) с трехслойной фильтрующей загрузкой (по 0,5 м каждый). Крупность зерен верхнего слоя (керамзит, аглопорит, полимеры) - 2,3 - 3,3 мм, среднего (антрацит, керамзит, горелые породы) - 1,25 - 2,0 мм, нижнего (кварцевый песок, горелые породы) - 0,8 - 1,20 мм. Скорость фильтрования до 20 м/ч, интенсивность промывки 15 л/(с м<sup>2</sup>), продолжительность 6 - 8 мин.

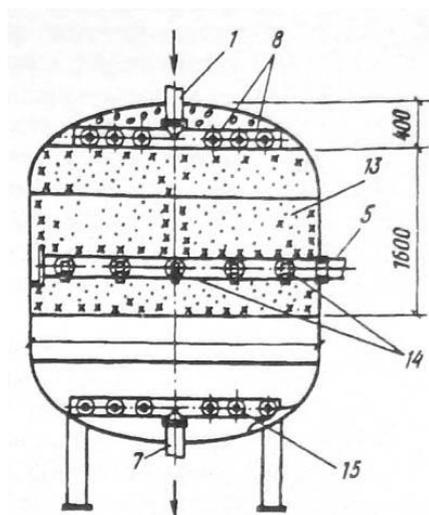
На рис. 7.35, а изображен серийно выпускаемый напорный скорый фильтр. Подача осветленной воды и отвод промывной осуществляются через центрально расположенную воронку обращенную широким концом кверху, или кольцевой перфорированный трубопровод. Фильтр не имеет поддерживающих слоев, и фильтрующий материал располагается непосредственно на капачковом или щелевом дренаже. Промывка загрузки предусмотрена водовоздушная, для чего фильтр снабжен специальной распределительной системой для подачи во время промывки сжатого воздуха. Эта распределительная система располагается в фильтрующей загрузке фильтра. Загрузка фильтра производится через верхний лаз. Для гидравлической выгрузки фильтрующей загрузки предусмотрен специальный разгрузочный штуцер. На рис. 7.35,б показан фильтр с загрузкой из вспененного полистирола. Серийно выпускают напорные вертикальные фильтры восьми типоразмеров (табл. 7.13). Высота фильтрующей загрузки в фильтрах всех размеров принята 1,2 м. Наибольший диаметр напорного



**Рис. 7.35. Вертикальный напорный скорый фильтр (а) с керамзитовой (песчаной) и пенополистирольной (б) загрузкой**

1, 5 - подача исходной воды и отвод фильтрата; 2 - пробоотборники; 3, 7 - подача и отвод промывной воды; 4 - люки; 6 - сброс первого фильтрата и опорожнение; 8 - распределительная (дренажная) система; 9 - воздухораспределительная система; 10 - фильтрующая загрузка; 11 - распределительная воронка; 12 - подача воздуха; 13 - фильтрующая загрузка из вспененного полистирола; 14 - сетчатые элементы дренажа; 15 - трубчатая система сбора промывной воды

Продолжение рис. 7.35



фильтра из условий удобства перевозки железнодорожным транспортом принят 3,4 м, фильтрующая площадь такого фильтра составляет 7,1 м<sup>2</sup>. Поэтому при значительной производительности водоочистной установки приходится принимать большое число фильтров и арматуры, в связи с чем удорожается строительство и усложняется эксплуатация фильтров. Число фильтров может быть сокращено примерно в четыре раза при установке горизонтальных напорных фильтров, площадь фильтрования которых составляет 28 - 30 м<sup>2</sup>, или вертикальных двух и трехкамерных фильтров.

Таблица 7.13

Тип осветительного фильтра	Шифр	Диаметр, мм	Строительная высота, мм	Масса фильтра без арматуры, кг	Нагрузочная масса, т
Вертикальный	ФОВ - 1,0 - 6	1000	2964	897	4,0
	ФОВ - 1,0 - 6	1000	3040	952	3,5
	ФОВ - 1,4 - 6	1400	3392	1544	5,5
	ФОВ - 1,5 - 6	1500	3357	1576	8,5
	ФОВ - 2,0 - 6	2000	3630	2080	15,0
	ФОВ - 2,6 - 6	2600	4015	3690	28,0
	ФОВ - 3,0 - 6	3000	4385	4729	37,0
	ФОВ - 3,4 - 6	3400	4545	6276	50,0
Вертикальный двухкамерный	ФОВ2К - 3,4 - 6	3400	5500	9280	70,0
Вертикальный трехкамерный	ФВ3К - 3,4 - 6	3400	7030	12987	102,0
Горизонтальный	ФОГ - 3,6 - 10,5	3000	H = 4630; L = 10500	14000	117,0
	ФОГ - 3,6 - 5,5	3000	H = 4630; L = 5510	8165	62,0

В фильтре ДДФ верхний наддренажный слой фильтрующей загрузки устраивают из керамзита (полимеров) и песка толщиной по 0,3 м, что позволяет увеличить скорость фильтрования до 25 м/ч при фильтроцикле 10 - 12 ч.

Напорные фильтры АКХ серийно выпускаются тех же семи диаметров, что и обычные напорные. Для улучшения условий промывки предусмотрена подача сжатого

воздуха, который равномерно распределяется с помощью распределительной системы, расположенной в загрузке непосредственно над нижним дренажом. Фильтры не имеют поддерживающих слоев, вследствие чего нижний дренаж выполняют в виде ряда распределительных труб с щелевыми колпачками.

Выпускают также *горизонтальные напорные фильтры* АКХ диаметром 3 м; высота нижнего слоя загрузки 1,08, верхнего 0,5 м, длина 10 - 16 м, площадь фильтрования примерно 30 м<sup>2</sup>.

При подготовке питательной воды ТЭС применяют фильтры АКХ с загрузкой из термоантрацита, который получают путем термической обработки антрацита без доступа воздуха в шахтных печах при температуре свыше 1000°С.

Осветление воды на высокопроизводительных самопромывающихся фильтрах ВСФ - 2000 непрерывного действия широко используются в системах производственного водоснабжения. Эти фильтры применяют для предочистки высокомутной воды с последующей ее доочисткой, в схемах одноступенчатой очистки воды, используемой для производственного водоснабжения при сравнительно невысоких требованиях к ее качеству, для удаления планктона взамен микрофильтрации, для очистки оборотной воды от взвешенных веществ. По данным завода - изготовителя, фильтры ВСФ - 2000 могут задерживать частицы размером 0,01 мм и выше при суммарном количестве взвешенных веществ 500 - 1000 мг/л. Общая высота фильтра 5,17 м, диаметр 2,032 м. Производительность фильтра 2000 м<sup>3</sup>/ч при скорости фильтрования 600 - 700 м/ч. Расход воды на промывку составляет 2 - 5 %.

Очистка воды на двухкамерных напорных фильтрах без предварительного осветления получила распространение в системах промышленной водоочистки. Известно, что грязеемкость обычных скорых фильтров не превышает 1,5 кг/м<sup>2</sup>, а грязеемкость двухкамерных фильтров достигает 40 кг/м<sup>2</sup> при скорости фильтрования 15 - 25 м/ч в первой и 6 - 10 м/ч во второй камере. При мутности исходной воды до 20 мг/л очистку воды на двухкамерных фильтрах можно производить), боа коагуляции. Предельное количество взвешенных веществ в воде подлежащей очистке, не должно превышать 1000 мг/л.

Использование фильтров с плавающей полимерной загрузкой (ФПЗ) (см. рис. 7.35,6) является одним из путей интенсификации процесса фильтрования природных вод. Как показали исследования М.Г.Журбы, наиболее перспективными являются гранулы вспененного полистирола. При замене тяжелых фильтрующих загрузок плавающими существенно изменяется технология фильтрования воды, увеличиваются допустимые по сравнению с кварцевыми фильтрами концентрация взвеси в исходной воде и скорость фильтрования, значительно упрощается отмывка загрузки, отпадает необходимость в установке промывных насосов и специальных емкостей для промывной воды. Установлено, что гранулы полистирола обладают более высокими адгезионными и электрокинетическими свойствами по сравнению с зёрнами песка и их применение интенсифицирует процесс фильтрования в целом.

При безреагентной очистке воды на ФПЗ - 2 и ФПЗ - 3 для получения фильтрата, отвечающего нормам ГОСТа на питьевую воду, рекомендуется приглашать допустимое содержание взвеси в воде до 500 мг/л, скорость фильтрования (в зависимости от физико - химических свойств воды и взвеси) 0,6 - 2 м/ч, общую толщину двухъярусной или двухслойной загрузки до 0,7 - 1,2 м, диаметр гранул плавающей загрузки 0,3 - 1,5 мм, интенсивность промывки загрузки 10 - 12 л/ (см<sup>2</sup>), продолжительность промывки 3 - 4 мин. При промывке фильтров промывная вода подается сверху вниз.

## 24.5. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СКОРЫХ ФИЛЬТРОВ

Расчет скорых фильтров предусматривает определение их количества и площади, нахождения числа и размеров промывных желобов, подбор фильтрующей загрузки, определение размеров элементов распределительной системы бокового кармана или центрального каната и трубопроводов обвязки. Фильтры и их коммуникаций должны рассчитываться на работу при нормальном и форсированном режимах.

Общую площадь фильтров комплекса  $A$ ,  $\text{м}^2$ , определяют из выражения

$$A = Q / (T v_u - n_{np} q_{np} - n_{np} t_{np} v_u),$$

где  $Q$  - полезная суточная производительность комплекса,  $\text{м}^3$ ;  
 $T$  - период работы водоочистного комплекса в течение суток, ч;  
 $v$  - расчетная скорость фильтрования при нормальном режиме,  $\text{м}/\text{ч}$ ;  
 $n_{np}$  - число промывок одного фильтра в сутки при нормальном режиме эксплуатации;  
 $q_{np}$  - удельный расход воды на одну промывку,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ ;  
 $t$  - время простоя фильтра в связи с промывкой, принимаемая для фильтров, промываемых водой, 0,33 ч, водой и воздухом - 0,5 ч.

На водоочистном комплексе с суточной производительностью свыше  $1600 \text{ м}^3$  принимают не менее четырех фильтров. При суточной производительности комплекса более 8 - 10 тыс.  $\text{м}^3$  число фильтров  $N_\phi$  находят из выражения  $N_\phi = 0,5(A)^{0,5}$  при соблюдении соотношения  $v_\phi = v_n N_\phi / (N_\phi - N)$ , где  $v_\phi$  - скорость фильтрования при форсированном режиме,  $\text{м}/\text{ч}$ ;  $N$  - число фильтров в ремонте.

Поперечное сечение промывного желоба может быть пятиугольным с треугольным дном или полукруглым. Расстояние между желобами принимают 1,4 - 2,2 м. Дну желоба придается уклон 0,01 по ходу движения воды. Сборные желоба можно изготавливать из железобетона, металла, стеклопластика. В качестве промывного устройства могут быть использованы также дырчатые трубы, располагаемые ниже уровня воды на фильтре на расстоянии 0,7 - 0,8 м одна от другой. Ширину желоба  $B_{жс}$  определяют по формуле

$$B_{жс} = K_{жс} (q_{жс} / (1,57 + a_{жс})^3)^{0,2}$$

где  $K_{жс}$  - коэффициент, принимаемый равным: для желобов с треугольным лотком - 2,1; с полукруглым - 2;  
 $q_{жс}$  - расход промывной воды по желобу,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  
 $a_{жс}$  - 1..1,5 - отношение высоты прямоугольной части желоба к половине его ширины.

Желоба располагают от поверхности фильтрующей загрузки на такой высоте  $H_{жс}$ , чтобы в них попадали только вымытые загрязнения; но не зерна загрузки

$$H_{жс} = H_3 e_3 / 100 + 0,3,$$

где  $H_3$  - высота фильтрующего слоя, м;  
 $e_3$  - относительное расширение фильтрующей загрузки, принимаемое согласно СНиПу равным 25 - 50 %.

Расстояние от дна желоба до дна бокового кармана или центрального канала  $H_k$  определяют из выражения

$$H_k = 1,73 (q_k^2 / g B_k^2)^{1,3} + 0,2,$$

где  $q_k$  - где расход промывной воды по канату, м<sup>3</sup>/с;  
 $B_k = 0,7$  - ширина канала, м.

Параметры фильтрующей загрузки и работы фильтра надлежит принимать по табл. 7.11. Потери напора в распределительной системе следует находить по формуле

$$h = \zeta v^2 / 2g + v_0^2 / 2g,$$

где  $v_k$  - скорость в начале коллектора, принимаемая при промывке 0,8 - 1,2 м/с;  
 $\zeta$  - коэффициент гидравлического сопротивления, принимаемый согласно СНиПу  
 $v_0$  - скорость на входе в ответвления, принимаемая при промывке 1,6 - 2 м/с.

Момент работы фильтра, когда потеря напора в фильтрующей загрузке достигает предельно допустимой величины или начинает ухудшаться качество фильтрата, служит сигналом для выключения фильтра на промывку, для восстановления задерживающей способности загрузки, которую производят обратным током фильтрованной воды или воздуха и воды. Вода подается на промывку в течение 5 - 8 мин специальным промывным насосом из резервуара фильтрованной воды или из канала профильтрованной воды, если расход промывной воды не превышает 50 % фильтрованной. Можно подавать воду и самотеком из специально установленного на требуемой высоте промывного бака или промывной башни. Объем бака должен быть рассчитан на одну дополнительную промывку сверхрасчетного их числа. Наполнение бака производят насосом за период между двумя промывками фильтров при форсированном режиме с забором воды из резервуара фильтрованной воды, где хранят запас воды на одну дополнительную промывку сверх расчетного числа.

Промывка фильтров является вспомогательным процессом, однако она может оказать решающее влияние на их нормальный режим работы. Если в процессе промывки фильтрующая загрузка отмывается недостаточно, то это приводит к постоянному накоплению остаточных загрязнений, что сокращает фильтроцикл, а иногда и вовсе выводит фильтр из работы, поэтому при расчете желобов распределительных систем и обвязки фильтров исходят из условий его промывки. Основная задача промывки фильтров - установление такой интенсивности промывки и адекватно ей относительного расширения слоя загрузки, при которых обеспечивается практически полная отмывка зерен загрузки от прилипших к ним в процессе фильтрования загрязнений.

Для загрузок из кварцевого песка при  $d_{\text{экр}} > 1$  мм в целях повышения эффекта отмывки снижения расхода промывной воды и уменьшения размеров водоотводящих устройств целесообразно применять водовоздушную промывку. Ее режим назначается следующим: продувка воздухом с интенсивностью 15 - 20 л/(см<sup>2</sup>) в течение 1 - 2 мин, а затем совместная водовоздушная промывка с интенсивностью подачи воздуха - 15 - 20 л/(см<sup>2</sup>) и воды 3 - 4 л/(см<sup>2</sup>) в течение 4 - 5 мин и последующая подача одной воды с интенсивностью 6 - 8 л/(см<sup>2</sup>) в течение 4 - 5 мин. При водовоздушной промывке воду и воздух следует подавать по раздельным трубчатым распределительным системам или через распределительные системы со специальными колпачками. Водовоздушную промывку рекомендуется применять для песчаных фильтров с системой горизонтального отвода промывной воды с пескоулавливающим желобом, образуемым двумя наклонными стенками - отбойной и водосливной. При использовании фильтрующих загрузок из дробленых антрацита и керамзита водовоздушная промывка не допускается.

Скорость движения воды в трубопроводах, подающих и отводящих промывную воду, назначают 1,5 - 2 м/с. Для удаления воздуха из трубопровода, подающего воду на промывку фильтров располагаемого ниже кромки их желобов, необходимо предусматривать стояки - воздушники диаметром 75 - 150 мм.

## 24.6. КОНТАКТНЫЕ ОСВЕТИТЕЛИ

При водообработке на контактных осветлителях (КО) коагулянт вводят в воду непосредственно перед ее поступлением в загрузку аппаратов, процесс коагуляции происходит в ее толще. За короткий промежуток времени от момента введения коагулянта до начала фильтрования в воде могут образовываться лишь микроагрегаты коагулирующих частиц. Дальнейшая агломерация примесей происходит не в свободном объеме воды, а на зернах загрузки КО; частицы адсорбируются на поверхности зерен, образуя отложения характерной для геля сетчатой структуры. Такой процесс является *контактной коагуляцией*, что обуславливается контактом воды, содержащей коагулированные примеси, с поверхностью зерен контактной массы.

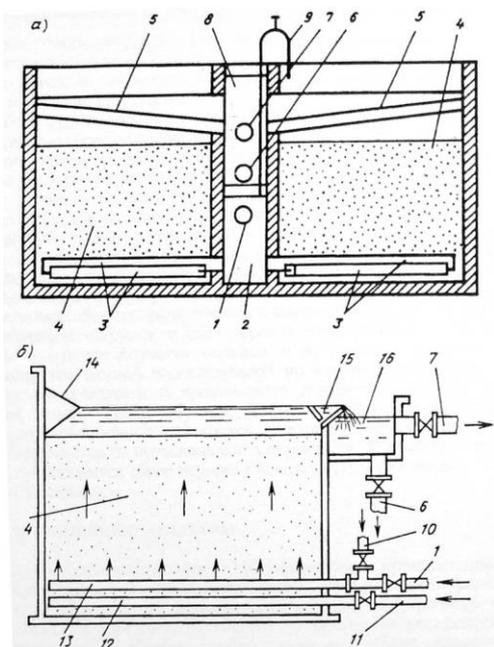
Как показали исследования С.А.Шуберта, В.П.Криштула, В.З.Мельцера и практика эксплуатации, процесс контактной коагуляции идет с большей полнотой и во много раз быстрее, чем при конвективной коагуляции в объеме. По Л. Н. Паскуцкой, доза коагулянта для контактной коагуляции, как правило меньше, чем доза, необходимая для коагулирования примесей в свободном объеме. Для протекания процесса контактной коагуляции необходимо ввести в воду такую дозу коагулянта, при которой частицы примесей теряют свою агрегативную устойчивость в отношении прилипания к поверхности зерен контактной массы. Такие дозы обычно недостаточны для того, чтобы обеспечить быстрое хлопьеобразование в свободном объеме с получением тяжелых, хорошо декантирующих хлопьев. Кроме того, при контактной коагуляции на процесс порчи не влияют температура воды и ее анионный состав, наличие грубодисперсных взвесей и ее щелочность. Отпадает необходимость в перемещении воды для обеспечения протекания ортокинетической фазы коагулирования примесей. Однако быстрота смешения и равномерность распределения коагулянта в обрабатываемой воле имеют решающее значение.

Благодаря этому в условиях обработки маломутных цветных вод КО весьма удачно заменяют обычную двухступенчатую очистку воды, обеспечивая высокий эффект осветления и обесцвечивания при одновременном снижении стоимости строительства и эксплуатации очистных сооружений. На водоочистных комплексах с КО необходимо предусматривать барабанные сита или микрофильтры и вертикальный смеситель для воздухоотделения и смешения реагентов с водой. Объем смесителя рассчитывают на пятиминутное пребывание в ней воды и секционируют на два отделения. Скорость восходящего движения воды принимают 5 мм/с. Микрофильтры и барабанные сита располагают обычно над смесителем или входной камерой.

Контактные осветлители представляют собой разновидность фильтровальных аппаратов, работающих по принципу фильтрования воды снизу вверх в направлении убывающей крупности зерен через слой загрузки большой толщины (рис. 7.36). При этом основная масса примесей воды задерживается в нижних - крупнозернистых слоях, характеризующихся большой грязеемкостью, что уменьшает темп прироста потери напора. Снижение темпа прироста потерн напора и увеличения продолжительности защитного действия загрузки вследствие большой высоты слоя позволяет очищать на КО воду с содержанием взвеси, значительно превышающим обычно допустимое для скорых фильтров. Скорые фильтры могут работать нормально, если содержание взвеси в поступающей на них воде составляет 5 - 15 мг/л. Контактные же осветлители работают нормально при содержании взвеси в очищаемой воде до 120 мг/л и ее цветности до 120 град.

Контактные осветлители рекомендуется использовать без поддерживающих слоев при промывке водой и с поддерживающими слоями при водовоздушной промывке. Разработаны три модели КО (см. рис. 7.36). Осветлитель КО - 1 представляет собой

резервуар, заполненный загрузкой из песка и гравия. Песок не должен содержать фракции крупнее 2 мм и мельче 0,7 мм. Средний диаметр песка 0,9 - 1 мм,  $d_{ЭК} = 1..1.3$  мм, толщина слоя песка около 2 м. Гравийные слои располагают под песчаной загрузкой на дне контактного осветлителя, они имеют общую толщину 0,6 - 0,8 м. Рекомендуемая высота и крупность песчаных и гравийных слоев приведены в табл. 7.14. Расчетную скорость фильтрования для КО - 1 принимают 4,0 - 5,5 м/ч. Очищаемую воду предварительно смешивают с коагулянтom и вводят в загрузку с помощью распределительной системы из дырчатых труб, уложенных на дне в слое мелкого гравия (2 - 10 мм). Распределительная система служит и для подачи промывной воды. Промывку с интенсивностью 15 - 18 л/(см<sup>2</sup>) в течение 7 - 8 мин производят так же как, и обычных скорых фильтров. Осветленная вода, как и промывная, отводится с помощью желобов, расположенных над песком.



**Рис. 7.36. Контактные осветлители КО - 1. (а) и КО - 3 (б)**

1, 7 - подача исходной промывной воды и отвод фильтрата; 2, 8 - нижнее и верхнее отделения центрального капала; 3 - перфорированная распределительная система с защитными козырьками; 4 - фильтрующая загрузка; 5 - водосборные желоба; 6 - отвод промывной воды; 0 - воздушник; 10 - подача промывной воды; 11 - подача воздуха при промывке; 12, 13 - воздухо - и водораспределительная системы; 14 - струенаправляющий выступ; 15 - пескоулавливающий желоб; 16 - боковой карман

Важным конструктивным элементом КО является распределительная система, которая должна обеспечить равномерное распределение промывной воды по всей площади сооружения. В безгравийных КО - 1, промываемых водой, устраивают безгравийную трубчатую распределительную систему с приваренными вдоль дырчатых труб боковыми шторками, между которыми приваривают поперечные перегородки, разделяющие подтрубное пространство на ячейки. А КО - 3 с поддерживающими слоями и водовоздушной промывкой следует применять трубчатые распределительные системы для подачи воды и воздуха и систему горизонтального отвода промывной воды. Отверстия в дырчатых трубах должны быть расположены в два ряда в шахматном порядке в нижней части и направлены вниз. Диаметр отверстий 10 - 12 мм. расстояние между осями в ряду 150 - 200 мм. Распределительную систему следует проектировать в соответствии с рекомендациями СНиПа.

Работа распределительной системы КО осложняется тем, что она служит для подачи неочищенной воды, и поэтому отверстия в трубах могут засоряться. В связи с этим распределительная система должна быть доступна для прочистки.

Крупность зерен, мм	Высота слоев, м, при контактном осветлителе		Крупность зерен, мм	Высота слоев, м, при контактном осветлителе	
	безгравийном	гравийном		безгравийном	гравийном
40-20		0,2-0,25	5-2	1,0-1,2	0,3-0,4
20-10	0,5-0,6	0,1-0,15	2-1,2	1,0-1,2	1,2-1,3
10-5		0,15-0,2	1,2-0,7	0,8-1,0	0,8-1,0

В КО-1 сбор промывной воды производят желобами, над кромками которых предусматривают пластины с треугольными вырезами высотой и шириной 50 - 60 мм, с расстоянием между их осями 100 - 150 мм. Для промывки следует использовать очищенную воду. Допускается применение неочищенной воды при ее мутности не более 10 мг/л, коли - индексе до 1000 ед/л с предварительной обработкой воды на барабанных сетках или микрофильтрах и обеззараживании. При этом должен быть предусмотрен разрыв струи перед подачей воды в емкость для хранения промывной воды. Непосредственная подача воды на промывку из трубопроводов и резервуаров фильтрованной воды недопускается.

Водовоздушную промывку КО-3 (см. рис. 7.36,б) осуществляют со следующим режимом: взрыхление загрузки воздухом интенсивностью 18 - 20 л/(с м<sup>2</sup>) в течение 1 - 2 мин; совместная водовоздушная промывка при подаче воздуха 18 - 20 л/(с м<sup>2</sup>) и воды 3 - 3,5 л/(с м<sup>2</sup>) при продолжительности 6 - 7 мин, дополнительная промывка водой с интенсивностью 6 - 7 л/(с м<sup>2</sup>) продолжительностью 5 - 7 мин. Продолжительность сброса первого фильтрата при промывке очищенной водой 5 - 10, неочищенной 10 - 15 мин.

В контактных осветлителях в отличие от скорых фильтров слой воды над загрузкой осветленный, так как вода уже профильтровалась через загрузку. Следовательно, зеркало обработанной воды в контактных осветлителях открыто. Для предотвращения вторичного загрязнения воды оно должно быть изолировано от помещения обслуживания осветлителей. Для этого КО группами или каждый в отдельности отделяют от коридора управления остекленными перегородками высотой не менее 2,5 м, позволяющими вести визуальные наблюдения за качеством осветляемой воды.

Осветлители КО-1 с безгравийной загрузкой следует применять для очистки воды с умеренной цветностью и мутностью при небольшом содержании планктона, в остальных случаях рекомендуются осветлители КО-3 с гравийно-песчаной загрузкой. КО-3 предусматривают две трубчатые распределительные системы: одна - для подачи воды, другая - воздуха. Воздухораспределительная система состоит из дырчатых полиэтиленовых труб, располагаемых у дна сооружения точно посередине между распределительными трубами для воды. В этих осветлителях применяют систему горизонтального отвода промывной воды, основными элементами которой являются пескоулавливающий желоб и струенаправляющий выступ.

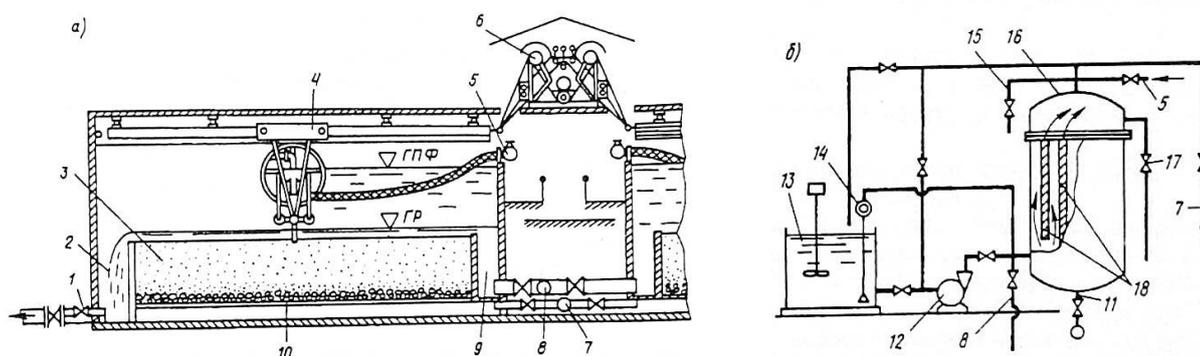
Работа и промывка КО-3 осуществляются по следующей схеме. Во время работы обрабатываемая вода, смешанная с реагентами, подается в нижнее отделение бокового кармана и далее по распределительной системе поступает в загрузку. Фильтрат собирается в надзагрузочном объеме и через водослив пескоулавливающего желоба поступает в верхнее отделение бокового кармана, откуда по трубопроводу отводится в сборный коллектор очищенной воды. В начале промывки загрузка продувается воздухом для предварительного разрушения загрязнений и выравнивания гидравлического сопротивления загрузки по площади сооружения. Затем в результате одновременной подачи воды и воздуха загрязнения полностью разрушаются и перемещаются кверху, выходя на поверхность загрузки, и далее через пескоулавливающий желоб в верхнее отделение бокового кармана и за пределы аппарата. По окончании совместной

водовоздушной промывки подача воздуха в загрузку прекращается и производится дополнительная промывка загрузки водой. Таким образом, в конце промывки из загрузки удаляется оставшийся в ней воздух, она несколько разрыхляется и восстанавливается ее первоначальная пористость. По окончании промывки производится сброс первого фильтрата, а затем вновь начинается фильтроцикл.

## 24.7. МЕДЛЕННЫЕ ФИЛЬТРЫ

Работа медленных фильтров (МФ) основана на принципе пленочного фильтрования. В начале фильтроцикла на поверхности фильтрующего слоя образуется из задержанных примесей воды фильтрующая пленка, проницаемая для воды и непроницаемая для ее диспергированных загрязнений. В образовавшейся пленке интенсивно развиваются различные бактерии. Обработываемая вода профильтровывается через пленку, при этом из нее извлекаются взвешенные и частично коллоидные частички и до 99,9 % бактерии, т.е. процесс чисто механический. Этим достигается высокая степень осветления и обеззараживания воды.

Медленный фильтр (рис. 7.37,а) - открытый резервуар, на дне которого находится дренаж (из дырчатых труб, кирпичей, бетонных плиток, уложенных с прозорами). Над дренажем размещен поддерживающий слой толщиной 350 мм из гравия, гальки и щебня крупностью 2 - 40 мм. а над поддерживающим слоем расположен фильтрующий слой толщиной 850 мм из хорошо промытого песка крупностью 0,3 - 2 мм. Стой воды над фильтрующей загрузкой составляет 1,2 - 1,5 м. В малых фильтрах (площадь до 10 - 15 м<sup>2</sup>) в качестве дренажа служит сборный лоток в днище фильтра, перекрытый с прозорами кирпичами или бетонными плитами. Днище фильтра устраивают с уклоном 0,01 к лотку.



**Рис.7.37. Медленный(а) и намывной(б) фильтры**

1, 8 - отвод и подача промывной, исходной воды; 2, 9 - каналы отвода промывной воды и подачи исходной и промывной воды; 3 - фильтрующая загрузка; 4 - гидравлический рыхлитель; 5 - трубопровод напорной воды; 6 - механизм привода рыхлителя; 7 - отвод (фильтрата); 10 - дренаж из пористого (бетона); 11 - опорожнение и отвод смытого осадка; 12 - насос подачи суспензии фильтрующего порошка на фильтр; 13 - бак с мешалкой для приготовления суспензии фильтрующего порошка; 14 - насос-дозатор для непрерывной подачи фильтрующего) порошка; 15 - удаление воздуха; 16 - намывной фильтр; 17 - клапан дренирования; 18 - фильтрую

На фильтрах с удалением песка при регенерации периодически (1 раз в 10 - 30 сут) по мере исчерпания грязеемкости загрузки верхний слой песка удаляют и отправляют на промывку, после чего его снова используют для загрузки. На фильтрах без удаления песка при регенерации при его промывке производятся механическое рыхление и гидросмыв загрязнений.

При содержании взвешенных веществ в исходной воде до 25 мг/л скорость» фильтрования на МФ принимают 0,2 - 0,3 м/ч. при содержании взвеси 25 - 30 мг/л она назначается 0,1 - 0,2 м/ч.

Недостатками МФ являются их: значительная строительная стоимость и большая занимаемая площадь (при производительности 50 тыс.м<sup>3</sup>/сут для фильтров необходима площадь 1 га), что главным образом и послужило причиной для отказа от применения их на крупных водоочистных комплексах. Простота эксплуатации обуславливает целесообразность их использования при известных условиях на малых установках.

Фильтроцикл МФ при очистке со снятием верхнего слоя песка складывается из: фильтрования (около 30 - 50 сут), очистки (1 - 2 сут), созревания (со сбросом 1 - го фильтрата 1 - 2 сут), всего 32 - 54 сут. При гидравлическом смыве загрязнении и большей мутности воды фильтроцикл может быть сокращен в десятки раз.

Площадь МФ с длительным фильтроциклом  $A_{\phi}$ , м<sup>2</sup>, определяют расчетом по расходу  $Q$  и по нормальной скорости фильтрования  $v$ , которую принимают 0,1 - 0,2 м/ч, в зависимости от мутности воды

$$A_{\phi} = Q/v_n$$

Число фильтров  $N$  принимают не менее 4 с учетом того, что один из них может быть отключен для ремонта (или для очистки). При выключении одного фильтра на ремонт остальные работают в форсированном режиме со скоростью фильтрования  $v_{\phi}$ , м/ч,

$$v_{\phi} = v_n N / (N - 1)$$

Скорость фильтрования на МФ при форсированном режиме не должна превышать 0,2 - 0,3 м/ч. В случае невыполнения этого требования либо увеличивают число фильтров, либо уменьшают скорость фильтрования при нормальном режиме.

При очистке со снятием верхнего слоя песка МФ рекомендуется применять на установках с производительностью до 1000 м<sup>3</sup>/сут при мутности исходной воды до 50 мг/л. При большей мутности значительно сокращается производительность рабочего периода, и фильтры приходится часто чистить. При гидравлическом смыве загрязнений пленки (без удаления песка) на МФ можно осветлять воду с - до 1500 мг/л.

## 24.8. НАМЫВНЫЕ ФИЛЬТРЫ

С середины 40 - х годов в технологии очистки воды получил распространение метод, основанный на ее фильтровании с добавлением специальных фильтрующих сред (диатомит, целлюлоза, бентонит, древесные опилки и пр.), через слой тот же порошка предварительно нанесенный на фильтрующий элемент. Этим методом целесообразно обрабатывать маломутные (до 40 мг/л) и низкоцветные (до 30 град) воды. При этом снижается содержание в фильтрате органических веществ, обеспечивается извлечение железа, марганца, масел, нефтепродуктов и бактерий. Процесс является чисто механическим. При фильтровании через предварительно намытый на фильтрующую основу слой фильтрующего порошка в нем (задерживаются те ее примеси, которые по своим размерам превосходят габариты пор намытого слоя. Процесс реализуется на намывных фильтрах - НФ (см. рис. 7.37,6), обычно работающих по напорной схеме и реже как гравитационные или вакуумные.

Современная теория фильтрования с образованием осадка располагает целым рядом уравнений, предназначенных для технологического расчета промышленных

установок. Для правильного выбора существующего расчетного уравнения необходимо четкое определение вида и режима рабочего процесса в каждом отдельном случае. Вид фильтрования определяется соотношением

$$dR/dq = KR, \quad (7.53)$$

- где  $R$  - общее сопротивление фильтрующей перегородки и слоя, м;  
 $V$  - объем фильтрата, м<sup>3</sup>;  
 $b$  - показатель степени, зависящий от вида фильтрования (с полным закупориванием пор  $b = 2$ , с постепенным закупориванием пор  $b = 3/2$ , вида  $b = 1$ , с образованием осадка  $b = 0$ );  
 $K$  - коэффициент пропорциональности;  
 $q$  - расход фильтрата, м<sup>3</sup>/ч.

Уравнение (7,53) показывает, что интенсивность возрастания общего сопротивления по мере увеличения количества фильтрата пропорционально этому сопротивлению в определенной степени, зависящей от режима фильтрования.

Известно, что при осветлении малоконцентрированных суспензий первой стадией процесса является фильтрование с постепенным закупориванием пор фильтрующей перегородки. Эта стадия заканчивается по достижении определенного отношения объема твердых частиц, задерживающихся в порах, к объему самих пор, после чего наступает стадия фильтрования с образованием осадка. Следует отметить существенное различие в процессах фильтрования с закупориванием пор и с образованием осадка. Как уже отмечалось выше, фильтрование с закупориванием пор сопровождается выделением частиц суспензии внутри капилляров перегородки. Очевидно, что производительность фильтра в этом случае существенно зависит от объема пор, в которых осаждаются частицы. Наиболее распространенным является фильтрование с постепенным закупориванием пор.

Основным и наиболее распространенным уравнением, описывающим общие закономерности фильтрования с образованием осадка, является уравнение Рутга - Кармана. В дифференциальной форме уравнение имеет вид:

$$v = \frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta p}{\eta(r_{cp} m_T V' + R_{\phi.n.})} \quad (7.54)$$

- где  $v$  - скорость фильтрации, м/с;  
 $V'$  - объем фильтра, полученного за время  $\tau$  с единицы поверхности, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>;  
 $\tau$  - время фильтрования;  
 $\Delta p$  - перепад давления при фильтровании;  
 $\eta$  - динамическая вязкость фильтрата, Па с;  
 $m_T$  - масса твердой фазы, отлагающейся при получении единицы объема фильтрата, кг/м<sup>3</sup>;  
 $r_{cp}$  - среднее удельное сопротивление осадка для всей толщины слоя, м/кг;  
 $R_{\phi.n.}$  - сопротивление фильтрующей перегородки, м.

Интегрируя уравнение (7.54) при начальных условиях  $v = 0$  и  $\tau = 0$ , можно получить зависимость между объемом фильтрата и продолжительностью фильтроцикла для различных режимов фильтрования. Следует отметить, что основное уравнение (7.54), полученное для идеализированных условий с допущением, что  $r_{cp}$  и  $R_{\phi.n.}$  являются постоянными величинами, а осадок рассматривается как пористая среда, оказывающая сопротивление ламинарному потоку жидкости в соответствии с законом Дарси. На практике же все осадки и многие перегородки сжимаемы, а это означает, что  $r_{cp}$  и  $R$  не являются постоянными, а зависят от ряда факторов, прежде всего от давления. Кроме того, сжимаемый осадок представляет собой систему сложных

сквозных пор и движение жидкости через него не может быть ламинарным. Расход фильтрата, падение давления, удельное сопротивление осадка являются факторами, тесно связанными с изменением пористости осадка, а пористость является очень сложной характеристикой, так как она включает понятие трения жидкой частицы, механическую передачу сил трения от частицы к частице, направление и форму зерен и т.п.

Явление сжимаемости осадка в процессе фильтрования впервые было изучено Руттом и Карманом, а впоследствии Теллером и Грассом. Основные положения их теории сводятся к следующему. Удельное сопротивление бесконечно тонкого слоя осадка возрастает от минимума на границе с суспензией до максимума на границе с перегородкой:  $r_{cp} = \int (p_c - p_{ж0})(p_c - p_{ж})$ , где  $p_c$  и  $p_{ж}$  статическое давление соответственно суспензии и жидкости. Для определения  $r_{cp}$  на практике чаще всего используют эмпирическое уравнение, предложенное Руттом и Карманом,

$$r_{cp} = r_0'' p^s \quad (7.55)$$

где  $s$  - показатель сжимаемости осадка, изменяющийся в пределах  $0 \leq s \leq 1$ ;  
 $r_0''$  - коэффициент удельного сопротивления.

Общее уравнение фильтрования (7.54) справедливо и для сжимаемых осадков. В этом случае учитывается удельное сопротивление осадка в соответствии с уравнением (7.55). При этом принимаются во внимание следующие важные упрощения: 1) если сопротивление осадка значительно превосходит сопротивление перегородки, последнее не учитывается; 2) если сопротивление осадка достаточно велико по сравнению с сопротивлением перегородки, то последнее принимается постоянным и учитывается средней величиной  $R$ , определяемой экспериментально.

Приведенные выше зависимости установлены для одномерного фильтрования, т.е. для плоского фильтровального элемента. Исходя из приведенной выше зависимости, предложено следующее уравнение, характеризующее процесс фильтрования на перегородку криволинейной поверхности или так называемое двухмерное фильтрование

$$v = \frac{dV'}{d\tau} = \frac{\Delta p}{\eta[r_{cp} R \ln(R_n / R_B) + R_{ф.п.}]},$$

где  $R_B$  - внутренний радиус цилиндрического слоя осадка, м;  
 $R_n$  - наружный радиус цилиндрического слоя осадка, м; остальные обозначения см. для формулы (7.54).

Влияние размерности на процесс фильтрования выражается в том, то при равной толщине осадка скорость фильтрования, отнесенная к единице поверхности фильтрования на цилиндрической поверхности (цилиндрическом патроне), будет больше, чем на перегородке с плоской поверхностью.

$$v_u / v_{пл} = A_{cp} / A = (R_B + h_0 / 2) / R_B = 1 + h_0 / 2R_B$$

где  $A_{cp}$  - средняя площадь поверхности фильтрования с учетом образующегося осадка, м<sup>2</sup>;  
 $A$  - площадь поверхности фильтрования плоского фильтрующего элемента, м<sup>2</sup>  
 $h_0$  - толщина слоя осадка, м.

Из уравнения (7.56) вытекает, что производительность фильтров с цилиндрическими фильтрующими элементами на 41 - 80 % (в зависимости от режима фильтрований) больше, чем производительность фильтров с плоскими фильтрующими элементами.

Для определения  $v$  и от предложены зависимости:

$$v = \frac{AR_B}{2m_T} \left[ \frac{2(p - p_{\phi.n.})}{e^{\eta_{cp} R_B} - 1} \right]; \quad \tau = \frac{R_B}{2m_T v} \left[ \frac{2(p - p_{\phi.n.})}{e^{\eta_{cp} R_B} - 1} \right]$$

Фильтрация при переменных скоростях и разновидности давления осуществляется центробежным насосом. В этом случае зависимость между скоростью фильтрации  $v$  и давлением, развиваемым центробежным насосом, определяется экспериментально, т.е. опытным путем находят зависимость  $p = f(v)$ . Для аналитического расчета фильтров предложен приближенный метод, в котором непрерывный процесс при переменных  $v$  и  $p$  заменяется на процесс, выполняемый сначала при постоянной скорости, а затем при постоянном давлении. Методика расчета заключается в следующем: в начале фильтрации давление насоса затрачивается на преодоления сопротивления перегородки. Начальная скорость  $v = p / \eta A_{\phi.n.}$

Продолжительность фильтрации  $\tau_c$  определяется из уравнения

$$\tau_c = \frac{R_B}{2m_0 v'} \left[ \frac{2(p'' - p)}{e^{\eta_{cp} R_B} - 1} \right]$$

Количество фильтра за время  $\tau$  с

$$V_c = \tau c v' A$$

где  $A$  - площадь фильтрующей поверхности.

Скорость  $v''$ , соответствующая окончанию фильтрации с постоянной разностью давлений, определяется из соотношения

$$v'' = \frac{p''}{\eta \left[ r_{cp} \frac{R_B}{2} \ln(2V' m_T / R_B + 1) + R_{\phi.n.} \right]}$$

Объем фильтрата при постоянном давлении

$$V_m = \frac{AR_B}{2m_T} \left[ e^{\frac{2(p'' v' - p' v'')}{\eta v' r_{cp} R_B}} - 1 \right] - V_c$$

Общая полезная продолжительность фильтроцикла составит

$$\tau_{общ} = \tau_c + \tau_m; \quad \tau_m = \tau_1 + \tau'_1$$

где  $\tau_c$  и  $\tau_m$  - продолжительность фильтроцикла соответственно при постоянной скорости и при постоянном давлении;  
 $\tau_1$  - время фильтрации при  $u = const$ ;  
 $\tau'_1$  - воображаемая продолжительность получения кондиционного фильтрата объемом  $V_c$  при постоянной разности давлений.

Производительность фильтра за рабочий цикл составит

$$Q_{\phi} = V_{\text{общ}} / \tau_{\text{общ}} = (V_c + V_m) / (\tau_c + \tau_m)$$

где  $V_c$  и  $V_m$  - соответственно объем фильтрата при постоянной скорости и при постоянном давлении.

Скорость фильтрования на НФ 1 - 50 м/ч (по отношению к фильтрующей поверхности), продолжительность фильтроцикла 36 - 60 ч, потери напора до 15 - 20 м, расход воды на промывку 0,5 - 0,7 %; продолжительность промывки 15 мин.

Наружная поверхность фильтрующих элементов служит основой, на которую намывают слой фильтрующего порошка. Такой слой наносят на фильтрующие элементы перед началом работы фильтра, при этом расход порошка составляет 300 - 400 г на 1 м<sup>2</sup> фильтрующей поверхности. На эту операцию затрачивается 3 - 5 мин. Равномерный слой порошка удерживается на поверхности фильтрующего элемента за счет разности давлений в корпусе фильтра и внутри фильтрующего элемента. Возможен другой режим работы фильтра, при котором для предотвращения образования на поверхности фильтрующего слоя малопроницаемой пленки из отфильтрованных веществ в воду непрерывно или периодически вводят небольшое количество (3 - 10 мг/л) фильтрующего порошка, что значительно удлиняет фильтроцикл.

## **Глава 25. ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ ВОДЫ**

### **25.1. МЕТОДЫ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ**

При улучшении качества воды для хозяйственно-питьевых нужд заключительным этапом является ее обеззараживание, так как при осветлении и обесцвечивании воды коагулированием с последующим отстаиванием и фильтрованием из нее удаляется только до 90 - 95 % бактерий. В оставшейся части могут присутствовать патогенные бактерии и вирусы. Использование подземной воды в большинстве случаев возможно без обеззараживания. В технологии водоподготовки известен ряд методов обеззараживания воды, который можно классифицировать на пять основных групп: термический; сорбция на активном угле, с помощью сильных окислителей; олигодинамия (воздействие ионов благородных металлов); физический (с помощью ультразвука, радиоактивного излучения, ультрафиолетовых лучей). Из перечисленных методов наиболее широко распространены методы третьей группы. В качестве окислителей применяют хлор, диоксид хлора, озон, йод, марганцово-кислый калий; пероксид водорода, гипохлорит натрия и кальция. В свою очередь, из перечисленных окислителей на практике отдают предпочтение хлору, хлорной извести, гипохлориту натрия. Выбор метода обеззараживания воды производят, руководствуясь расходом и качеством обрабатываемой воды, эффективностью ее предварительной очистки, условиями поставки, транспорта и хранения реагентов, возможностью автоматизации процессов и механизации трудоемких работ.

Обеззараживанию подлежит вода, прошедшая предшествующие стадии обработки, коагулирование, осветление и обесцвечивание в слое взвешенного осадка или отстаивание, фильтрование, так как в фильтрате отсутствуют частицы, на поверхности или внутри которых могут находиться в адсорбированном состоянии бактерии и вирусы, оставаясь вне воздействия обеззараживающих агентов.

## 25.2. ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ ВОДЫ СИЛЬНЫМИ ОКИСЛИТЕЛЯМИ

### 25.2.1. Хлорирование воды

Обеззараживание воды хлорированием на водоочистных комплексах осуществляют хлорной известью, хлором и его производными, под действием которых бактерии, находящиеся в воде, погибают в результате окислации и разрушения веществ, входящих в октав протоплазмы клеток. Хлор окисляет органические вещества. Для качественного хлорирования необходимо хорошее перемешивание, а затем не менее чем 30-минутный (при совместных хлорировании и аммонизации 60-минутной) контакт хлора с водой, прежде чем она поступит к потребителю. Контакт обеспечивают в резервуаре сбора фильтрованной воды или в трубопроводе подачи воды потребителю, если он имеет достаточную длину без водоразбора.

Дозу хлора устанавливают технологическим анализом из расчета, чтобы в 1 л воды, поступающей к потребителю, оставалось 0,3 - 0,5 мг хлора, не вступившего в реакцию (остаточного хлора), который является показателем санитарной надежности. При этом условии доза хлора при хлорировании фильтрованной воды составляет 1 - 2 мг/л в зависимости от ее хлоропоглощаемости, а при хлорировании подземной воды - 0,7 - 1 мг/л. При выключении на промывку или ремонт одного из резервуаров фильтрованной воды, когда не обеспечивается необходимое время контакта воды с хлором, его доза должна быть увеличена вдвое.

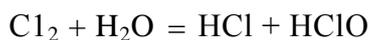
При плюсовых температурах и атмосферном давлении хлор представляет собой газ зеленовато - желтого цвета с удушливым запахом и плотностью, значительно большей, чем плотность воздуха (в 1,5 - 2,5 раза в зависимости от температуры). При повышении давления (при плюсовых температурах) хлор переходит в жидкое состояние; в таком виде его перевозят и хранят в специальных стальных емкостях (при давлении 0,6 - 1,0 МПа). Хлорирование воды осуществляют жидким (газообразным) хлором. На водоочистных комплексах с подачей до 3000 м<sup>3</sup>/сут допускается применение хлорной извести.

Заводы по производству хлора поставляют хлор в основном в баллонах двух типов: Е-24 вместимостью до 25 - 30 кг жидкого хлора и Е-54 с содержанием хлора до 100 кг. На крупных водоочистных комплексах производительностью более 100 тыс.м<sup>3</sup>/сут хлор доставляют обычно в специальных железнодорожных цистернах вместимостью до 48 т жидкого хлора, а хранят его в бочках, которые в зависимости от размеров вмещают от 700 до 3000 кг жидкого хлора. Хлорное хозяйство должно обеспечивать прием, хранение, испарение жидкого хлора, дозирование газообразного хлора с получением хлорной воды (раствор хлорноватистой кислоты).

Хлорное хозяйство располагают в отдельном помещении, где заблокированы расходный склад хлора, испарительная и хлордозаторная. Расходный склад хлора можно размещать в отдельных зданиях или вплотную к хлораторной, отделяя его глухой стеной без проемов. Склад хлора в составе хлораторных можно не предусматривать, в этом случае хлордозаторной разрешается хранение одного баллона жидкого хлора массой не более 70 кг. Хлордозаторные без испарителей, компонованные в блоке с другими зданиями комплекса или вспомогательными помещениями хлорного хозяйства, отделяют от них глухой стеной без проемов и оборудуют два выхода наружу, при этом один из них должен иметь тамбур. Хлоропроводы выполняют из поливинилхлорида, резины, полиэтилена высокой плотности и др.

Хлорирование воды является надежным санитарно - гигиеническим приемом, предотвращения распространения эпидемий, так как большинство патогенных бактерий (бациллы брюшного тифа, туберкулеза и дизентерии, вибрионы холеры, вирусы полиомиелита и энцефалита) весьма нестойки по отношению к хлору.

Спорообразующих бактерий хлор не уничтожает, что является одним из недостатков этого метода обеззараживания.



Гидролиз хлора происходит по реакции с образованием хлорноватистой кислоты, которая диссоциирует на соляную кислоту и атомарный кислород (в нейтральной и щелочной среде), обладающий сильными окислительными свойствами. Хлорноватистая кислота диссоциирует в зависимости от pH с образованием гипохлоритного иона ( $\text{OCl}^-$ ), при этом окисляющее воздействие на микроорганизмы оказывает как сама хлорноватистая кислота, так и главным образом гипохлоритный ион:

pH. ....	4	5	6	7	8	9	10	11
$\text{OCl}^-$ , %	0,05	0,5	2,5	21,0	75	97,0	99,5	99,9
$\text{HOCl}$ , %	99,95	99,5	97,5	79,0	25	3,0	0,5	0,1

При использовании вместо хлора хлорной извести протекает реакция

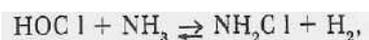


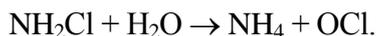
Дальнейшая диссоциация хлорноватистой кислоты происходит аналогично описанному выше.

Подавление бактериальной жизни при хлорировании зависит от доз введенного хлора и его экспозиции с водой. Поэтому хлоропоглощаемость одной и той же воды, равная суммарному расходу хлору на оксидацию микроорганизмов, органических и неорганических примесей, - величина переменная, зависящая от дозы введенного хлора, продолжительности контакта, величины pH, температуры воды и др. Очевидно, что доза вводимого хлора должна быть больше величины хлоропоглощаемости на величину остаточного хлора, присутствие которого является гарантией того, что оксидация бактерий и органических веществ в воде практически завершена.

На практике в соответствии с качеством исходной воды применяют одно - или двухкратное хлорирование воды. При обработке высокоцветных вод, а также вод, богатых органическими веществами и бактериями, применяют двухкратное хлорирование. При этом хлор в воду вводят сначала перед смесителями (предварительное хлорирование), а затем в фильтрованную воду, перед резервуаром чистой воды. Предварительное хлорирование дозой до - 5 мг/л необходимо для оксидации органических защитных коллоидов, препятствующих процессу коагуляции, а также гуминовых веществ, обуславливающих цветность воды, с целью экономии коагулянта, расходуемого на его обесцвечивание. Для дехлорирования чаще всего применяют обработку воды сульфатом натрия, сернистым газом и фильтрование дехлорируемой воды через активный уголь.

При длительном пребывании питьевой воды перед поступлением к потребителям в резервуарах и водоводах (более 1,5 ч) для продления бактерицидного действия хлора, а также для предотвращения хлорфенольных запахов в воду кроме него вводят также и аммиак. Введение аммиака, кроме того, сокращает расход хлора и в ряде случаев улучшает вкус воды. При взаимодействии хлорноватистой кислоты (образовавшейся при хлорировании воды) с аммиаком образуются монохлорамины которые, гидролизуясь, образуют гипохлоритный ион

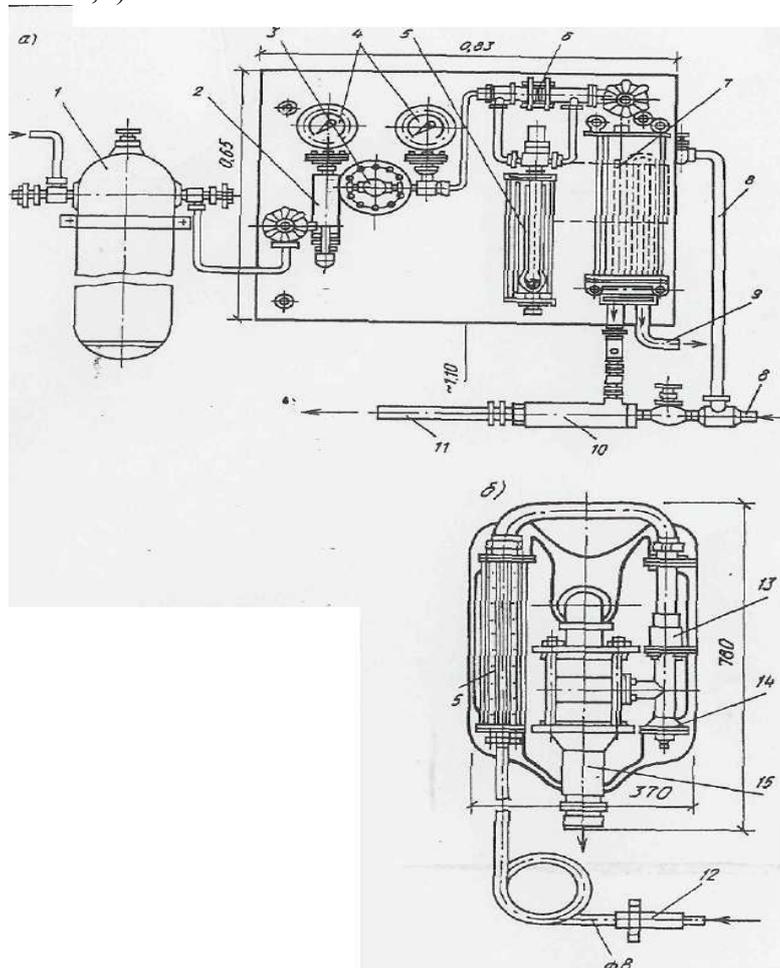




Гидролиз хлораминов протекает довольно медленно, поэтому в первое время окислительное действие хлораминов ниже, чем хлора, но длительность бактериального действия хлорамина значительно больше, в связи с чем и применяют аммонизацию воды перед длительным ее пребыванием в резервуарах, водоводах и сети. Соотношение доз хлора и аммиака зависит от качества исходной воды. Обычно оптимальной, обеспечивающей образование монохлораминов, является доза аммиака в 5 - 6 раз меньше дозы хлора.

Аммиачное хозяйство аналогично хлорному и обычно располагается в отдельных помещениях. Аммиак хранят в расходном складе в баллонах или контейнерах. Ввод аммиака производят в фильтрат при наличии фенолов - за 2 - 3 мин до ввода хлора.

Для ввода в воду хлора, аммиака и сернистого газа (при дехлорировании) применяют вакуумные газодозаторы системы ЛОНИИ - 100 (рис. 7.38,а) и системы Л.А.Кульского (рис. 7.38,б).



**Рис. 7.38. Хлораторы ЛОНИИ-100 (а) и системы Л.Л. Кульского ЛК-10(б)**

1 - промежуточный баллон с хлором; 2 - фильтр со стекловатой; 3 - редукционный клапан для снижения давления хлор-газа; 4 - манометры; 5 - ротаметр; 6 - измерительная диафрагма; 7 - смеситель; 8 - подача водопроводной воды; 9 - слив в канализацию; 10 - эжектор, создающий разрежение в хлораторе; 11 - отвод хлорной воды; 12 - микровентиль, регулирующий дозу вводимого в воду хлора; 13 - водяной клапан, предохраняющий измеритель хлора от попадания в него воды; 14 - воздушный клапан, регулирующий глубину вакуума; 15 - водоструйный насос

Из баллонов установленных на специальные контрольные весы, жидкий хлор перетекает в промежуточный баллон, где происходит его испарение и отделение загрязняющих хлор примесей. Далее уже газообразный хлор проходит через фильтр со стекловатой (для окончательной очистки хлор-газа) и затем через понижающий давление редуктор. Степень понижения давления фиксируется двумя манометрами, установленными до и после редукционного клапана. С помощью диафрагмы создается перепад давления, который служит импульсом для работы измерителя расхода хлора. Затем хлор поступает в смеситель, смешивается с водопроводной водой, образуя хлорную воду, которая засасывается эжектором и отводится по назначению. Вакуумные хлораторы системы Л.А.Кульского имеют характеристики: хлоратор ЛК-11 средней производительности для расхода хлора в пределах 0,5 - 4,5 кг/ч и хлоратор ЛК-10 малой производительности, подающий хлор в пределах 40 - 800 г/ч. Число резервных хлораторов на одну точку ввода рекомендуется принимать: при одном - двух рабочих хлораторах - 1 резервный, при трех - 2. Допускается предусматривать общие резервные хлораторы для предварительного и вторичного хлорирования воды.

С одного стандартного баллона при обычной комнатной температуре можно получить не более 0,5 - 0,7 кг/ч хлор-газа. Поэтому на крупных водоочистных комплексах с большим расходом хлора для увеличения съема хлора прибегают к специальному обогреву баллонов (теплой водой или подогретым воздухом при температуре 10 - 30 °С). Испаритель оборудуют устройствами для контроля температуры воды и давления хлора и воды. На водоочистных комплексах большой производительности применяют бочки, величина съема хлора с которых на 1 м<sup>2</sup> составляет около 3 кг/ч при комнатной температуре.

Учитывая, что хлор является отравляющим газом, при проектировании хлораторных установок следует предусматривать необходимые меры, обеспечивающие безопасность обслуживающего персонала. К числу этих мер относятся: наличие двух выходов из хлораторной; расположение хлораторной на первом этаже; наличие приточно - вытяжной вентиляции с устройством вытяжки в наиболее низкой части хлораторной, в месте, противоположном от входа; устройство электроосвещения с газозащитной герметичной аппаратурой; наличие тамбура с размещением в нем спецодежды и противогазов, а также устройств для включения и выключения вентиляции и освещения.

При хлорировании воды отстоянным раствором хлорной извести крепостью 1 - 1,5 % его приготавливают таким же способом, как и раствор коагулянта. Аналогичное устройство служит и для дозирования раствора. Ввиду сильного коррозионного действия раствора хлорной извести баки для его приготовления следует применять деревянные, пластмассовые или железобетонные, а арматуру и трубы - из полиэтилена или винилпласта.

При хлорировании воды в результате взаимодействия хлора с органическими веществами и фитопланктоном образуются канцерогенные летучие хлорорганические соединения (ЛХС) в основном относящиеся к группе тригалогенметанов (ТГМ). Основные концентрации ЛХС образуются при введении первичного хлора в неочищенную воду. Процесс образования ЛХС сложный и продолжительный во времени, существенное влияние на него оказывает содержание в обрабатываемой воде органических примесей, время контакта воды с хлором, доза последнего и рН воды. ЛХС не задерживаются на сооружениях традиционного типа, максимальное их количество наблюдается в резервуарах чистой воды.

Известны два возможных направления уменьшения содержания ЛХС в питьевой воде: предотвращение их формирования при водоподготовке и извлечение, на заключительных этапах обработки воды. Когда ЛХС, присутствует в исходной воде, следует применять методы их удаления. При отсутствии ЛХС в исходной воде следует использовать методы, предотвращающие образование ЛХС в процессе водоподготовки.

К методам удаления относятся аэрация и сорбция на активных углях. К методам предотвращения относятся предотвращение загрязнения водоисточников и предотвращение возможного образования ЛХС и хлороформа в процессе водообработки. Последнее предусматривает предварительную очистку воды от органических загрязнений (инфильтрация и пневмозавеса при водозаборе, микрофильтрация коагулирование, сорбция), изменение режима предварительного хлорирования воды (уменьшение дозы хлора, дробное хлорирование изменение точки ввода хлора) или отказ от него, замена хлора другими окислителями (озон, перманганат калия, хлорамины).

### **25.2.2. Обеззараживание воды гипохлоритом натрия**

Трудности, связанные с хранением и транспортировкой на значительные расстояния токсичного хлора обусловили недостатки метода, хлорирования воды. Возможность утечки хлора на базисных складах водоочистных комплексов, размещенных вблизи населенных пунктов, осложняет, а иногда делает невозможным использование этого метода, обеззараживания воды. Одним из наиболее перспективных способов обеззараживания питьевых вод на водоочистных комплексах является использование гипохлорита натрия ( $\text{NaClO}$ ), получаемого на месте потребления путем электролиза растворов поваренной соли или минерализованных вод, содержащих не менее 50 мг/л хлоридов. Электрохимический способ получения гипохлорита натрия основан на получении хлора и его взаимодействии со щелочью в одном и том же аппарате - электролизере.

Промышленностью серийно выпускается унифицированный ряд непроточных электролизных установок типа ЭН производительностью 1-100 кг активного хлора в сутки. Для небольших водоочистных установок рекомендуются электролизеры ВИЭСХ (0,1 - 0,2 кг/с хлора), а также электролизеры ЭН-1 и ЭН-5 производительностью 1 и 5 кг активной хлора в сутки. При необходимости можно осуществлять централизованное получение гипохлорита натрия на одном из пунктов с последующей доставкой его к отдельным потребителям. В этом случае, могут применяться установки ЭН-25 или ЭН-100 производительностью 25 и 100 кг активного хлора в сутки. Число электролизеров должно быть не более трех, из которых один резервный.

Электролизная установка непроточного типа (рис. 7.39) состоит из следующих основных узлов: бака для растворения соли, электролизера с зонтом вытяжной вентиляции, бака - накопителя гипохлорита натрия, выпрямительного агрегата и элементов автоматики. Она работает следующим образом. В растворный бак загружают поваренную соль, заливают воду и с помощью насоса перемешивают до получения насыщенного (280 - 300 г/л) раствора поваренной соли. Затем раствор с помощью насоса передают в электролизер, где разбавляют водопроводной водой до рабочей концентрации (100 - 120 мг/л). Готовый раствор сливают в бак - накопитель, откуда дозируют в обрабатываемую воду. Технологические характеристики электролизеров непроточного типа приведены в табл. 7.15.

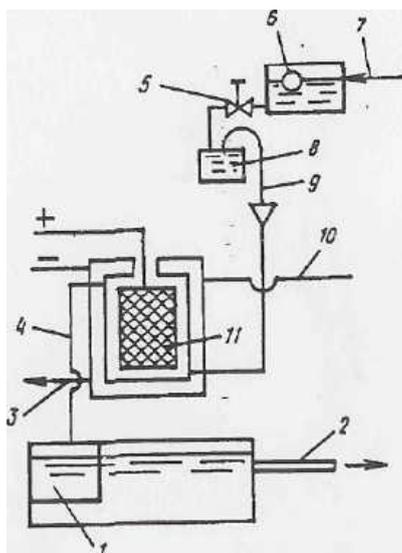


Рис. 7.39. Электролизная установка непрерывного действия

1 - сборный бак; 2 - отвод раствора гипохлора к дозатору; 3, 10 - отвод и подача охлаждающей воды; 4 - отвод готового раствора; 5 - регулирующий вентиль; 6 - бачок постоянного уровня; 7 - подача раствора поваренной соли; 8 - бак - дозатор; 9 - сифон; 11 - электролизер

Таблица 7.15

Показатель	Значения показателя для установки			
	ЭН-1	ЭН-5	ЭН-25	ЭН-100
Производительность по активному хлору, кг/сут	1	5	25	100
Токовая нагрузка, А	60 - 70	60 - 70	120 - 140	400 - 450
Рабочее напряжение, В	40 - 42	40 - 42	55 - 65	220 - 230
Концентрация активного хлора в растворе, г/л	6 - 7	6 - 7	10 - 12	10 - 12
Расход на 1 кг активного хлора:				
соли, кг	15 - 13	15 - 13	10 - 8	8 - 9
электроэнергии, кВт - ч	6 - 7,5	6 - 7,5	8 - 9	10 - 12
Объем электролитической ванны, м <sup>3</sup>	0,4	0,4	1	2,9
Производительность по активному хлору за 1 цикл, кг	0,33 - 0,25	2,4 - 2,6	10 - 12	25 - 33,3
Продолжительность 1 цикла, ч	0,75 - 0,9	7 - 8	10 - 12	5 - 6
Рекомендуемое число Циклов в сутки	3 - 5	2	2	3 - 4

Электролизеры следует устанавливать в отдельном помещении. Допускается совместное расположение в одном помещении электролизера и бака - накопителя гипохлорита натрия. Раствор гипохлорита натрия должен поступать в бак - накопитель самотеком, для чего перепад высот между сливным патрубком электролизера и баком - накопителем должен быть не менее 0,1 - 0,2 м,

Обеззараживание воды на установках производительностью до 5 тыс. м<sup>3</sup>/сут может быть достигнуто прямым ее электролизом при исходном содержании хлоридов не менее 20 мг/л и жесткости до 7 мг-экв/л. По Г.Л.Медришу, процесс протекает в два этапа: электрохимическое получение окислителей и их смешивание с обеззараживаемой водой. Одним из основных факторов прямого электролиза является вид применяемого анода; оптимальны платино-титановые аноды (ПТА) и оксиднорутениевые аноды (ОРТА).

Промышленность серийно выпускает установки прямого электролиза «Поток» с анодами из диоксида рутения и катодами из титана, которые чередуются с зазором между пластинами 3 мм. Установка состоит из электролизера, блока питания и замкнутого кислотного контура. Электролизер выполнен в форме параллелепипеда, внутри которого размещен пакет электродов. Кислотный контур предназначен для периодической промывки аппарата 3 - 5 % -ным раствором кислоты для борьбы с

катодным солеотложением. При одноразовом проходе под давлением обрабатываемой воды снизу вверх в межэлектродном пространстве электролизера обеспечивается ее обеззараживание, величина остаточного хлора в воде через 30 мин контакта составляет 0,3 - 0,5 мг/л. В табл. 7.16 приведены параметры рабочей установки «Поток».

Таблица 7.16

Параметры	Значения параметров при содержании хлоридов в исходной воде, мг/л		
	20 - 50	50 - 100	100 - 200
Доза хлора, г/м <sup>3</sup>	1	1	1
Производительность, м <sup>3</sup> /ч, при коэффициенте выхода хлора по току:			
0,2	5 - 7	8 - 10	9 - 11
0,4	8 - 9	11 - 13	14 - 16
0,6	11 - 12	15 - 17	20 - 23
0,8	14 - 16	20 - 24	28 - 32
Напряжение, В	8 - 11	6 - 8	-
Анодная плотность тока, А/м <sup>2</sup>		80 - 100	
Межэлектродное расстояние, мм		3 - 5	4 - 6

Как показали расчеты и практика, обеззараживание подземных вод предпочтительно производить прямым электролизом в рамках применимости данного метода.

### 25.2.3. Озонирование воды

Озон является одним из наиболее сильных окислителей, уничтожающих бактерий, споры и вирусы (в частности, вирусы полиомиелита). Преимуществом озонирования является и то, что при этом одновременно с обеззараживанием происходит обесцвечивание воды, а также ее дезодорация и улучшение вкусовых качеств. Озон не изменяет природные свойства воды, так как его избыток (непрореагировавший озон) через несколько минут превращается в кислород.

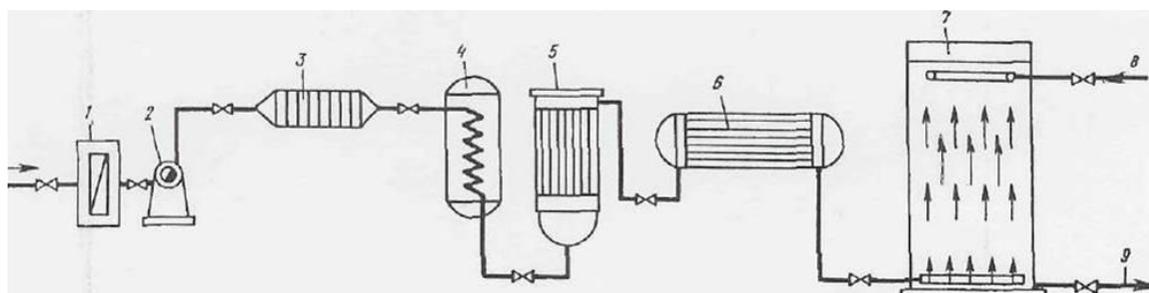
Озон (O<sub>3</sub>) - газ бледно - фиолетового цвета с острым характерным запахом, довольно хорошо растворим в воде. Озон взрывоопасен и агрессивен по отношению к веществам, способным окисляться. Он быстро разлагается с образованием молекулярного и атомарного кислорода с повышением температуры и концентрации в воде гидроксильных ионов и органических соединений. В процессе разложения озона имеются промежуточные реакции с образованием свободных радикалов HO<sub>2</sub> и OH, обладающих окислительными свойствами. Озон получают из атмосферного воздуха или технического кислорода в аппаратах, называемых озонаторами (генераторами), представляющими собой излучатели, состоящие из двух электропроводимых поверхностей - электродов в виде параллельных пластин с зазором, либо в виде двух концентрично расположенных цилиндров разного диаметра. К внутренней поверхности одного из электродов прикреплен диэлектрический материал (обычное или барносиликатное стекло). Этот диэлектрический барьер исключает образование разрядов искровой или дуговой формы и вызывает необходимость питания озонатора только переменным током.

Промышленность выпускает низкочастотные (50 - 200 Гц) озонаторы, работающие на токе промышленной частоты, и высокочастотные (400 - 10000 Гц) более компактные и менее металлоемкие. Завод «Курганхиммаш» серийно выпускает генераторы ОП-6 производительностью по озону до 8 кг/ч; производительность генератора РГО-1 по озону до 10 кг/ч и высокочастотные «Озон-10» также 10 кг/ч, «Озон-1,5» и «Озон-4» - соответственно 1,5 и 4 кг/ч озона (частота 2500 Гц).

Общая схема установки по озонированию показана на рис. 7.40. Озонаторный котел представляет собой горизонтальный цилиндрический аппарат с вмонтированными в него из нержавеющей стали трубками по типу теплообменника. Внутри каждой стальной трубы помещена стеклянная трубка с небольшой (2 - 3 мм) кольцевой воздушной прослойкой, являющейся разрядным пространством. Внутренняя поверхность стеклянных трубок покрыта графитомедным (или алюминиевым) покрытием. Стальные трубы являются одним из электродов, а покрытия на внутренних стенках стеклянных трубок - другим. К стеклянным трубам подводят электрический ток напряжением 8 - 10 кВ, а покрытия на стеклянных трубках заземляют. При прохождении электрического тока через разрядное пространство происходит разряд коронного типа, в результате которого в воздушном зазоре образуется озон. Предварительно осушенный и очищенный воздух проходит через кольцевое пространство и таким образом озонируется, т.е. образуется озон - воздушная смесь. Стеклянные трубки являются диэлектрическим барьером, благодаря чему разряд получается «тихим», т.е. рассеянным без образования искр. При этом до 90 % электроэнергии превращается в теплоту, которую отводит от озонатора циркулирующая в межтрубном пространстве аппарата охлаждающая вода.

Подача в озонаторы кислорода увеличивает выход озона в 2 - 2,5 раза по сравнению с подачей воздуха, но требует строительство установок для получения кислорода. Воздух, используемый в озонаторах, должен быть предварительно освобожден от влаги и пыли. Даже следы влаги, попадая в разрядное пространство аппарата, вызывают появление искрового разряда, который значительно снижает показатели работы озонатора - уменьшается выход озона и примерно в 4 раза возрастает расход электроэнергии (по сравнению с подачей сухого воздуха). Кроме того, присутствие следов влаги делает озон весьма агрессивным к деталям озонатора, трубам и арматуре. Для извлечения пыли воздух пропускают через матерчатые фильтры специальных конструкций, а для удаления влаги устанавливают адсорберы, разгружаемые обычно селикагелем. При сушке воздуха выделяется теплота. Чтобы в озонатор не попал слишком теплый воздух, его подвергают охлаждению. С этой целью воздух протекает через теплообменник либо охлаждают в самом адсорбере путем подачи воды через змеевик, располагаемый непосредственно в селикагеле.

Озон (озоновоздушная смесь) вводят в воду либо через эжекторы (эмульсаторы), либо через сеть пористых труб или распределительных каналов, укладываемых по дну контактного резервуара и перекрываемых фильтросными пластинами.



**Рис. 7.40. Схема озонаторной установки**

1 - воздушный фильтр; 2 - воздуходувка; 3 - водяной теплообменник; 4 - фреоновая холодильная установка; 5 - влагопоглотительный фильтр; 6 - озонатор; 7 - контактный резервуар; 8, 9 - подача исходной и отвод озонированной воды;

Доза озона зависит от назначения озонирования воды. Если озон вводят только для обеззараживания в фильтрованную воду (после ее предварительного коагулирования), то дозу озона принимают 1 - 3 мг/л, для подземной воды 0,75 - 1 мг/л, при введении озона для обесцвечивания и дезодорации воды доза озона может

доходить до 4 мг/л. Экспозиция обрабатываемой воды с озоном принимается 6 - 12 мин.

### 25.3. ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ ВОДЫ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМИ ЛУЧАМИ

Для обеззараживания природных вод рекомендуется применять бактерицидное излучение при условии если коли - индекс воды не более 1000 ед. на 1 л, содержание железа до 0,3 мг/л, мутность до 2 мг/л. Обеззараживание воды бактерицидными лучами имеет преимущества перед хлорированием, так как природные вкусовые качества и химические свойства воды не изменяются. Бактерицидное действие лучей протекает во много раз быстрее, чем хлора; после облучения воду сразу; можно подавать потребителям. Бактерицидные лучи уничтожают не только вегетативные виды бактерий, но и спорообразующие. Эксплуатация установок для обеззараживания воды бактерицидными лучами проще, чем хлорного хозяйства.

По В.Ф. Соколову, наибольшим бактерицидным эффектом обладают ультрафиолетовые лучи с длиной волны от 295 до 200 мкм. Эту область ультрафиолетового излучения называют бактерицидной. Максимум бактерицидного действия располагается около длины волны 260 мкм. Процесс отмирания бактерий описывается уравнением

$$P = P_0 \exp(-Et/K),$$

где  $P$  - число бактерий в единице объема, оставшихся живыми после бактерицидного облучения;

$P_0$  - начальное число бактерий в единице объема;

$E$  - интенсивность потока бактерицидных лучей;

$t$  - экспозиция облучения;

$k = 2500$  - коэффициент сопротивляемости бактерий, мкВт с/м<sup>2</sup>.

Бактерии и вирусы, находящиеся в воде, имеют различную степень сопротивляемости действию бактерицидных лучей и значение коэффициента  $k$ , зависит от вида бактерий. Коэффициент сопротивляемости различных видов вегетативных и патогенных бактерий практически, не превышает коэффициента сопротивляемости бактерий коли, равного приблизительно 2500, что и принимают при расчетах необходимого количества бактерицидной энергии для обеззараживания. При этом эффект обеззараживания воды, характеризуемый отношением  $p/p_0$ , подсчитывают по отмиранию бактерий коли. Он зависит от количества затрачиваемой бактерицидной энергии ( $E t$ ), т.е. один и тот же эффект может быть получен при малой интенсивности облучения, по большой экспозиции и, наоборот, при большой интенсивности облучения и малой продолжительности контакта. При определении необходимого количества бактерицидной энергии следует учитывать ее поглощение при прохождении потока лучей через слой воды: для бесцветных, не требующих обезжелезивания подземных вод, получаемых с артезианских горизонтов, - 0,1 см<sup>-1</sup>; для родниковой, грунтовой, подрусловой и инфильтрационной воды - 0,15 см<sup>-1</sup>; для воды поверхностных источников водоснабжения, прошедшей очистку на очистных сооружениях, - 0,2 - 0,3 см<sup>-1</sup>. В последнем случае рекомендуемое значение коэффициента поглощения принято с запасом с учетом возможных случайных отклонений показателей качества воды по мутности и цветности от требований ГОСТ 2874 - 82 «Вода питьевая». В.Ф.Соколов предложил расчетную формулу, которую применяют при проектировании установок для обеззараживания воды бактерицидными лучами

$$F_p = \frac{q \cdot a \cdot k \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right)}{1563,4 \eta_0 \cdot \eta_p}$$

- где  $F_p$  - расчетный поток бактерицидной энергии, Вт;  
 $q$  - расход обеззараживаемой воды, м<sup>3</sup>/ч;  $a$  - коэффициент поглощения, см<sup>-1</sup>;  
 $p_0$  - коли - индекс воды до облучения;  
 $p$  - коли - индекс воды после облучения, принимаемый согласно ГОСТ 2874 - 82 не более 3;  
 $\eta_0$  - коэффициент использования бактерицидного потока, учитывающий поглощение лучей в слое воды, принимаемый равным 0,9;  
 $\eta_p$  - коэффициент использования бактерицидного потока, учитывающий поглощение лучей отражателем (в аппаратах с непогруженным источником) или кварцевых чехлах (в аппаратах с погруженными источниками). Значение коэффициента зависит от типа аппарата; для предварительных расчетов он может быть принят равным 0,9.

Необходимое количество бактерицидных ламп  $n$  определяют по формуле  $n = F_p/F$ , где  $F$  - расчетный бактерицидный поток каждой лампы (табл. 7.17).

Таблица 7.17

Тип лампы	Бактерицидный поток, Вт	Потребляемая мощность, Вт
УВ-30	2	30
БУВ-60П	6,5	60
ПРК-7	35	1000
РКС-2,5	-	6000

Расход электроэнергии, Втч/м<sup>3</sup>, на обеззараживание воды

$$S = Nn/q,$$

где  $N$  - потребляемая мощность лампы, Вт.

Распространенными источниками бактерицидного излучения являются ртутно - кварцевые лампы высокого давления ПРК и аргонортутные лампы низкого давления РКС-2,5. Ртутно - кварцевые лампы высокого давления (0,05 - 0,1 МПа) с температурой оболочки при горении лампы до 250 - 200 °С являются мощными источниками видимого света и ультрафиолетовых лучей с максимумом излучения линий 365,0 - 3666,3 мкм. Указанные в табл. 7.17 основные расчетные параметры ртутно-кварцевых (ПРК и РКС) и аргонортутных (БУВ) ламп относятся к концу расчетного срока их службы, т.е. после 4500 - 5000 ч горения. Бактерицидный поток новых ламп на 30 % выше.

Небольшая мощность аргонортутных ламп, их экономичность позволяет применять их в установках небольшой производительности. Ртутно-кварцевые лампы высокого давления, хотя и менее экономичные, чем аргонортутные, применяют для обеззараживания большого количества с незначительным бактериальным загрязнением, так как это более экономично по сравнению с хлорированием. В отечественной практике применяют несколько типов установок для обеззараживания воды бактерицидными лучами, разработанных в НИИ КВОВ Академии коммунального хозяйства (табл. 7.18).

Таблица 7.18

Тип установки	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Предельное давление, МПа	Тип и число ламп	Мощность, потребляемая установкой, кВт	Завод - изготовитель
ОВ-1П	3	0,5	БУВ-60П 1 шт.	0,06	Машиностроительный завод (г. Сергиев Посад)
ОВ-АКХ-1 двухкамерная	60.	0,5	ПРК-7м 2 шт.	2	Вяземский машиностроительный завод
ОВ-АКХ-1 трехкамерная	90	0,5	ПРК-7 м 3 шт.	3	То же
ОВ-1П-РКС	50-70	1,0	РКС-2,5 1 шт.	6	Машиностроительный завод (г. Сергиев Посад)
ОВ-3П-РКС	150-200	1,0	РКС-2,5 3 шт.	18	Экспериментальный завод коммунального оборудования АКХ

**Примечания:** 1. Присоединительные и установочные размеры принимают в соответствии с данными заводов - изготовителей.

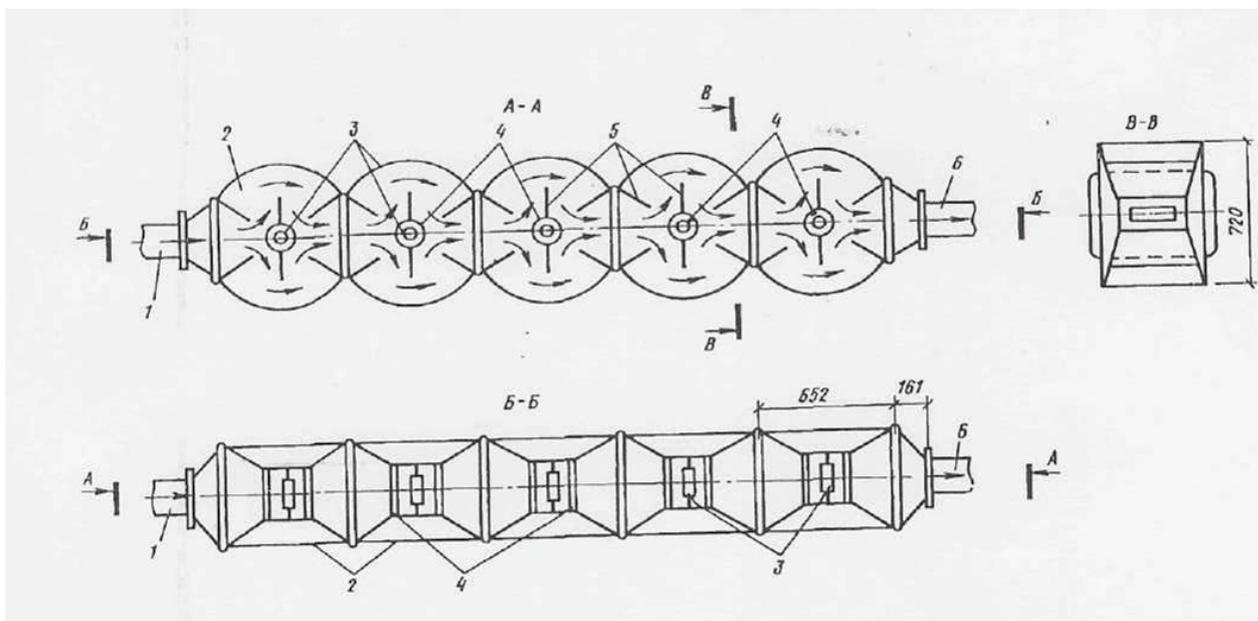
2. Техническая документация на указанные установки находится на заводах - изготовителях.

**Установка типа ОБ-Ш** применяется для обеззараживания воды на небольших объектах. Она состоит из корпуса и одной бактерицидной лампы БУВ - 60П, размещенной в кварцевом цилиндрическом чехле. Пусковое устройство к бактерицидной лампе крепят непосредственно к корпусу установки. Вода поступает в аппарат через нижний входной патрубок. Внутри аппарата имеется спираль, которая сообщает воде вращательное движение, способствующее хорошему перемешиванию потока. Многократно омывая кварцевый чехол, вода подвергается равномерному облучению и обеззараживанию. Потери напора в установке при расчетном расходе 3 м<sup>3</sup>/ч составляют 0,2 м вод.ст. Установку монтируют в помещении с температурой воздуха не ниже +5 °С вертикально на трубопроводе за насосом непосредственно у водопотребителя. Для ее работы требуется переменный ток напряжением 220 В. Периодически (1 - 2 раза в месяц) необходимо очищать кварцевый чехол от образующегося на нем осадка. Очистку производят без выключения установки путем нескольких возвратно - поступательных движений спирали, передвигаемой с помощью рукоятки.

**Установка типа ОБ-3Н** предназначена для обеззараживания воды на водоочистных комплексах небольшой мощности. Она состоит из корпуса в виде прямоугольной камеры с тремя лотками, крышки корпуса, в которой размещены бактерицидные лампы и шкафа управления. Установка оборудована бактерицидными лампами БУВ-60П и рассчитана на производительность до 8,0 м<sup>3</sup>/ч. Вода в установке ОБ-3Н движется самотеком, через приемную камеру, дырчатую перегородку и далее проходит по лоткам, дважды меняя направление. При течении воды по лоткам поток перемешивается, подвергаясь равномерному воздействию бактерицидного излучения ламп. Потеря напора в установке при расчетном расходе воды 8 м<sup>3</sup>/ч составляет 0,10 - 0,15 м, Установку монтируют в помещении с температурой воздуха не ниже +5 °С и только в горизонтальном положении. Для работы установки требуется переменный ток напряжением 220 В.

**Установка типа ОБ-АКХ-1** (рис. 7.41) применяют для обеззараживания воды на водопроводах средней производительности. Установка состоит из двух основных частей:

технологической и электрической. В первую входят секции установки, включающие в себя ряд (от двух до пяти) последовательно соединенных бактерицидных камер. Вторая - состоит из шкафа управления и ящика сигнализации. Каждая камера представляет собой литую цилиндрическую конструкцию с шестью внутренними радиальными перегородками, обеспечивающими интенсивное перемешивание воды во время облучения. В центральной части каждой камеры в кварцевом цилиндрическом чехле помещена ртутно-кварцевая лампа типа ПРК-7. Производительность установки в зависимости от числа камер составляет от 30 до 150 м<sup>3</sup>/ч. Обеззараживаемая вода подается во входной патрубке и движется через последовательно расположенные камеры и далее в сеть.



**Рис.7.41. Бактерицидная установка ОВ-АКХ -1**

1, 6 - подача и отвод воды; 2 - бактерицидная камера; 3 - ртутно-кварцевые лампы типа ПРК-7; 4 - кварцевые чехлы; 5 - струенаправляющие перегородки;

**Напорная установка ОВ-Щ-РКС** состоит из камеры, оборудованной спиралью и одной лампой РКС-2,5, помещенной в кварцевом чехле. Комплект установки состоит из ряда цилиндрических последовательно соединенных типовых камер. Подача одной камеры составляет до 70 м<sup>3</sup>/ч.

**Безнапорная установка ОВ-ЗП-РКС** рассчитана на расход 3000 м<sup>3</sup>/ч и более. Она устанавливается в канале в виде рам - кассет, на которых закреплены блоки с лампами РКС-2,5. В кассете закрепляют несколько ламп, защищенных кварцевыми цилиндрическими чехлами. Чтобы обеспечить турбулентный режим движения воды в канале и хорошее перемешивание во время облучения, лампы располагают в шахматном порядке. Это обеспечивает высокий коэффициент использования бактерицидного потока. Канал, оборудованный кассетами, сверху перекрыт съемными крышками. Рядом с каналом располагается пульт управления с пусковой аппаратурой к лампам.

Многолетний опыт эксплуатации установок обеззараживания воды бактерицидными лучами показывает, что этот метод обеспечивает надежную дезинфекцию воды. Эксплуатационные расходы на обеззараживание воды облучением не превышает эксплуатационных затрат на хлорирование, а на водопроводах, использующих в качестве источников водоснабжения подземные, родниковые или подрусовые воды, обеззараживание воды облучением дешевле в два - три раза по

сравнению с хлорированием. Расход электрической энергии на обеззараживание воды из подземных источников водоснабжения облучением не превышает 10 - 15 Вт·ч/м<sup>3</sup>. Расход электрической энергии на облучение обработанной воды из открытых источников водоснабжения составляет до 30 Вт·ч/м<sup>3</sup>.

Недостатком рассматриваемого метода обеззараживания является невозможность оперативного контроля за эффектом обеззараживания в отличие от хлорирования (по остаточному хлору).

## **Глава 26. ДЕЗОДОРАЦИЯ И ДЕГАЗАЦИЯ ВОДЫ**

### **26.1. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРИВКУСОВ И ЗАПАХОВ ВОДЫ**

Запахи и привкусы воды вызывают неорганические соединения (минеральные соли, сероводород, метан и др.) и органические вещества биологического происхождения или вносимые недостаточно очищенными сточными водами. Присутствие в обрабатываемой воде молекулярно растворенных органических веществ биологического происхождения является результатом распада и последующей трансформации остатков высших водных растений, а также планктона и бентоса, различных грибов и бактерий. Интенсивное обогащение воды органическими веществами обычно наблюдается в периоды «цветения» водоемов, так как в это время вследствие массового развития и жизнедеятельности водорослей в воду экстрагируется большое количество сильно пахнущих низкомолекулярных кетонов, спиртов, альдегидов, карбоновых кислот, фенолоподобных веществ и пр.

Сброс в водоемы недостаточно очищенных сточных вод, поверхностный смыв сельскохозяйственных угодий загрязняет их фенолами и синтетическими алифатическими спиртами и кислотами, пестицидами и гербицидами, СПАВ, углеводородами нефти и нефтепродуктов и др. Качество воды часто ухудшается в процессе ее реагентной обработки.

В таких условиях применение традиционных технологически приемов часто оказывается недостаточным, чтобы получить питьевую воду, соответствующую по химическому составу требованиям ГОСТ 2874 - 82. Установлено, что традиционные приемы очистки воды обладают слабо выраженным барьерным действием в основном по отношению к тем химическим загрязнениям, которые находятся в воде в виде взвеси и коллоидов или переходят в растворимую форму в процессе очистки и предварительной обработки хлором (например, эмульгированные фракции нефти, плохо растворимые пестициды некоторые металлы). По отношению к таким загрязнениям барьерная роль очистных сооружений может быть повышена путем соответствующего подбора реагентов и высокой степени осветления воды. В качестве дополнительных методов могут использоваться окисление химических загрязнений и их сорбция на активных углях. Исследования по действию окислителей на различные вещества показали, что окисление даже при использовании такого сильного окислителя, как озон, не всегда может рассматриваться в качестве санитарно - надежного метода очистки воды, так как могут образовываться формальдегиды и ацетальдегиды. При действии окислителей на органические веществ, последние взаимодействуют с ними, превращаясь в другие соединения которые менее токсичны и более благоприятны в органолептическом отношении, чем исходные. Однако имеются вещества, которые при недостаточно глубоком окислении переходят в соединения, придающие воде запах, привкус или окраску, а иногда и более токсичные, например, при неглубоком окислении некоторых фосфорорганических пестицидов. Таким образом, действие окислителей эффективно лишь по отношению к органическому числу загрязнений.

Недостатком окислительного метода является необходимость точного дозирования окислителя в строгом соответствии с уровнем и видом загрязнения воды, что крайне

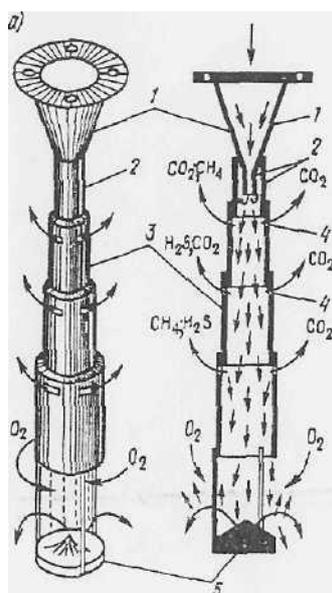
затруднительно, принимая во внимание сложность и длительность многих химических анализов.

Более надежным и экономичным является применение сорбционных фильтров с гранулированным активным углем (ГАУ), используемым в качестве фильтрующей загрузки. Фильтры с ГАУ независимо от колебания уровня загрязнения воды являются постоянно действующим барьером по отношению к сорбируемым веществам. Серьезным затруднением для применения этого метода очистки воды являются сравнительно малая сорбционная емкость угля и несовершенство его регенерации.

## 26.2. ДЕЗОДОРАЦИЯ И ДЕГАЗАЦИЯ ВОДЫ АЭРАЦИЕЙ

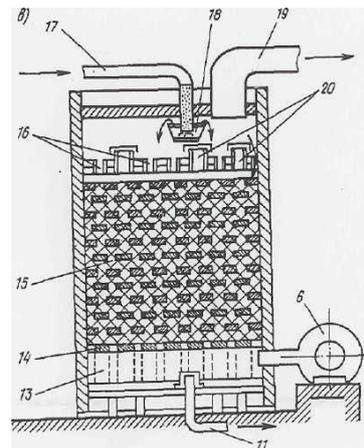
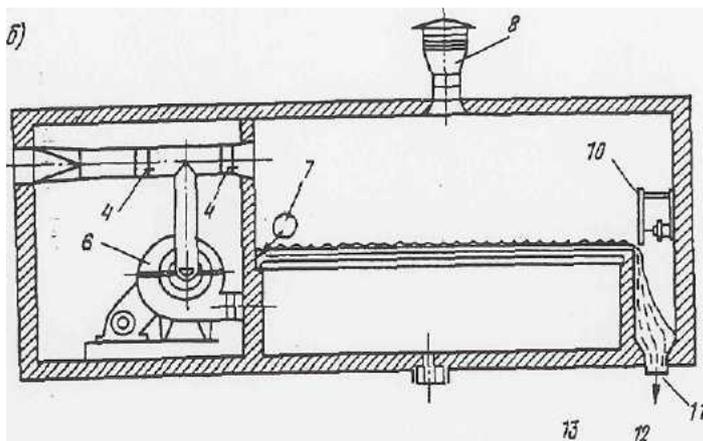
Многие примеси воды неорганического происхождения, находящиеся в молекулярном состоянии и обуславливающие привкусы и запахи, обладают летучестью, что позволяет извлечь их аэрацией (дегазацией). Аэрация должна осуществляться до введения окислителей во избежание их потерь. Аэрирование воды производят в специальных установках - аэраторах вакуумно-эжекционного, барботажного, разбрызгивающего и каскадного типов.

В вакуумно-эжекционном аппарате (ВЭА) в вакуумной камере за счет большой скорости движения воды происходит резкое понижение давления, способствующее почти полной десорбции растворенных в ней газов (рис. 7.42,а). В последующих эжекционных камерах за счет подсоса воздуха извне происходит окисление кислородом некоторых ароматических веществ.



**Рис. 7.42. Аэрационные аппараты вакуумно-эжекционного (а), пенного (б) и клепочного (в) типов**

1 - конический сходящийся насадок; 2 - вакуумная камера; 3 - эжекционные камеры; 4 - окна для удаления растворенных газов и подсоса воздуха; 5 - отражательная пластина; 6 - вентилятор; 7 - распределительная труба; 8 - дефлектор; 9 - слой пены; 10 - отбойным щит; 11 - отвод дегазированной воды; 12 - перфорированные пластины; 13 - поддон; 14 - дренажная плита; 15 - насадка из колец Рашига или пластмассовых колец; 18 - оросительные патрубки; 17 - подача исходной воды; 18 - распределительная чаши; 19 - отвод выделившихся газов; 20 - патрубки отвода газовой смеси;



В аэраторах барботажного типа распределение воздуха в воде слоем 1 - 3,5 м. обеспечивается перфорированными трубами, пористыми пластинами или трубами. Расход воздуха составляет 0,37 - 0,75 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> воды, продолжительность продувки до 15 мин.

Разновидностью барботажных аэраторов являются дегазаторы пенного типа (рис. 7.42,б). Основным конструктивным элементом аппарата служит перфорированная пластина (решетка), по которой тонким слоем течет вода, пронизываемая поперечным током воздуха, что вызывает ее вспенивание. В пенном слое из воды интенсивно десорбируются газы и происходит окисление кислородом легкоокисляемых веществ. В аппарате должно быть не более четырех - пяти полок. Для подачи воздуха используют центробежные вентиляторы среднего давления.

В разбрызгивающих аэраторах (брызгальные бассейны) аэрируемая вода распыляется соплами на мелкие капли, что способствует увеличению поверхности ее контакта с воздухом. Продолжительность контакта воды с воздухом определяется начальной скоростью струи и ее траекторией и обычно составляет около 2 с. Объем бассейна рассчитывают на 30-минутное пребывание воды в нем. Нагрузка по воде определяется из расчета 5 м<sup>3</sup>/ч на 1 м<sup>2</sup> по поверхности при напоре 0,7 МПа. Принимают четыре - шесть сопел на 10 м<sup>2</sup> зеркала воды в бассейне.

В аэраторах каскадного типа аэрируемая вода падает струями через несколько последовательно расположенных водосливов. Продолжительность контакта определяется числом ступеней водосливов. Потери напора составляют 0,9 - 1,3 м.

Одним из наиболее совершенных аэраторов является дегазатор пленочного типа (рис. 7.42,б), загруженный керамическими или пластмассовыми кольцами для увеличения поверхности контакта аэрируемой воды и воздуха. Обработанная вода стекает тонкой пленкой сверху вниз, а снизу под контактную массу вентилятором нагнетается воздух. Нагрузка по воде варьируется в зависимости от решаемой задачи.

### 26.3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОКИСЛИТЕЛЕЙ ДЛЯ ДЕЗОДОРАЦИИ ВОДЫ

В последние годы в связи с возросшим загрязнением водоемов органическими соединениями за счет смыва с сельскохозяйственных угодий и сброса недостаточно очищенных сточных вод значение окислителей в практике очистки питьевой воды существенно возросло, так как многие химические вещества, присутствующие в воде, разрушаются в той или иной степени под действием окислителей. Продукты их трансформации могут значительно отличаться от исходных веществ - загрязнителей не только по своей химической структуре и физико - химическим свойствам, но и по токсичности. Практика токсиколого - гигиенической и технологической оценки эффективности использования окислителей показывает, что решающим является выбор окислителя для очистки питьевой воды от химических загрязнений. При этом

необходимо учитывать не только величину окислительно-восстановительного потенциала каждого окислителя, но и другие факторы, оказывающие существенное влияние на эффективность очистки: степень и характер химического загрязнения воды, ее состав, наличие природных соединений, таких, как гуминовые и сложные фенолы, способные окисляться, величина рН воды и т.д. При этом необходимо учитывать способность некоторых окислителей к реакциям замещения с включением молекул окислителя в образующиеся химические вещества, в результате чего в воде могут появиться нежелательные и даже опасные соединения. Так, при обработке хлором воды, содержащей фенолы, образуются хлор - фенолы - придающие ей резкий неприятный запах. Возможно образование и токсичных хлорорганических соединений - хлорированных углеводов. В практике водоподготовки применяют следующие окислители: озон, перманганат калия, хлор и его производные.

Озон ( $E = 2,07$  В) является наиболее сильным из всех известных окислителей. Одним из его преимуществ с гигиенической точки зрения является неспособность в отличие от хлора к реакциям замещения, о которых указывалось выше. Особенностью озона является то, что он быстро разлагается. С одной стороны, это вызывает некоторые технические трудности, а с другой - создает определенные преимущества так как даже при некотором передозировании остаточные количества его не могут быть велики, не требуется его устранение. Механизм действия озона на органические соединения происходит по реакциям окисации и озонолиза (расщепление молекул в местах ненасыщенных связей). Вводить излишне большие дозы озона при обработке питьевой воды не рекомендуется, поскольку после нее вода может приобретать неприятный ароматический запах. Дозы озона 1,5 - 3 мг/л, время контакта 8 - 12 мин.

**Перманганат калия** ( $E = 1,83$  В) является менее сильным окислителем, чем озон, он не вступает в реакции замещения. К недостаткам перманганата калия следует отнести его сравнительно высокую стоимость, дефицитность, а также опасность появления остаточных концентраций поскольку марганец нормируется в питьевой воде до 0,1 мг/л.

Приготовление раствора перманганата калия концентрацией 0,5 - 2 % (по товарному продукту) производят в баках с механическим побуждением, рассчитанных на время полного растворения реагента 4 - 6 ч при температуре воды 20 °С и 2 - 3 ч при 40 °С. Количество растворных или растворно - расходных баков принимают не менее двух.

**Хлор** ( $E = 1,36$  В) - наиболее дешевый и распространенный из указанных выше окислителей, но значительно слабее. Недостатком хлора является его способность вступать в реакции замещения, в результате чего могут образовываться нежелательные побочные соединения. Вещества с альдегидной функцией в кислой среде хорошо окисляются хлором, а нейтральной и щелочной хлорноватистой кислотой.

Рассматривая действие окислителей в целом, следует отметить, что в большинстве случаев при их применении наблюдается улучшение органолептических свойств обрабатываемой воды: исчезают запахи и привкусы, снижается или полностью исчезает цветность и окраска, вода перестает пениться. В результате деструкции образуются менее сложные по химической структуре и, как правило, менее опасные, в том числе и в плане отдаленных последствий действия, вещества - продукты трансформации. Но необходимо подчеркнуть, что некоторые химические соединения в обычных условиях практически не поддаются действию окислителей, даже такого наиболее сильного из них, как озон. К таким веществам относятся пиридин бензол и его производные, ряд ароматических нитросоединений, альдегиды, кислоты. Ряд соединений окисляются не полностью, в результате чего образуются продукты, придающие воде запах (фосфорорганические и поверхностно - активные вещества, фенолы) или окраску (нитросоединения, фенолы). При частичной окисации химических веществ, присутствующих в воде, могут появляться и более токсичные соединения, как, например, при окисации некоторых фосфорорганических пестицидов. Поэтому можно говорить о существовании «критических» концентраций загрязнений, т.е. таких концентраций, при которых

возникает опасность появления в воде недопустимых количеств неблагоприятных продуктов взаимодействия. Кроме того, понятие «критических концентраций» может быть также связано с технико-экономической нецелесообразностью применения высоких доз окислителя. Ориентировочные дозы окислителей на стадии ТЭО можно принимать по табл. 7.19.

Доза окислителя может дробиться, т.е. он может вводиться в воду по частям перед сооружениями разного типа. Ввод окислителей перед коагулянтами или сорбентом либо одного перед другим должен производиться с разрывом по времени. При невозможности его соблюдения необходимо предусматривать контактные камеры. Непременным условием успешного применения окислителей является глубокое окисление химических веществ, т.е. до стадии образования карбоновых кислот.

Необходимость точного дозирования окислителей в соответствии с уровнем и видом загрязнения воды, а также сложность и длительность химических анализов зачастую не позволяет выдерживать на практике эти условия. Поэтому применение окисления как самостоятельного метода для устранения органических загрязнений из воды может быть допущено только в том случае, если уровень загрязнений колеблется незначительно, не выходя за границы «критической» концентрации и существует уверенность, что в результате окисления не будут образовываться неблагоприятные в органолептическом отношении или опасные для здоровья населения продукты трансформации химических веществ. Необходимо отметить, применение в хозяйственно-питьевом водоснабжении озона и перманганата калия для дезодорации воды не исключает необходимости ее хлорирования для обеззараживания.

Таблица 7.19

Окислитель	Доза окислителя, мг/л, при перманганатной окисляемости воды, O <sub>2</sub> /л		
	8 - 10	10 - 15	15 - 25
Хлор	4 - 8	8 - 12	12 - 14
Перманганат калия	2 - 4	4 - 6	6 - 10
Озон	1 - 3	3 - 5	5 - 8

#### 28.4. Дезодорация воды сорбцией

Дезодорация воды сорбцией является более надежным методом, по сравнению с окислительным, так как он основан не на трансформации органических веществ, а на их извлечении из воды. Из известных сорбентов наиболее эффективными являются активные угли. Они хорошо сорбируют фенолы, полициклические ароматические углеводороды, в том числе канцерогенные, большинство нефтепродуктов, хлор- и фосфорорганические пестициды и многие другие органические загрязнения. Но сорбцию на активных углях нельзя рассматривать в качестве универсального способа очистки воды от органических соединений. Известны вещества, которые ими не задерживаются, например, органические амины или извлекаются плохо например СПАВ.

Активные угли применяют в виде порошка (углевание воды) или в виде гранул в качестве загрузки фильтров. Углевание воды имеет ряд недостатков, которые ограничивают его использование:

трудности, связанные с приготовлением и дозированием угольной пульпы, с необходимостью иметь емкости для контакта АУ с обрабатываемой водой, одноразовое применение угля. Поэтому углевание воды, может быть, использовано эпизодически, кратковременно и в небольших дозах.

Для дозирования угольной пульпы предусматривают замачивание угля в течение одного часа в баках с механическим или гидравлическим перемешиванием. Угольную

пульпу концентрацией до 8 % вводят в воду до коагулянта не менее чем за 10 мин. Дозу угля перед фильтрами принимают до 5 мг/л, а перед сооружениями предочистки она не лимитирована.

Таблица 7.20

Марка угля	Объем пор, см <sup>3</sup> / г				Площадь поверхности пор, м <sup>2</sup> / г		Крупность основной фракции, мм	Насыпная плотность, ρ <sub>н</sub> , г/дм <sup>3</sup>	Прочность (по МИС) 60 - 80 %
	суммарный V <sub>Σ</sub>	микропор V <sub>мб</sub>	переходных пор V <sub>п</sub>	макропор V <sub>ма</sub>	суммарная s <sub>Σ</sub>	переходных пор s <sub>п</sub>			
ОУ - А	2,38	0,26	0,27	1,78	805	138	-	-	-
ОУ - Б	-	0,39	0,21	-	-	138	-	-	-
КАД:									
молотый	0,42	0,11	-	-	-	64	-	-	-
йодный	1,00	0,34	0,15	0,51	977	110	2,0 - 5,0	380 - 450	60
АГ - 2	0,60	0,30	0,05	0,25	-	33	1,5 - 2,0	600	65 - 70
АГ - 3	0,8 - 1,06	0,32 - 0,42	0,12 - 0,16	0,41 - 0,52	-	-	1,5 - 2,8	450	75
АГ - 5	0,9 - 1,06	0,3 - 0,43	0,17	0,46	-	-	1,0 - 1,5	450	75
СКТ	0,98	0,50	0,20	0,27	-	108	1,5 - 2,0	420	65
СКТ - 3	0,80	0,46	0,09	0,25	-	-	2,0 - 3,5	420 - 470	70
АР - 3	0,70	0,33	0,07	0,30	-	48	2,7 - 5,5	550	65 - 75
БАУ	1,50	0,25 - 0,39	0,08	0,19 - 0,21	915	50 - 60	1,0 - 5,0	220 - 350	-
ДАК	1,1 - 2,16	0,17	0,04	1,23	30	-	0,5 - 1,5	230	-

Более надежным является применение ГАУ, используемых в качестве фильтрующей загрузки. Фильтры с ГАУ независимо от колебания уровня загрязнения воды, служат постоянно действующим барьером по отношению к сорбируемым веществам, если емкость угля не исчерпала. В табл. 7.20 приведены характеристики активных углей, получивших распространение в технологии улучшения качества воды. Следует отметить, что уголь марки АГ - 5 можно применять не только при подготовке технической воды.

На рис. 7.43 показаны схемы напорных фильтров с ГАУ, возможно применение открытых фильтров и совмещенных осветлительно сорбционных (рис. 7.43,в). Угольные фильтры располагают после осветлительных. Сорбционные фильтры периодически промывают водой. Узким местом эксплуатации угольных фильтров является регенерация ГАУ, которая может производиться химическим, термическим и биологическим методом. Химический метод предусматривает предварительную обработку угля острым паром, а затем щелочью. Метод сложный, трудоемкий и недостаточно эффективный, так как не восстанавливает сорбционную способность материала полностью. Термический метод заключается в выжигании адсорбированных органических соединений в специальных печах при температуре 800 – 900 °С. На рис. 7.44 показана схема организации работы фильтров с непрерывным обжигом активного угля. Описываемый метод регенерации не только сложен, но сопряжен с потерями угля при обжиге до 12 %. Биологический метод регенерации основан на жизнедеятельности бактерий, минерализующих адсорбируемые углем органические соединения, однако этот процесс протекает крайне медленно.

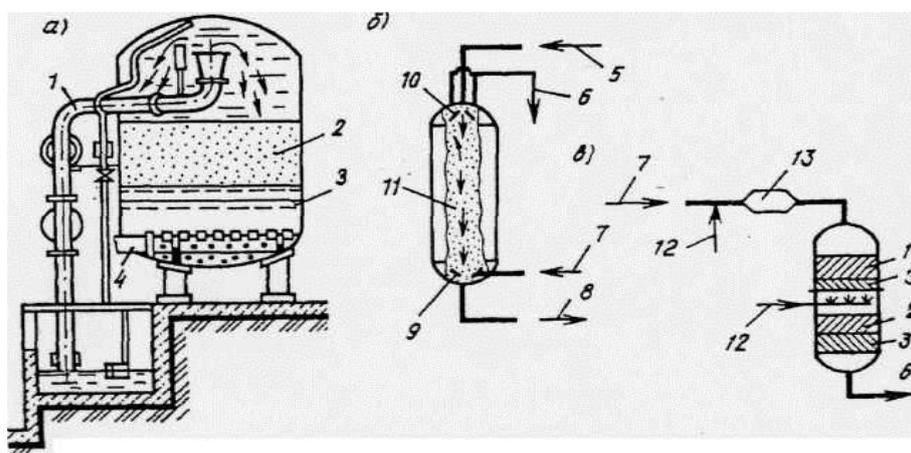


Рис. 7.43. Напорные угольные фильтры со стационарным (а) и взвешенным (б) слоями активного угля и схема прямооточного осветлительно - адсорбционного фильтра (в)

1, 4 - подача исходной и отвод обработанной воды; 2 - слой активного угля; 3 - поддерживающий слой; 5,8 - отвод и подача угольной пульпы; 6, 7 - отвод очищенной и подача исходной воды; 9, 10 - распределительное и дренажное устройства; 11 - противоток очищаемой воды и активного угля; 12 - ввод катионного флокулянта; 13 - смеситель; 14 - керамзит (кварцевый песок), модифицированный сульфатом алюминия; 15 - подача промывной воды

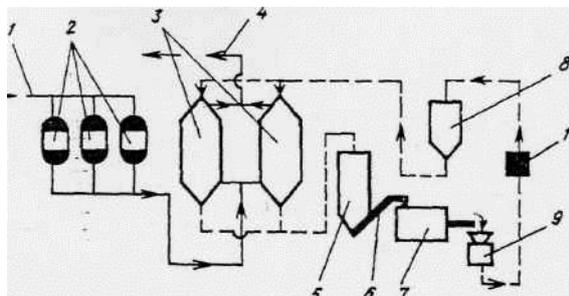


Рис. 7.44. Схема работы угольных фильтров с непрерывной термической регенерацией активного угля

1, 4 - подача исходной и отвод очищенной воды; 2 - механические фильтры предварительной очистки; 3 - угольные фильтры со взвешенным слоем; 5 - бункер отработавшего активного угля; 6 - шнек; 7 - печь для прокаливания угля; 8 - промежуточный бункер; 9 - бак для охлаждения угля; 10 - камера обдувки угля

## 26.5. ОКИСЛИТЕЛЬНО-СОРБЦИОННЫЙ МЕТОД ДЕЗОДОРАЦИИ ВОДЫ

Эффект дезодорации воды сорбцией и оксидацией примесей, а также межре - генерационный период работы ГАУ может быть резко увеличен, если воду перед фильтрованием через уголь обработать окислителем. При такой обработке воды происходит не простое суммирование двух процессов, а имеет место эффект окислительно-сорбционного взаимодействия, который заключается в том, что, с одной стороны, уголь выступает в качестве катализатора оксидации, значительно повышая глубину и скорость этого процесса, а с другой стороны - многие продукты оксидации лучше сорбируются на угле. Кроме того, применение двух методов всегда надежнее и позволяет значительно расширить диапазон удаляемых из воды органических загрязнений. Практика показала, что совместное применение окислителей и активного угля имеет и экономическое преимущество.

Адекватно качеству обрабатываемой воды, составу и типу очистных сооружений могут быть различные технические решения использования окислительно-сорбционного метода обработки воды. Так, фильтры с ГАУ, предназначенные для дезодорации, располагают в технологических схемах после осветлительных фильтров. Но ГАУ может использоваться также в фильтрах, выполняющих наряду с указанной функцией и функцию осветления воды. Тогда фильтры, как обычно, располагают после сооружений предварительной очистки, при этом загрузка их может либо целиком состоять из ГАУ, либо из угля и песка (двухслойная загрузка). В схеме контактного осветления воды возможно также устройство отдельно стоящих угольных фильтров, располагаемых после контактных осветлителей, или устройства контактных осветлителей с песчано-угольной загрузкой.

Расположение угольной загрузки в технологической схеме водоподготовки зависит от ее назначения, а также санитарно - гигиенических и технико-экономических показателей очистки воды. Окислитель во всех случаях должен быть введен в обрабатываемую воду до ее поступления на угольную загрузку. При этом окислитель в воду может вводиться либо в начале технологической схемы, либо перед угольными фильтрами. Возможно также двойное введение окислителей разного типа. Место ввода окислителя зависит от общих задач,

возлагаемых на окислитель, от скорости его реакции и других факторов. Но во всех случаях необходимо обеспечить наличие окислителя в воде, поступающей на угольную загрузку.

Окислители, используемые в водопроводной практике, обладают неодинаковыми с технико-экономической и санитарно - гигиенической точек зрения эффективности по отношению к химическим загрязнениям воды. Поэтому важным при применении окислительно-сорбционного метода является выбор вида окислителя. Хлор целесообразно использовать в качестве окислителя только в том случае, когда в воде находятся сравнительно легко окисляемые загрязнения, такие, как, фенолы, некоторые вещества природного происхождения, придающие воде привкусы и запахи, и т.д. При этом необходимо учитывать, что в условиях совместного применения хлора и активного угля предварительная аммонизация воды, к которой часто прибегают на практике, не требуется (при необходимости аммонизация может производиться при окончательном хлорировании). Когда в воде присутствуют преимущественно трудно окисляемые загрязнения, например растворимые фракции нефти и ее продукты, СПАВ, органические пестициды и т.д., необходимо применять озон как наиболее сильный окислитель. Иногда может оказаться также эффективным применение нескольких окислителей (хлора и перманганата калия, озона и хлора). Выбор окислителя, его дозы и места ввода в технологической схеме очистки воды устанавливается путем пробной ее обработки в лабораторных условиях, исходя из того, чтобы нагрузка на уголь как сорбент была минимальной. При этом необходимо учитывать, что уголь играет роль не только сорбента, но и катализатора окислительной реакции, т.е. он ускоряет этот процесс.

Из производимых химической промышленностью ГАУ наиболее приемлемыми в качестве загрузки фильтров на коммунальных водопроводах по механической прочности и санитарно - гигиеническим показателям являются угли марок АГ-3 и АГ-М (см. табл. 7.20). Эти угли разрешены Минздравом СССР для очистки питьевой воды, и они менее дефицитны. Применение ГАУ не вносит каких - либо существенных изменений в основные конструктивные элементы фильтровальных сооружений и они могут выполняться в соответствии с общими нормативными указаниями СНиПа. Отличительная особенность этих сооружений состоит в том, что они должны быть оборудованы устройствами для механизации процессов загрузки и выгрузки угля, поскольку эти операции производятся чаще, чем для инертных загрузок. Кроме того, на сооружениях с угольными фильтрами должны быть предусмотрены механизированные площадки и склады для хранения свежего и отработанного угля, его подсушки и т.д. Расчет и проектирование этих устройств и сооружений должны производиться с учетом количества угля, находящегося в работе, а также с учетом запасов, необходимых для его замены. При медленной обработке угля этот запас может потребоваться лишь для ежегодной догрузки угольных слоев, примерно в размере 10 % рабочего слоя. При быстрой отработке угля может потребоваться запас на одновременную замену всего рабочего слоя.

При расчете угольной сорбционной загрузки исходят из следующих | соображений. Высота угольной загрузки должна быть больше некоторой величины  $H$ , обеспечивающей требуемый эффект очистки воды от химических загрязнений. Для расчета этой величины с некоторым приближением можно пользоваться простейшей зависимостью вида

$$H = vt,$$

где  $v = 10..15$  - скорость фильтрования, м/ч;

$t = 10..15$  - время пребывания воды, мин, в угольной загрузке, необходимое для очистки.

Величину  $t$  находят экспериментально на фильтровальной колонке, загруженной углем, предполагаемого к использованию, при фильтровании воды, подлежащей очистке на реальных сооружениях. Оно зависит от сорбционных свойств угля, концентрации и вида загрязнений, способов обработки воды до ее поступления на угольный фильтр, в том числе и

от вида применяемого окислителя. При совмещении в одном фильтровальном сооружении функций осветления воды и очистки от химических загрязнений принимаемые параметры загрузки должны удовлетворяться также требованиям процесса осветления. При расчете и подборе загрузки как осветляющей к ней применимы общеизвестные описанные в литературе приемы технологического моделирования. При проектировании фильтровальных сооружений с угольной загрузкой следует применять безгравийные распределительные системы, что позволяет уменьшить, строительную высоту или соответственно увеличить слой загрузки.

Важным является вопрос о продолжительности работы активного угля, которая зависит от правильного подбора дозы и типа окислителя, а также от других условий и не может быть заранее определена какими - либо расчетами. Практика показывает, что при совместном применении окислителя и активного угля эффективность последнего по отношению к химическим загрязнениям может сохраняться в течение длительного времени. Так, в условиях Тюменского водопровода продолжительность работы угольной загрузки составила 2 года. В подобных условиях регенерация угля не всегда экономически оправдана, особенно с учетом того, что ежегодно должна производиться добавка свежего угля для возмещения его потерь на измельчение, истирание и унос при промывках, которая, как уже указывалось, ориентировочно составляет 10 % в год к объему угля. Вместе с тем вследствие обрастания угля неорганическими загрязнениями (в основном гидроксидами алюминия, железа и др.) возможно резкое снижение сорбционной емкости по отношению к органическим веществам. Поэтому необходимо обеспечить высокую степень предварительного осветления воды до поступления ее в слой угольной загрузки. Это особенно актуально по отношению к фильтровальным сооружениям, в которых совмещены функции осветления и очистки от химических загрязнений.

## **Глава 27. ФТОРИРОВАНИЕ И ОБЕСФТОРИВАНИЕ ВОДЫ**

### **27.1. ТЕХНОЛОГИЯ ФТОРИРОВАНИЯ ВОДЫ**

Фтор как весьма активный в биологическом отношении микроэлемент с начала 30 - х годов нынешнего столетия привлек особое внимание гигиенистов, стоматологов, токсикологов, химиков, геохимиков и др. специалистов. Интерес к фтору начал проявляться с 1931 г., когда было доказано, что причиной эпидемии «пятнистой эмали» зубов является повышенное содержание фтора в питьевой воде. Это открытие стимулировало изучение эндемического флюороза во всем мире. В изучение проблемы эндемического кариеса и флюороза большой вклад внесли отечественные исследователи С.Н.Черкинский, В.А.Книжников, Р.Д.Габович и др. Ими доказано, что противокариесное действие оптимальных концентраций фтора распространяется как на молочные, так и на постоянные зубы, а также на все возрастные группы населения. Эти данные позволили утверждать о целесообразности искусственного обогащения питьевой воды фтором. Фторирование воды начали осуществлять с 1945 г., применявшиеся другие методы профилактики кариеса зубов не имели успеха. Было показано, что оптимальной концентрацией фтора в питьевой воде является доза 0,7 - 1,2 мг/л. Более низкие концентрации фтора принимают при фторировании в южных районах и в летний период, когда количество воды, поступающей в организм человека, увеличивается. Более высокие концентрации фтора принимают при фторировании воды в северных районах в зимний период, т.е. при более низкой температуре окружающей среды. Необходимость фторирования определяется содержанием фтора в воде источников в количестве менее 0,5 мг/л.

Для фторирования питьевой воды используют ряд фторсодержащих соединений, таких, как кремнефтористый натрий  $\text{NaSiF}_6$ , кремнефтористая кислота  $\text{H}_2\text{SiF}_6$ , фтористый натрий  $\text{NaF}$ , кремнефтористый аммоний  $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ , фтористый кальций  $\text{CaF}_2$ , фтористоводородная кислота  $\text{HF}$ , кремнефтористый калий  $\text{K}_2\text{SiF}_6$ , кремнефтористый алюминий  $\text{Al}_2(\text{SiF}_6)_3$ ,

фтористый алюминий  $AlF_3$  и ряд других (табл. 7.21). В отечественной практике наиболее широкое применение получил кремнефтористый натрий, менее широкое - фтористый натрий и фторидбифторид аммония.

*Кремнефтористый натрий* (ГОСТ 87 - 87) - молекулярная масса 188,05; плотность  $2,7 \text{ г/см}^3$  - представляет собой мелкий, сыпучий, негигроскопический кристаллический порошок белого цвета (допускается серый или желтый оттенок), без запаха, удобен в эксплуатации. При длительном хранении на складе в закрытых бочках не слеживается. Плотность насыщенного раствора 1,0054, рН насыщенного раствора 3,5 - 4,0. В воде растворяется плохо. Согласно ГОСТу, кремнефтористый натрий упаковывается поставщиками в фанерные барабаны (ГОСТ 9338 - 80 с изм.) объемом до 50 л или в деревянные бочки вместимостью 40 - 50 л, выложенные внутри крафт - бумагой.

*Фтористый натрий* (ГОСТ 2874 - 85 с изм.) - молекулярная масса 42, плотность  $2,8 \text{ г/см}^3$  - представляет собой порошок белого или светло - серого цвета без запаха. Растворимость фтористого натрия с изменением температуры воды меняется незначительно. При обычно принятых температурах на водоочистных комплексах растворимость его составляет около 4 %, рН раствора - 7,0. Реагент упаковывают в стальные шивные барабаны, плотные сухотарные деревянные бочки или фанерные барабаны. Масса стального барабана 50 - 150 кг, деревянной бочки 130 - 150 кг, фанерного барабана - не более 50 кг. Деревянные бочки и фанерные барабаны внутри выкладываются двумя слоями оберточной бумаги, на бочках и барабанах делают надпись: «Опасно. Яд».

*Кремнефтористоводородная кислота* - молекулярная масса 144,08, выпускается в виде 8 - 14 % - ного раствора, является промежуточным продуктом в производстве фторсодержащих солей. Бесцветная прозрачная, коррозионная жидкость с едким запахом, оказывающая раздражающее действие на кожу. Однопроцентный ее раствор имеет рН = 1,2. Опыт показал, что применение кремнефтористоводородной кислоты для фторирования воды на установках малой производительности не целесообразно, так как требуется разбавление воды с кислотой, при этом выпадает осадок, забивающий насосы, арматуру и трубы. Во избежание этого к кремнефтористоводородной кислоте добавляют небольшое количество фтористоводородной кислоты, что осложняет технологию использования этого метода.

**Таблица 7.21**

Показатель	Кремнефтористый натрий			Кремнефтористый аммоний	Фтористый натрий			Кремнефтористоводородная кислота
	высший сорт	Сорт 1	сорт 2		высший сорт	сорт 1	сорт 2	
Молекулярная масса	-	188,05	-	178,14	-	42	-	145,08
Стоимость 1 т технического продукта, руб	177,60	95,0	82,0	105,0	236,0	210,5	200	4,3
Содержание, %: чистого продукта в техническом	98	95	93	93	94	84	80	8
фтора в чистом продукте	-	0,6	-	63,9		45,25		79,2
фтора в техническом продукте	59,4	57,5	56,4	59,4	42,5	38	36,2	6,3
Количество технического продукта, мг, необходимое для получения 1 мг/л	1,68	1,74	1,78	1,68	2,35	2,63	2,76	15,9
Сравнительная стоимость реагентов, %	136	113,5	100	121,5	382	381	380	47

*Кремнефтористый аммоний* - молекулярная масса 178,16, плотность  $2,01 \text{ г/см}^3$  - кристаллическое вещество белого цвета, с розоватым или желтоватым оттенком без запаха. Недостатком этого реагента является его слеживаемость. Даже при кратковременном хранении он превращается в довольно плотные комья. Это свойство продукта вызывает

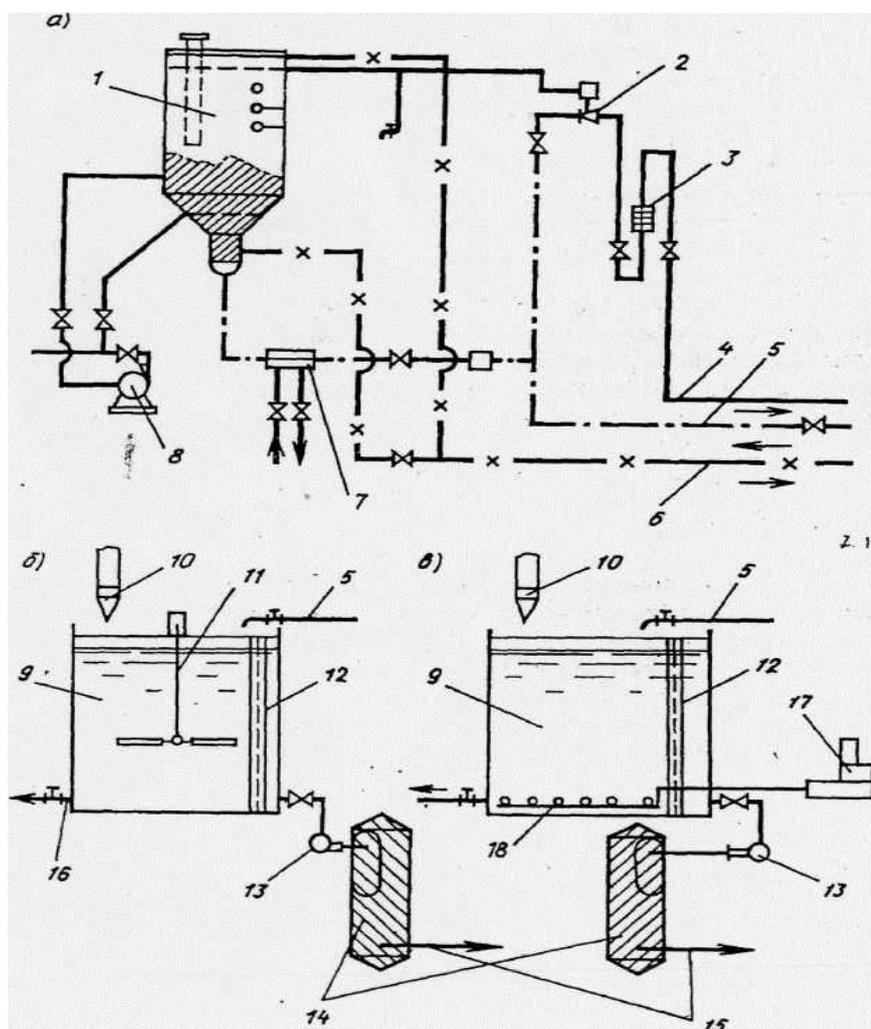
необходимость дополнительных операций при его применении в качестве реагента: он нуждается в сушке и дроблении, что создает дополнительные трудности при использовании и увеличивает эксплуатационные расходы. Стоимость его ниже стоимости фтористого натрия. ГОСТ 9338 - 80 предусматривает упаковку кремнефтористого аммония в фанерные барабаны вместимостью до 50 л или в деревянные бочки объемом 40 - 50 л, выложенные внутри крафт - бумагой, бумажные мешки массой до 50 кг. На каждой емкости должна быть надпись «Яд!». Барабаны, бочки и мешки с кремнефтористым аммонием должны храниться в сухом месте.

*Фтористый кальций* - самый дешевый реагент, но его растворимость в воде крайне низка (0,0016 г на 100 мл/воды при 25°C), но он хорошо растворим в кислых растворах, в том числе в растворах коагулянта; 10 % - ный раствор коагулянта может содержать 1 % фтор - Иона.

Применение на практике установки по технологии приготовления растворов фторсодержащих соединений можно классифицировать следующим образом.

*Во фтораторных установках сатураторного типа одинарного насыщения* (рис. 7.45,а) в качестве реагента принят кремнефтористый натрий, раствор которого вводится в воду перед хлорированием. Предварительно реагент замачивают и размешивают в баке, а затем выливают через воронку в сатуратор (1 раз в смену). В камере для реагента должно быть 8 - 10 кг кремнефтористого натрия. В основы работы фтораторной установки положен принцип объемного вытеснения.

*Во фтораторных установках с растворными баками* (рис. 7.45,б,в) в качестве реагента используют кремнефтористый натрий. Загрузку в баки реагентов осуществляют с помощью бункеров, оборудованных вибраторами и дозаторами объемного типа. Для лучшего растворения реагента баки оборудованы мешалкой с частотой вращения 50 - 60 мин. Время перемешивания 2 ч, время отстаивания 2 ч. Концентрация раствора реагента в баках составляет 0,05 % по фтору или 0,08 % по чистой соли.



**Рис. 7.45. Схема фтораторной установки сатураторного типа (а), с растворными баками с механическим побуждением (б) и с барбатированием (в)**

1 - сатуратор; 2 - эжектор; 3 - расходомер; 4,5 - отвод фторированной и подача исходной воды; 6 - водосток; 7 - теплообменник; 8 - рециркуляционный насос; 9 - растворный бак; 10 - бункер фторсодержащего реагента с дозатором; 11 - мешалка; 12 - поплавковое устройство; 13 - насос; 14 - напорный фильтр для осветления раствора реагента (вариант); 15 - отвод фторсодержащего раствора; 16 - сброс осадка; 17 - воздуходувка; 18 - воздухораспределительная система

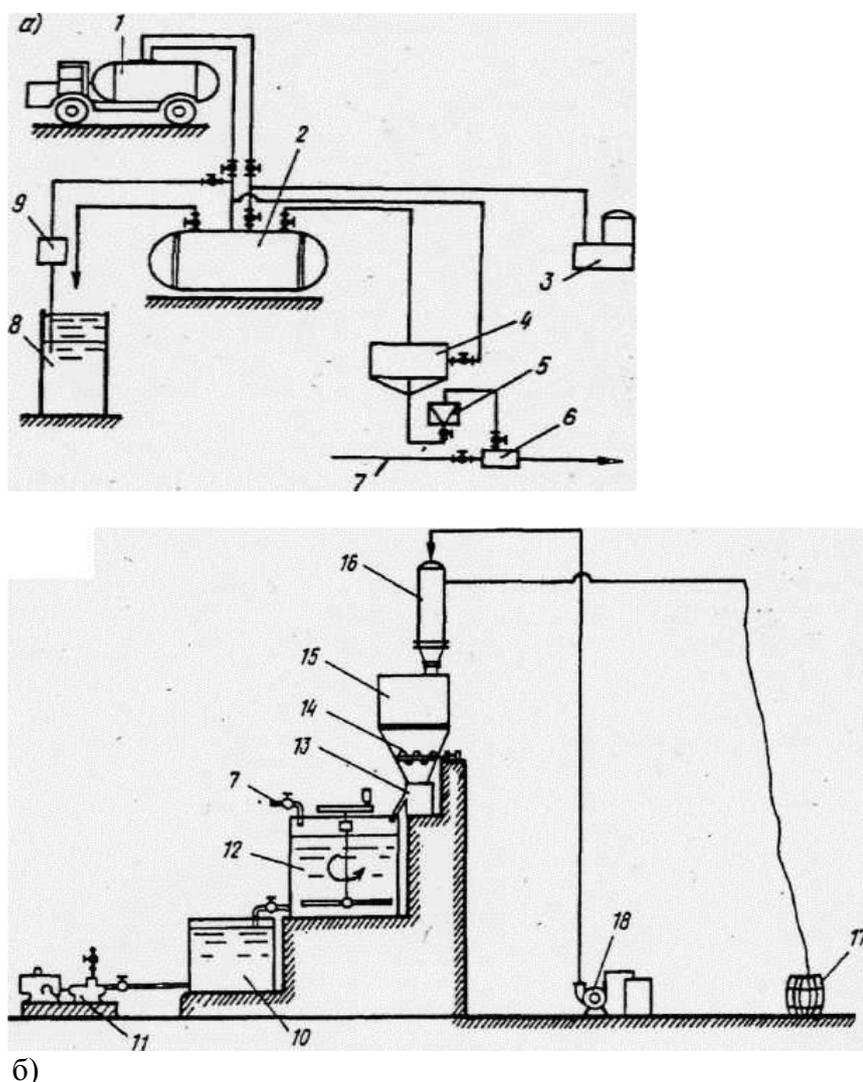
Во фтораторных установках с затворно - растворными баками в качестве реагента принят фтористый натрий с расходом в сутки 20 кг. Установка состоит из системы баков: затворного - объемом  $0,4 \text{ м}^3$ , двух растворных - объемом  $1,5 \text{ м}^3$  каждый, дозирующего бачка, снабжённого поплавковым клапаном. Затворный и растворные баки оборудованы электромешалками. Растворяют фтористый натрий в воде, нагретой до  $75 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$ , для чего в затворный бак вмонтирован электронагреватель. Крепкий раствор переливают в растворный бак, предварительно на  $1/3$  заполненный водой, бак дополняют водой до нужной отметки и раствор тщательно перемешивают. После определения содержания фтора в растворе последний через вентиль подают в дозирующий бак и затем в обрабатываемую воду.

Фтораторная установка с применением 8 %- ной кремнефтористоводородной кислоты показана на рис. 7.46,а.

В зарубежной практике фтористые соединения вводятся в воду: в сухом виде - непосредственно порошком, сухими дозаторами, через растворную камеру или в жидком виде - дозаторами для растворов. Первый способ обычно реализуют на водоочистных комплексах большой производительности, жидкостное - на установках малой

производительности. Дозаторы сухих реагентов применяют двух видов: объемные дозаторы - (рис. 7.46,б) подают определенный объем вещества за расчетный промежуток времени, массовые - массовое количество вещества. Основное отличие их состоит в следующем: объемные дозаторы, которые конструктивно проще и экономичнее, имеют точность дозирования 3..5 %, массовые дозаторы легче оборудовать фиксирующим устройством для регистрации дозируемого реагента и устройством для автоматической подачи реагента в воду, точность дозирования - 1 %. Неотъемлемой частью сухих дозаторов является растворная камера. При непосредственном вводе сухих реагентов в воду они попадают на дно нерастворенными. Максимальную концентрацию реагента в растворной камере принимают 1/4 концентрации насыщенного раствора при обычной температуре воды. Вместимость растворных камер принимают не менее 20 л. Для более полного смешения реагента с водой и его лучшего растворения предусматривают механические мешалки или форсунки. Для точного регулирования количества воды, поступающей в растворную камеру, используют разлитые водомеры. Из камеры раствор вводят в обрабатываемую воду в нужную точку.

Фторирование воды требует весьма высокой точности дозирования; реагента (+5 %), поэтому для его подачи в жидком виде совершенно непригодны краны и насадки. Для дозирования реагентов в жидком виде применяют насосы - дозаторы мембранного и поршневого типов. Дозу фторсодержащего реагента находят из выражения



б)  
**Рис. 7.46. Фтораторная установка с использованием кремнефтористоводородной кислоты (а) и установка сухого дозирования (б)**  
 1, 2 - авто - и стационарная цистерна; 3 - компрессор; 4 - бак - мерник; 5 - ротаметр; 6 - эжектор; 7 - подача поды; 8 - емкость; 9 - ручной насос; 10, 12 - расходный и растворный

баки; 11 - насос-дозатор; 13 - питатель ДУ-1; 14 - ворошитель; 15 - бункер для хранения реагента; 16 - вакуум-бункер; 17 - бочка с реагентом; 18 - вакуум-насос

$$D_{\text{ф}} = 10^4(m_{\text{ф}} * a_{\text{ф}} - \Phi) / (K_{\text{ф}} * C_{\text{ф}})$$

- где  $m$  - коэффициент, зависящий от места ввода фтора в обрабатываемую воду, принимаемый при вводе фтора после очистных сооружений равным 1,0; при вводе фтора перед контактными осветлителями или фильтрами - 1,1;
- $a$  - содержание фтора в обработанной воде, мг/л (оптимальная концентрация фтора в питьевой воде), равное для средней полосы России для зимнего периода - 1, для летнего периода - 0,8;
- $K$  - содержание фтора в чистом реагенте, %, равное для кремнефтористого натрия 60,6, для кремнефтористого аммония - 63,9, для фтористого натрия - 45,25;
- $C$  - содержание чистого реагента в продажном техническом продукте, %, равное для кремнефтористого натрия высшего, 1 - и 2 - го сортов соответственно 59,4; 57,5 и 56,4, для фтористого натрия - 42,5; 38; 36,2, а для кремнефтористого аммония, выпускаемого промышленностью одним сортом, - 59,4;
- $\Phi$  - содержание фтора в обрабатываемой воде.

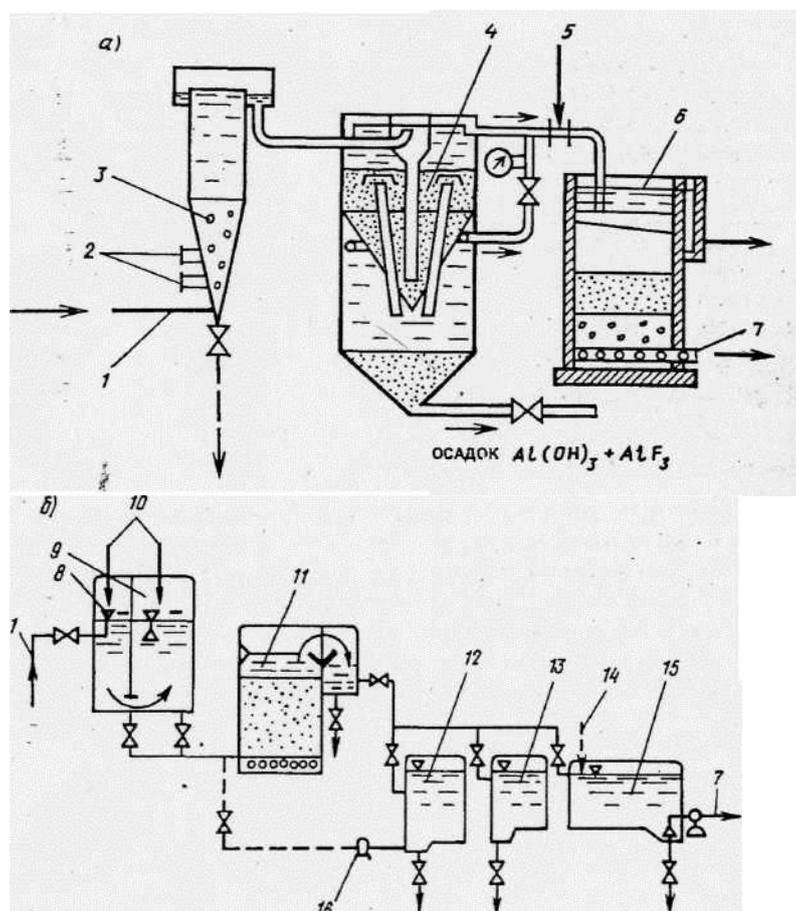
При мокром дозировании, и при сухом реагенты для фторирования вводят в воду в виде раствора. Место введения раствора реагента назначают в зависимости от способов очистки воды и технико-экономических соображений, при этом должны быть соблюдены условия перемешивания реагента с питьевой водой и его наименьшие потери. При использовании артезианских вод, подаваемых потребителю без очистки, фтористые соединения поступают непосредственно в напорные водоводы или резервуары. При небольшой нагрузке на фильтры фторсодержащие реагенты вводят перед фильтрами, при большой нагрузке - после фильтров, в трубопровод между фильтрами и резервуаром чистой воды или непосредственно в резервуар чистой воды.

На большинстве водоочистных комплексов фторирование является последним этапом обработки, не считая хлорирования. Хлорирование воды не удаляет фторидов. Хлор и фтор можно добавлять одновременно. Хлор и его производные оказывают одно неблагоприятное действие - они обесцвечивают реагенты, добавляемые при определении фторидов в воде, что может дать ошибку в исчислении концентраций фтора.

## 27.2. ТЕХНОЛОГИЯ ОБЕСФТОРИВАНИЯ ВОДЫ

Для обесфторивания воды используют ряд методов, которые можно классифицировать следующим образом.

1. Методы сорбции фтора осадком гидроксида алюминия или магния, а также фосфата кальция, которые целесообразно применять при обработке поверхностных вод, когда кроме обесфторивания требуется еще их осветление и обесцвечивание. Вместе с тем метод сорбции находит применение для обработки подземных вод при необходимости их одновременного умягчения, (реагентным методом) и дефторирования (рис. 7.47,а).



**Рис. 7.47. Схема дефторирования воды сорбцией на свежесформованном гидроксиде алюминия (а) и фильтрованием через зернистую загрузку, заряженную сульфат-ионами (б)**

1, 7 - подача исходной и отвод дефторированной воды; 2 - ввод растворов извести (сода) и сульфата алюминия; 3 - смеситель; 4 - осветлитель со слоем взвешенного осадка; 5 - ввод кислоты для стабилизации воды; 6 - спорый фильтр; 8, 9 - зарядная и рабочая камеры смесителя; 10 - подача сульфата алюминия; 11 - контактный осветлитель; 12 - резервуар сбора первого фильтрата; 13 - отстойник промывной воды; 14 - ввод хлора; 15 - резервуар чистой воды; 16 - насос

2. Методы фильтрования воды через фторселективные материалы основаны на обменной адсорбции ионов, при которой фтор удаляется в процессе пропускания обрабатываемой воды через сорбент. Этот метод наиболее эффективен при обезфторивании подземных, как правило, ненуждающихся в других видах кондиционирования, или в тех случаях, когда одновременно с дефторированием производят еще и опреснение (рис. 1.41,6).

3. Метод обратного осмоса.

*Дефторирование воды гидроксидом магния*, который образуется в магнийсодержащей воде в присутствии извести, позволяет снизить содержание в воде магния и фтора. Остаточное содержание фтора в воде после ее известкования  $\Phi_{\text{ост}}$ , можно определить из выражения

$$\Phi_{\text{ост}} = \Phi_{\text{исх}} - (0.07\Phi_{\text{исх}} [\text{Mg}]0,5),$$

где  $\Phi_{\text{исх}}$  - содержание фтора в исходной воде, мг/л;  $[\text{Mg}]$  - количество магния, удаленного из воды при ее известковании, мг/л.

Для снижения содержания фтора в воде на 1 мг требуется 50 - 60 мг магния или 100 - 150 мг  $Mg(OH)_2$ . При недостатке магния в исходной воде для повышения эффекта обесфторивания в нее вводят сульфат или хлорид магния. При избытке магния образующийся в результате взаимодействия гидроксида магния с фтором фторид магния переходит затем в малорастворимый оксифторид магния.

Исследования, выполненные в МГСУ (Николадзе Г.И. и др.), показали, что процесс сорбции фтора свежееобразованным гидроксидом магния при  $pH = 9$ , протекает быстро и интенсивно, практически не зависит от температуры и заканчивается за 8 - 12 мин, сорбционная способность гидроксида магния может быть использована более полно путем пропуска обрабатываемой воды через его взвешенный слой. Особенностью взвешенного осадка гидроксида магния является чрезвычайная легкость. Поэтому скорость восходящего движения воды в осветлителях должна быть 0,2 - 0,3 мм/с. При этом концентрация взвешенных веществ в слое взвешенного осадка составит 1,6 - 2 г/л. Высота слоя осадка принимается 2 - 2,5 м. Время пребывания воды в слое контактного осадка не менее 1 ч. При этом расход магния на удаление одного мг фтора значительно меньше - около 30 мг. Для ориентировочных расчетов расход солей магния на обесфторивание воды сорбцией на гидроксиде магния следует принимать равным 2 мг-экв на 1 мг удаляемого из воды фтора при его содержании в воде до 7 мг/л. В связи с тем, что процесс является сорбционным, с увеличением начальной концентрации фтора в воде удельный расход магния на обесфторивание будет уменьшаться. При недостатке в природных водах солей магния необходимое их количество  $\mathcal{E}$  для обесфторивания (ДМг) может быть посчитано по формуле, предложенной А.Ф.Клячко, I

$$D_{Mg} = \mathcal{E}[2(\Phi-1)Ж_{Mg}]$$

где  $\mathcal{E}$  - эквивалентная масса вводимой в воду соли магния, мг; для  $MgSO_4$  - 60,2, для  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  - 123,25, для  $MgCl_2$  - 47,7, для  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  - 101,65;  $\Phi$  - содержание фтора в исходной воде, мг/л;  $Ж_m$  - магниевая жесткость этой воды, мг-экв/л; 2 - расход солей магния, мг-экв/л, на удаление 1 мг фтора из 1 л обрабатываемой воды.

Необходимая доза извести  $D_{CaO}$  (по  $CaO$ ) для осаждения гидроксида магния может быть подсчитана по формулам:

$$\text{при } [Ca^{2+}] > Щ \quad D_{CaO} = 28 [2 [Mg^{2+}] + CO_2/22 + Щ + 1];$$

$$\text{при } [Ca^{2+}] < Щ \quad D_{CaO} = 28 [2 [Mg^{2+}] + CO_2/22 + [Ca^{2+}] + 1].$$

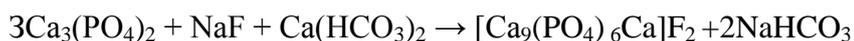
где  $CO_2$  - содержание  $CO_2$  в воде, мг/л;  $Mg^{2+}$  - содержание магния, мг-экв/л, в обрабатываемой воде после введения в нее количества магния, необходимого для сорбции фтора;  $(Ca)^{2+}$  - содержание в исходной воде кальция, мг-экв/л;  $Щ$  - щелочность исходной воды, мг-экв/л.

Технологическая схема установки для обесфторивания природных вод сорбции на гидроксиде магния состоит из вертикального смесителя, осветлителей со слоем взвешенного осадка с коническими или пирамидальными днищами скорых осветлительных фильтров (см. рис. 7.47,а).

*Обесфторивание воды солями алюминия* основано на сорбции фтора взвешенным осадком гидроксида алюминия. Это связано с образованием на поверхности твердой фазы малорастворимых фторидов. При этом эффективность процесса находится в обратной зависимости от  $pH$  воды. По мере снижения  $pH$  воды при постоянной дозе сульфата алюминия эффективность обесфторивания возрастает, что объясняется химической неоднородностью состава осадков при гидролизе сульфата алюминия при различных  $pH$ . При низких значениях

pH в осадке преимущественно образуется основной сульфат алюминия -  $\text{Al}(\text{OH})\text{SO}_4$ , эффективность обесфторивания возрастает, уменьшается содержание в нем гидроксида алюминия, который сорбирует фтор в меньшей степени, чем основной сульфат алюминия. По С.В.Ломако и В.В.Лазареву, для обесфторивания воды при значениях pH, близких к нейтральным, требуются очень большие дозы серно - кислого алюминия. Поэтому удаление фтора из воды этим способом наиболее целесообразно вести при  $\text{pH} = 4,3..5,0$ . При таких значениях расход сульфата алюминия на один мг удаляемого фтора составляет 25 - 30 мг/л. Поэтому обесфторивание воды гидроксидом алюминия требует ее предварительного подкисления с последующим подщелачиванием для снижения коррозионных свойств воды. Технологическая схема, состоит из смесителя, осветлителей со взвешенным осадком и скорых, осветлительных фильтров (см. рис. 7.47,а). Раствор кислоты для подкисления вводится перед смесителем, сульфат алюминия в смеситель, известь для подщелачивания воды перед фильтрами. Большие расходы кислоты и извести, а также необходимость точного дозирования реагентов делают этот метод обесфторивания воды дорогим и сложным в эксплуатации. В качестве реагента возможно использование основного хлорида алюминия.

*Удаление фтора из воды с помощью трикальцийфосфата* основано на сорбции свежееобразованным трикальцийфосфатом, который связывает имеющийся в воде фтор в малорастворимое содержание -  $[\text{Ca}_9(\text{PO}_4)_6\text{Ca}]\text{F}_2$ , выпадающее в осадок. Расход трикальцийфосфата на удаление 1 мг фтора составляет 23 - 30 мг. Связывание фтора описывается следующей реакцией:



Скорость восходящего потока воды в слое взвешенного осадка принимают 0,6 - 0,8 мм/с. Содержание фтора снижается с 5 до 1 мг/л при расходе реагента 30 мг на 1 мг удаленного фтора. В качестве технологической рекомендуется схема, представленная на рис. 7.47,а. Для получения трикальцийфосфата в вертикальный смеситель вначале вводят известь, а затем раствор ортофосфорной кислоты. После этого вся масса воды передается в осветлитель и поступает в слой взвешенного осадка. Здесь протекает основной процесс, образуется малорастворимый фторид, который в осадкоуплотнителе выпадает в осадок. Весь цикл обработки воды заканчивается на скорых осветлительных фильтрах, где она освобождается от мелкой взвеси, не выпавшей в осадок в осветлителе. После этого вода подвергается обеззараживанию.

Технико-экономическое сравнение трех рассмотренных сорбционных способов дефторирования воды показало, что наиболее целесообразно применять для указанной цели гидроксид магния.

*В.Л.Драгинский, В.М.Корабельников предложили контактно - сорбционный метод обесфторивания природных вод.* Коагулянт вводят в воду непосредственно перед контактными осветлителями. В первоначальный период - 1,5 - 2,0 ч («зарядка») подается повышенная доза коагулянта 100 - 150 мг/л по  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . При этом на зернах и в порах загрузки образуется гидроксид алюминия, который сорбирует фтор. В период «зарядки», фильтрат, содержащий большое количество ионов фтора и алюминия, отводят в специальную емкость для последующего использования в качестве промывных вод. После «зарядки» дозу коагулянта снижают до 20 - 25 мг/л, что гарантирует эффективное извлечение фтора за счет сохранения сорбционной способности гидроксида алюминия. Процесс дефторирования воды можно осуществлять и без «зарядки» при постоянной дозе коагулянта, величина которой определяется качеством исходной воды. Контактно - сорбционное обесфторивание приемлемо при обработке вод, содержащих фтор - до 5 мг/л, сероводород - до 2 мг/л, щелочность - до 6 мг-экв/л. На 1 мг удаляемого фтора расходуется около 80 мг сульфата алюминия.

*Электрокоагуляционное обесфторивание* природных вод, по П.П.Строкачу, Я.Д.Раппопорту, позволяет удалить фтор без применения химических реагентов, вместе с которыми в воду вводится значительное количество дополнительных солей, чему способствует

высокая активность электролитически полученного гидроксида алюминия. В качестве растворимых анодов применяют алюминий и дюралюминий, для экономии энергозатрат варьируют токовой нагрузкой и расстоянием между электродами, электролиз ведут при постоянном и переменном токе. При электролизе в воду с анода переходят катионы алюминия, которые, превращаясь в гидроксид, адсорбируют фтор. Растворение 1 г металлического алюминия эквивалентно введению 6,35 г сернокислого алюминия. Теоретический расход электроэнергии на получение 1 г алюминия составляет около 12 Вт ч. Фактический расход электроэнергии значительно выше из-за тепловых потерь, дополнительного сопротивления оксидной пленки, образующейся на поверхности электродов, и ряда других причин. Основным фактором, влияющим на сорбционную способность электролитически полученного гидроксида алюминия, является концентрация ионов водорода. В слабокислой среде фтор сорбируется получаемым осадком значительно лучше, чем в нейтральной и щелочной. Оптимальное значение pH обрабатываемой воды находится в пределах 6,4 - 6,6. Повышение или понижение активной реакции среды приводит к снижению эффективности дефторирования воды. Причиной этого, как и в случае реагентной обработки воды, является конкуренция гидроксил - ионов при высоких значениях pH и растворение хлопьевидного осадка в кислой среде. Расход металлического алюминия при предварительном подкислении воды составил около 12 г на каждый 1 г удаляемого фтора, расход кислоты - 0,2 л/м<sup>3</sup>. В состав обесфторивающей установки входят емкость для соляной кислоты, насос-дозатор, электрокоагулятор, осветлительный фильтр, центробежный насос и контрольно - измерительная аппаратура.

Подземные воды, используемые для хозяйственно-питьевого водоснабжения, не нуждаются в осветлении, поэтому для их обесфторивания наиболее целесообразно применять фильтрационные (ионнообменные) методы. В качестве сорбентов для извлечения фтора из воды могут быть применены сильноосновные аниониты, магнезиальные сорбенты, фосфат кальция, специально обработанные активные угли, активированный оксид алюминия, модифицированные загрузки, клиноптилолит.

*Обесфторивание воды сильноосновными катионитами и анионитами* целесообразно при ее одновременном опреснении. Очевидно, что в современных условиях ионнообменный метод обесфторивания воды с применением сильноосновных ионитов не может иметь самостоятельного значения по экономическим соображениям. Он может быть рекомендован только для случая обработки воды в целях одновременного опреснения и дефторирования. Первоначально обрабатываемая вода поступает на напорные фильтры, загруженные активным углем, назначение которых извлекать органические вещества из обрабатываемой воды для сохранения обменной емкости ионообменников. Затем вода передается в водород - катионитовые фильтры, загруженные сильноосновным катионитом КУ - 2, которые служат для извлечения из воды катионов. Образующийся в процессе водород - катионирования диоксид углерода в результате распада бикарбонатов удаляется в дегазаторе. После удаления углекислоты вода собирается в промежуточном резервуаре, откуда насосами подается на группу анионитовых фильтров, загруженных сильноосновным анионитом (АВ - 17 - 8, ЭДЭ - 10п). Здесь помимо удаления из воды анионов сильных кислот происходит задержание фтора. Технологическая схема заканчивается буферным натрийкатионитовым фильтром, который сглаживает возможные проскоки на предыдущих ступенях обработки и поддерживает постоянное значение величины pH в фильтрате. Регенерация фильтров с загрузкой из активного угля и анионита производится едким натром. Водород - анионитовые фильтры регенерируются раствором соляной кислоты. Из изложенного видно, что технологическая схема отличается громоздкостью, сложностью реагентного хозяйства, чем объясняется ограниченность ее применения.

*Дефторирование воды активированным оксидом алюминия (дефлюоритом)* обеспечивает высокий эффект удаления фтора из подземных вод. Зернистый активированный оксид алюминия (ЗАОА) является наиболее дешевым сорбентом, простым в изготовлении и емким по поглощению фтора. При фильтровании обрабатываемой воды со скоростью 5 - 7 м/ч

через ЗАОА происходит поглощение фтора сорбентом в результате обмена сульфат-ионов на фтор - ионы. В начале фильтроцикла содержание фтора в фильтрате близко к нулю (0,07 - 0,1 мг/л), но с течением времени поглощательная способность сорбента истощается, концентрация фтора в фильтрате постепенно возрастает и при достижении 1,5 мг/л фильтроцикл прекращается, так как сорбент нуждается в регенерации. Регенерация сорбента производится пропуском через него 1 - 1,5 % - ного раствора сульфата алюминия. В процессе регенерации из сорбента вытесняются поглощенные им фтор - ионы и он заряжается сульфат-ионами. После регенерации сорбент отмывается водой с интенсивностью 4 - 5 л/(м<sup>2</sup>с) для удаления продуктов регенерации и непрореагировавшего реагента. По И.Э.Апельцину и Е.Ф.Золотовой емкость поглощения 1 г ЗАОА составляет 2 - 2,5 мг фтор - ионов. Концентрация в воде ионов кальция, магния и хлора не изменяется, а содержание бикарбонатов в фильтрате уменьшается.

В процессе обесфторивания воды в результате ионного обмена происходит увеличение концентрации в фильтрате сульфатных ионов. Количественно это увеличение эквивалентно уменьшению концентрации суммы ионов фтора и бикарбонатных. Однако известно, что содержание сульфатов в питьевой воде регламентируется ГОСТ 2874 - 82 и не должно превышать 500 мг/л. Поэтому увеличение содержания сульфатов при обесфторивании воды необходимо учитывать при проектировании и расчете комплексов по улучшению качества воды.

Основными технологическими сооружениями рассматриваемого метода обесфторивания воды (см. рис. 7.47,6) являются скорые напорные или открытые фильтры, загруженные ЗАОА. Помимо фильтров установка по удалению фтора из воды должна иметь реагентное хозяйство для приготовления регенерационных растворов, баки для хранения воды, необходимой для взрыхления и отмывки сорбента.

Рассматриваемая технология отличается известной простотой, возможностью компактного размещения очистных сооружений, надежностью эксплуатации. Кроме того, обесфторивание воды по данному методу характеризуется наибольшим технико-экономическим эффектом, так как себестоимость обработки воды здесь минимальная, по сравнению со всеми ранее рассмотренными методами.

*Обесфторивание воды на алюмомодифицированных материалах* показывает, что после обработки солями алюминия песка, керамзита, дробленого клиноптилолита и др. фильтрующих загрузок они способны эффективно извлекать из фильтруемой воды фтор - ионы. По В.В.Лазареву, максимальной сорбционной емкостью по фтору из рассматриваемых материалов обладает алюмомодифицированный клиноптилолит (АКл), который в естественной форме фтор из воды извлекает слабо. Механизм сорбции фтора АКл может быть представлен следующим образом. При контакте алюмосодержащего реагента с клиноптилолитом, который является природным катионообменником, в последнем замещаются обменные катионы натрия, кальция, магния на катионы алюминия из раствора - модификатора. При последующем фильтровании очищаемой воды через АКл начинается реобмен катионов алюминия из клиноптилолита. Алюминий взаимодействует с анионами воды (ОН, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, F). Одновременно с гидролизом и образованием основных солей алюминия протекает процесс дефторирования воды. Извлечение фтора осуществляется за счет ионообмена и образования алюмофторидных комплексов, которые адсорбируются клиноптилолитом. Сорбционная емкость АКл составляет 0,5 - 1 мг фтора на 1 г сорбента.

Технологическая схема обесфторивания воды состоит из скорых фильтров, загруженных АКл, и реагентного хозяйства. Регенерацию истощенной загрузки осуществляют в два приема. Первоначально производят взрыхление и отмывку сорбента от фторсодержащих осадков, задержанных на поверхности и в порах загрузки. Затем клиноптилолит модифицируют, пропуская через загрузку концентрированный 4 - 6 % - ный раствор солей алюминия. Раствор - модификатор циркулирует по замкнутому циклу: бак - фильтр - бак. После модификации на фильтры подают исходную воду. Первые порции фильтрата с

большим содержанием алюминия и низким значением рН отводят в специальный резервуар для повторного использования.

*Дефторирование природных вод* обратным осмосом является новым способом в технологии водоподготовки, основанным на применении полупроницаемых мембран. По С.Ф.Абрамовичу, при фильтровании фторсодержащей воды через полупроницаемые мембраны при давлениях выше осмотических происходит извлечение фтор - ионов из воды. В качестве обесфторивающих гиперфильтрационных установок могут быть использованы аппараты фильтр - прессового, трубчатого и рулонного типов, а также аппараты с полыми волокнами.

Установка состоит из осветлительного фильтра предварительной очистки, бака осветленной воды, насосов высокого давления, гиперфильтрационных аппаратов, расходомеров фильтрата и сбросного раствора. Кроме того, установка оснащена электроконтактными манометрами, которые вместе с клапанами - регуляторами давления обеспечивают автоматизацию ее работы. Расход электроэнергии 3 - 4 кВтч на 1 м<sup>3</sup> обесфторенной воды.

## **Глава 28. ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЕ ВОДЫ**

### **28.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ВОД**

Повышенное содержание железа в воде придает ей буроватую окраску, неприятный металлический привкус, вызывает зарастание водопроводных сетей и водоразборной арматуры, является причиной брака в текстильной, пищевой, бумажной, химической и др. отраслях промышленности. Избыток железа в питьевой воде вреден для здоровья человека. При продолжительном введении в организм железа оно накапливается в печени в коллоидной форме оксида железа, получившей название гемосидерина, который вредно действует на клетки печени, вызывая их разрушение. Поэтому воду с повышенным содержанием железа необходимо обезжелезивать.

В поверхностных водах железо обычно встречается в виде органических и минеральных комплексных соединений, либо коллоидных или тонкодисперсных взвесей. Преобладающей формой существования железа в подземных водах является бикарбонат железа (II), который устойчив только при наличии значительных количеств углекислоты и отсутствии растворенного кислорода. Наряду с этим, железо встречается в виде сульфида, карбоната и сульфата железа (II), комплексных соединений с гуматами и фульвокислотами.

Гидроксид железа присутствует в поверхностных водах в коллоидном состоянии. Устойчивость коллоидного железа в значительной степени обусловлена защитным действием гумусовых веществ в результате того, что частицы неустойчивого в воде (гидрофобного) коллоида адсорбируют на своей поверхности частицы другого коллоида, который имеет более сильную связь с молекулами воды, т.е. обладает гидрофильным характером. Железо может быть выведено из комплекса в осадок двумя путями: естественным - при участии бактерий, разрушающих органические вещества, и искусственным - с помощью сильных окислителей, разрушающих защитные коллоиды. Выпадению гидроксида железа из коллоидного состояния в осадок способствует наличие противоположно заряженных золь кремниевой кислоты (коагуляции). Многообразие форм и концентраций железа, встречающихся в природных водах, вызвало необходимость разработки целого ряда методов, технологических схем и сооружений обезжелезивания воды.

На рис. 7.48,а представлена диаграмма Пурбе, отражающая состояние системы железа - вода в координатах окислительно-восстановительный потенциал - значение рН. Вертикальными прямыми показаны значения рН гидратообразования при реально устанавливаемом равновесии в системе. Как следует из диаграммы, при значениях рН < 4,5 железо находится в воде в виде ионов Fe<sup>3+</sup>, F<sup>+</sup> и Fe(OH)<sup>2+</sup>. Повышение значения рН

приводит к окислению железа (II) в железо (III), которое деkantирует. В этих же условиях при  $E < 0,2$  В и наличии в воде сульфидов может выделяться черный осадок  $\text{FeS}$  в восстановительной среде в присутствии карбонатов и при  $\text{pH} > 8,4$  возможно выделение карбоната, а при  $\text{pH} > 10,3$  - гидроксида железа (II).

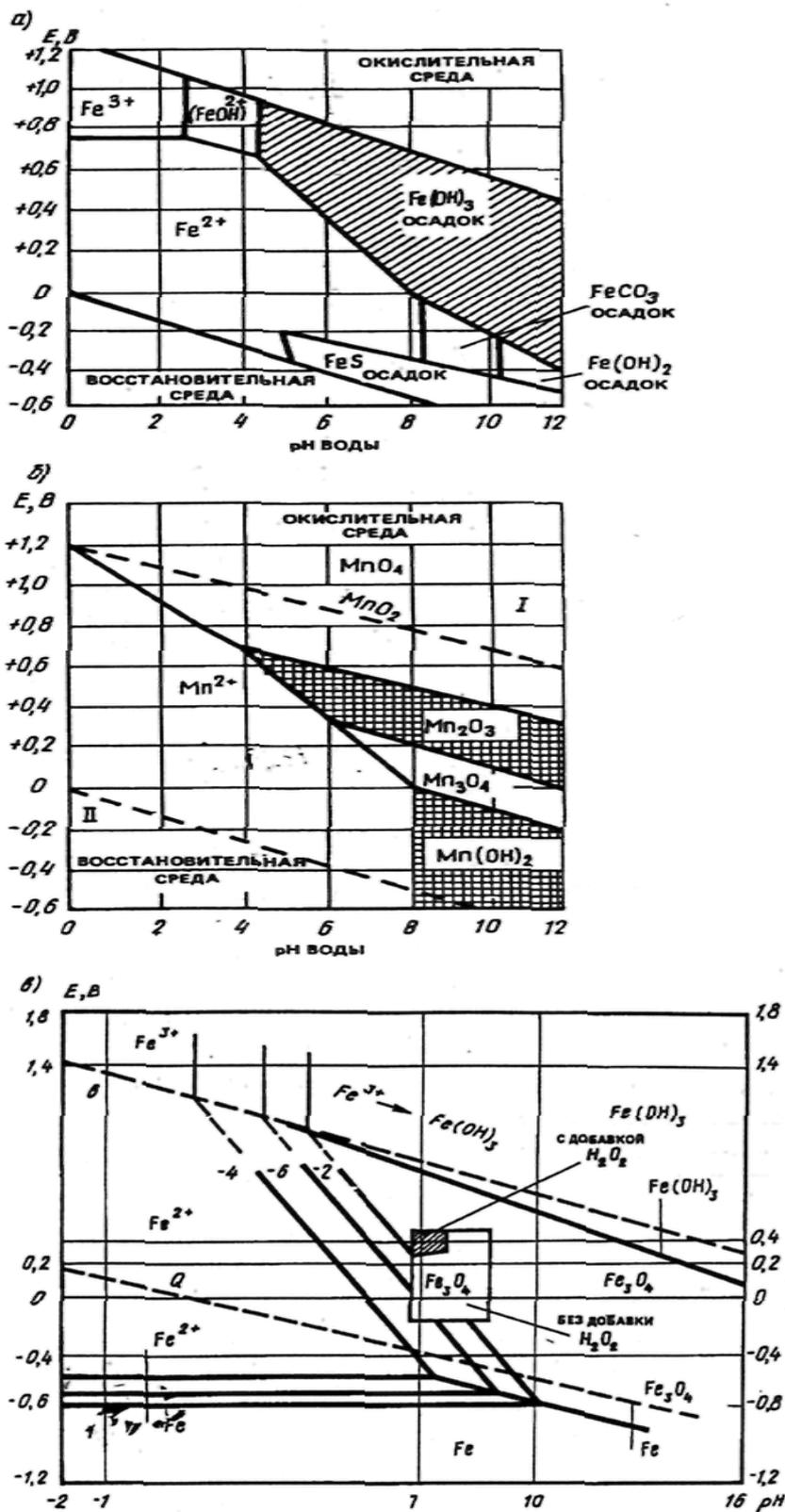


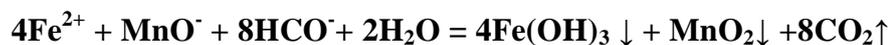
Рис. 7.48. Диаграммы Пурбе для железа (а), марганца (б) и конденсата ТЭС (в)

В присутствии катализаторов - растворенных в обрабатываемой воде ионов меди, марганца и фосфат - ионов, а также при контакте с ее оксидами марганца или с ранее выпавшим гидроксидом железа (III) скорость окисления железа (II) кислородом значительно возрастает. С повышением значения рН среды время, затрачиваемое на окисление соединений железа (II), значительно сокращается. На окисление 1 мг железа (II) расходуется 0,143 мг растворенного в воде кислорода; щелочность воды при этом снижается на 0,036 мг-экв/л. Скорость окисления соединений железа (II) значительно возрастает при хлорировании воды (нормальный окислительно - восстановительный потенциал хлора  $E = 1,36$  В). Соединения железа (II) в присутствии гидрокарбонатов природных вод полностью гидрализуют по реакции



На окисление 1 мг железа (II) расходуется 0,64 мг хлора; щелочность воды при этом снижается на 0,018 мг-экв/л. При замене свободного хлора дихлорамином ( $E = 0,66$  В при рН = 5) время, необходимое для окисления соединений железа (II), значительно возрастает.

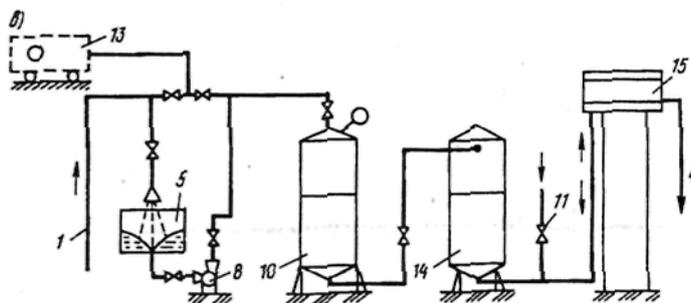
При обработке воды перманганатом калия реакция окисления и последующего пиролиза протекает по уравнению

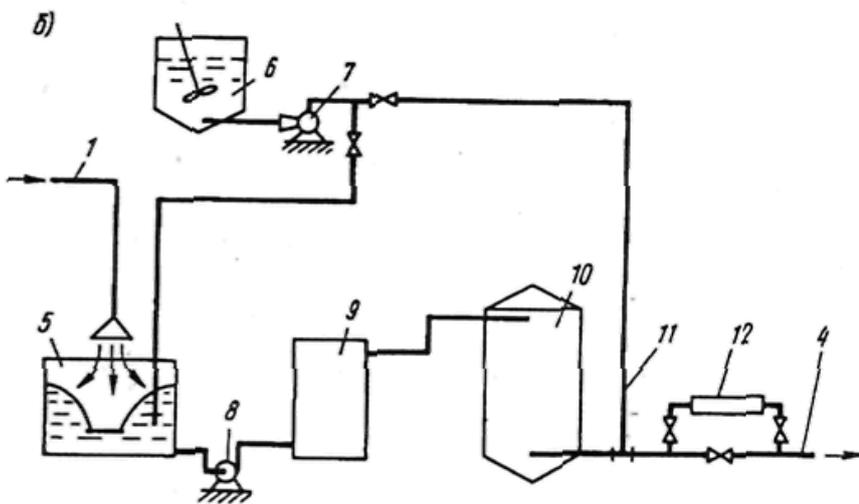
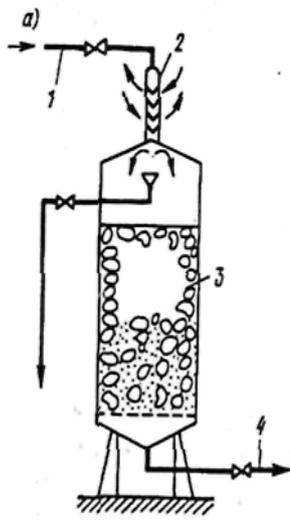


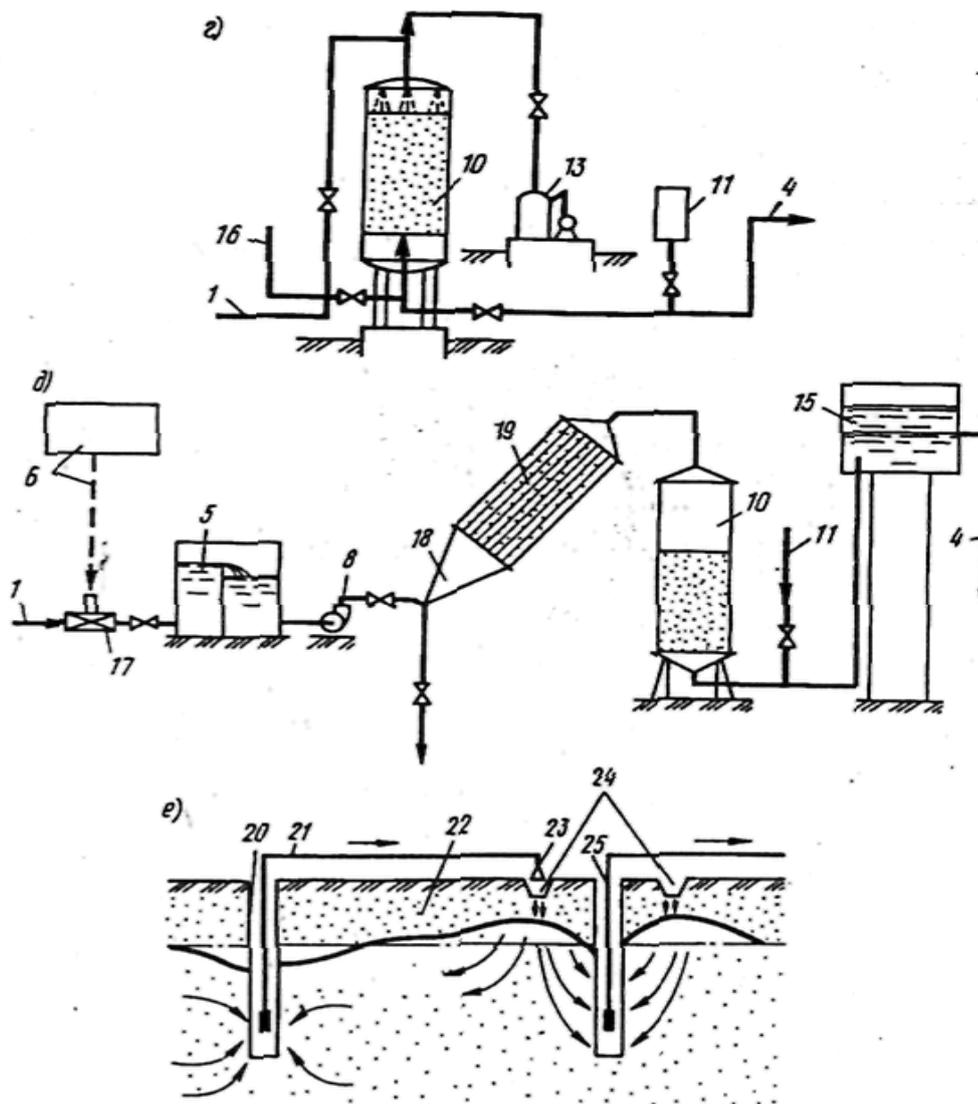
На окисление 1 мг железа (II) расходуется 0,71 мг перманганата калия; щелочность воды при этом уменьшается на 0,036 мг-экв/л.

## 28.2. ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЕ ПРИРОДНЫХ ВОД

Для деферизации воды применяют методы адекватно формам, количеству железа и буферным свойствам воды. Все многообразие методов, применяемых в технологии обезжелезивания воды, можно свести к двум основным типам: реагентные и безреагентные. Из используемых безреагентных методов обезжелезивания воды перспективными являются: вакуумно-эжекционная аэрация и фильтрование (рис. 7.49,а); упрощенная аэрация и фильтрование; «сухая» фильтрация; фильтрование на каркасных фильтрах; фильтрование в подземных условиях с предварительной подачей в пласт окисленной воды или воздуха (рис. 7.49,е); аэрация и двухступенчатое фильтрование. К реагентным относят следующие методы: упрощенная аэрация, окисление, фильтрование; напорная флотация с известкованием и последующим фильтрованием; известкование, отстаивание в тонкослойном отстойнике и фильтрование; фильтрование через модифицированную загрузку; электрокоагуляция; катионирование.







**Рис. 7.49. Схемы установок обезжелезивания природных вод методами**

*a* - вакуумно-эжекционная аэрация и фильтрование; *б* - упрощенная аэрация (установка “Деферрит”); *в* - упрощенная аэрация с двухступенчатым фильтрованием; *г* - сухая фильтрация; *д* - известкование (установка “Струя”); *е* - обезжелезивание в пласте. 1, 4 - подача исходной и отвод обработанной воды; 2 - вакуумно-эжекционный аппарат; 3 - скорый каркасно - засыпной фильтр, 5 - бак - аэратор; 6 - реагентное хозяйство; 7 - насос-дозатор; 8 - насос; 9 - ресивер; 10 - скорый фильтр; 11 - ввод хлора (вариант); 12 - бактерицидная установка; 13 - компрессор; 14 - скорый фильтр II ступени; 15 - водонапорная башня; 16 - сброс воздуха; 17 - трубчатый смеситель; 18 - камера хлопьеобразования; 19 - тонкослойный отстойник; 20 - вспомогательный колодец; 21 - подача воды на аэрацию; 22 - зона аэрации; 23 - аэрационное устройство во: 24 - кольцевой инфильтрационный бассейн; 25 - эксплуатационный колодец

Многообразие методов обезжелезивания воды исключает их равноценность в отношении надежности, технологичности, экономической целесообразности, простоты, области применения и т.д. Обезжелезивание поверхностных вод можно осуществить лишь реагентными методами, а для удаления железа из подземных вод наибольшее распространение получили безреагентные методы.

Безреагентные методы обезжелезивания могут быть применены, когда исходная вода характеризуется: рН - не менее 6,6; щелочность - не менее 1,5 мг-экв/л; содержание

углекислоты до 80 мг/л и сероводорода до 2 мг/л; перманганатная окисляемость - не более 9,5 мг O<sub>2</sub>/л. При этом при содержании железа (III) не более 10 % общего и концентрации железа (II) в бикарбонатной или карбонатной форме до 3 мг/л рекомендуется метод фильтрования на каркасных фильтрах без вспомогательных фильтрующих средств: до 5 мг/л - предпочтительно применять метод «сухой» фильтрации; от 5 до 10 мг/л следует использовать метод упрощенной аэрации с одноступенчатым фильтрованием; от 10 - 20 - аэрация и двухступенчатое фильтрование; от 10 - 30 мг/л рекомендуется вакуумно-эжекционная аэрация с фильтрованием через загрузку большой грязеемкости. При содержании углекислого или карбонатного железа (II) более 20 мг/л или при наличии сероводорода 1 - 5 мг/л, рН не ниже 6,4 рекомендуются метод вакуумно-эжекционной аэрации с последующим отстаиванием в тонком слое воды или обработкой в слое взвешенного осадка и фильтрование.

Реагентные методы обезжелезивания воды применяют при низких значениях рН, высокой окисляемости, нестабильности воды. При этом при содержании сернокислого или карбонатного железа, либо комплексных железоорганических соединений: до 10 мг/л и перманганатной окисляемости до 15 мг O<sub>2</sub>/л рекомендуется применять фильтрование через модифицированную загрузку; до 15 мг/л и перманганатной окисляемости до 15 мг O<sub>2</sub>/л предпочтителен метод, предусматривающий упрощенную аэрацию, обработку сильным окислителем и фильтрование через зернистую загрузку большой грязеемкости; свыше 10 мг/л и перманганатной окисляемости более 15 мг O<sub>2</sub>/л следует применять напорную флотацию с предварительным известкованием и последующим фильтрованием или метод, предусматривающий аэрацию, известкование, отстаивание в тонком слое и фильтрование; свыше 10 мг/л, перманганатной окисляемости более 15 мг O<sub>2</sub>/л при производительности установок до 200 м<sup>3</sup>/сут можно рекомендовать электрокоагуляцию с барботированием, отстаиванием в тонком слое и фильтрование. Обезжелезивание воды катионированием целесообразно лишь в тех случаях, когда одновременно с обезжелезиванием требуется умягчение воды, при этом ионным обменом могут быть лишь извлечены ионы железа (II).

Метод упрощенной аэрации (см. рис. 7.49,б) применим как в гравитационном, так и в напорном варианте в зависимости от производительности установки. Помимо вышеуказанных, показателями применимости этого метода являются условия, когда окислительно-восстановительный потенциал воды после аэрации будет не менее +100 мВ и индекс стабильности воды не менее +0,05. Метод упрощенной аэрации основан на способности воды, содержащей железо (II) и растворенный кислород, при фильтровании через зернистый слой выделять железо на поверхности зерен, образуя каталитическую пленку из ионов и оксидов железа (II) и (III). Эта пленка интенсифицирует процесс окислации и выделения железа из воды. Обезжелезивание воды в загрузке, покрытой пленкой, является гетерогенным автокаталитическим процессом, в результате чего обеспечивается непрерывное обновление пленки как катализатора непосредственно при работе фильтра. По А.М.Перлиной метод не требует окислации всего железа (II) в трехвалентное и перевод его в гидроксид, в связи с чем отпадает необходимость в устройстве дорогостоящих аэрационных сооружений. Упрощенная аэрация осуществляется с помощью несложных приспособлений путем разлива воды с небольшой высоты в карман или центральный канал фильтра, либо путем вдувания воздуха в обрабатываемую воду. Отсутствие специальных аэрационных устройств и контактных емкостей упрощает эксплуатацию и снижает стоимость очистки. Для определения высоты слоя фильтрующей загрузки  $L$  при обезжелезивании подземных бикарбонатных и карбонатных вод по методу упрощенной аэрации, рекомендуется эмпирическая формула автора

$$L = vd, \ln A / \{K\alpha(1-n)t^{0.74}(3pH-18.8) [O_2]\},$$

где  $V$  - скорость фильтрования, м/ч;  $d_3$  - эквивалентный диаметр фильтрующей загрузки, мм;  $A = C_n/C_\phi$  (здесь  $C_n$  и  $C_\phi$  - содержание железа (II) соответственно в исходной воде и фильтрате, мг/л);  $K$  - константа окисления железа (II), определяемая эмпирическим путем;  $\alpha$  и  $n$  - соответственно коэффициент формы зерен и пористость фильтрующей загрузки;  $t_1$ , - температура исходной воды, °С;  $[O_2]$  - содержание в воде растворенного кислорода, мг/л.

Сущность метода «сухой» фильтрации (см. рис. 7.49,г) заключается в фильтровании воздушно - водяной эмульсии (три - пять объемов воздуха на один объем воды) через «сухую» (незатопленную) зернистую загрузку путем образования в ней вакуума или нагнетания больших количеств воздуха с последующим отсосом из поддонного пространства. В обоих случаях в поровых каналах фильтрующей загрузки образуется турбулентный режим движения смеси, характеризующийся завихрениями и противотоками, что способствует молекулярному контакту воды с поверхностью зерен контактной массы. При этом на зернах фильтрующей загрузки формируется адсорбционно - каталитическая пленка из соединений железа (марганца, если он присутствует в воде), повышая эффективность процессов деманганации и обезжелезивания.

Характерной особенностью процесса является образование дегидратированной пленки на зернах загрузки (песок, керамзит, антрацит, винипласт, полистирол, полиметилметакрилат и др.), состоящей, как: показали рентгенографические определения Б.Д.Сукасяна, из магнетита, сидерита, гетита и гематита. Указанные соединения имеют плотную структуру, а их объем в 4.5 раз? меньше, чем гидроксида железа. Поэтому темп прироста потерь напора в фильтрующей загрузке при напорном фильтровании по методу «сухой» фильтрации чрезвычайно мал, а продолжительность фильтроцикла - велика (от нескольких месяцев до года и более). Отличительными особенностями процесса являются: минимальный период «зарядки» фильтрующей загрузки (т.е. образование на поверхности зерен активной адсорбционной пленки), составляющий от 0,3 до 2 ч, повышение pH и некоторое снижение жесткости фильтрата, высокая грязеемкость загрузки и отсутствие промывочных вод (по Г.Ю.Ассу, загрузка отмывается от соединений железа 0,5 - 1 % - ным раствором дитианита или заменяется на новую, можно отмывать 5 - 10 % - ным раствором ингибированной соляной кислоты). В фильтрате обычно наблюдаются железо (II) и следы железа (III).

Продолжительность, суточного, фильтроцикла по схеме «сухой» фильтрации, находят из выражения (по Г.И.Николадзе)

$$T = \frac{12400 L d_3 K_1}{\nu [1 - 0,08 (12,8 - t_1)] \cdot 10^{0,4 \text{ pH}} \ln(C_n/C_\phi)}$$

где  $A$  - воздушно - водяное отношение. Остальные обозначения см. выше.

*Метод упрощенной аэрации с двухступенчатым фильтрованием* (см. рис. 7.49,в) предпочтительно применять в напорном варианте. Сущность процесса аналогична описанной выше. В самом начале процесса обезжелезивания при поступлении на фильтр первых порций воды, когда загрузка еще чистая, адсорбция соединений железа на ее поверхности происходит в мономолекулярном слое, т.е. имеет место физическая адсорбция, обусловленная силами притяжения между молекулами адсорбата (поверхность твердого тела - адсорбента насыщается молекулами адсорбата). После образования мономолекулярного слоя процесс выделения соединений железа на зернах песка не прекращается, а наоборот, усиливается вследствие того, что образовавшийся монослой химически более активен, чем чистая поверхность песка. Электронно-микроскопические исследования пленки (Г.И.Николадзе, И.А.Абдурасулов) показали, что она состоит из шаровых молекул гидроксида железа и других соединений, как железа (III), так и железа (II). Количество связанной воды в пленке достигает 20 %. Величина истинной поверхности пленки составляет не менее 200 м<sup>2</sup>/г.

Адсорбционные свойства пленки из соединений железа на зернах фильтрующей загрузки, высокая ее удельная поверхность и наличие большого количества связанной воды

позволяют сделать вывод, что пленка представляет собой очень сильный адсорбент губчатой структуры. Одновременно пленка является катализатором окисления поступающего в загрузку железа (II). В связи с этим эффект очистки воды в зернистом слое несравненно выше, чем это могло быть в гомогенной среде. Для подобного катализатора ряд веществ, находящихся в воде (аммиак, сероводород, свободная углекислота, коллоидная кремнекислота), являются «ядами». Молекулы этих веществ имеют два свободных электрона, которые могут участвовать в образовании ковалентных связей с поверхностью катализатора, что при значительных концентрациях этих соединений приводит к понижению его активности. Процесс описывается следующим уравнением:

$$\begin{aligned} Fe_{ост} = & 1.66+0.85(5)^{-1} (Fe_{исх}-25)-1,14(0,6)^{-1} (h_1-1,16)+ \\ & 1,01(4)^{-1} (v_1-11)-(0,4)^{-1} (h_2-1,1)+1,21(2)^{-1} (v_2-6) + \\ & 0,75(5)^{-1} (Fe_{исх}-25)(4)^{-1} (v_1-11)-0,71(0,6)^{-1} (h_1-1,16)2^{-1} (v_2-6), \end{aligned}$$

где  $Fe_{ост}$  и  $Fe_{исх}$  - содержание железа соответственно после фильтра II ступени и в обрабатываемой воде: мг/л;  $h_1$ , и  $h_2$  - высота слоев фильтрующей загрузки на фильтрах соответственно I и II ступеней;  $v_1$  и  $v_2$  - скорость фильтрования на фильтрах соответственно I и II ступеней.

*Деферизацию методом фильтрования на каркасных фильтрах* следует применять для обезжелезивания воды на установках производительностью до 1000 м<sup>3</sup>/сут. Сущность обезжелезивания воды по рассматриваемому методу заключается в том, что железо (II) после окисления кислородом воздуха переходит в декантирующее железо (III). Гидроксид железа (III), формирующийся в нижней части аппарата, намывается на патрон. При этом в начале процесса решающую роль играет различие в зарядах керамического патрона, хлопьев гидроксида железа и ионов железа (II). Нарастающий на патроне слой гидроксида железа служит контактным материалом для новых постоянно намываемых агрегатов, при этом происходят как физические, так и химические процессы. Патрон служит только опорным каркасом для фильтрующего слоя гидроксида железа. По Г.И.Николадзе, К.Хассену, первой стадией процесса является фильтрование с постепенным закупориванием пор фильтрующей перегородки. Эта стадия заканчивается по достижении определенного соотношения объема твердых частиц, задержанных в порах, к объему самих пор, после чего наступает вторая стадия - фильтрование с образованием первоначального слоя осадка. На этом заканчивается процесс зарядки фильтра и начинается фильтрование с целью обезжелезивания воды.

Нижеприводимые формулы позволяют определять количество. фильтрата  $Q$ , м<sup>3</sup>/ч, получаемого с 1 м<sup>2</sup> фильтрующей поверхности и скорость фильтрования, м/ч:

### Где формулы

где  $\Delta p$  - перепад давления при фильтровании;  $m_T$  - масса твердой фазы, задерживаемой фильтрующим каркасом при получении единицы объема фильтрата;  $[Fe]$  - содержание железа в обрабатываемой воде.

*Метод аэрации с использованием вакуумно-эжекционных аппаратов* (см. рис. 7.42) заключается в окислении кислородом воздуха железа (II) в оксидное с образованием коллоида гидроксида железа (III), его коагулировании при рН = 6,8..7 и выделении в осадок в виде бурых хлопьев. При контакте воды, содержащей железо (II), с воздухом кислород растворяется в воде, окислительный потенциал системы повышается, и если при этом создать условия для удаления части растворенной углекислоты, то рН системы возрастает до значения, обеспечивающего при данном окислительном потенциале декантацию гидроксида железа (III). При использовании в этой схеме осветлителей со слоем взвешенного осадка, процесс описывается уравнением Н.В.Шиха

$$Fe = Fe_{исх} \exp[-b(H/v)^n],$$

где  $Fe$  и  $Fe_{исх}$  - содержание железа в воде соответственно после осветлителя и в обрабатываемой, мг/л;  $e$  - основание натуральных логарифмов;  $b$  - экспериментальный коэффициент, зависящий от свойств воды,  $ч^{-1}$ ;  $H$  - высота взвешенного слоя, м;  $V$  - скорость восходящего движения воды во взвешенном слое, м/ч;  $n$  - экспонента, учитывающая влияние скорости окисдации железа (II) на эффект обезжелезивания воды.

*Обезжелезивание воды фильтрованием через модифицированную загрузку применяют при ее повышенной окисляемости.* Оно основано на увеличении сил адгезии путем воздействия на молекулярную структуру поверхности зерен фильтрующей загрузки. Для увеличения сил адгезии, как показали исследования, необходимо на поверхности зерен фильтрующей загрузки образовать пленку из соединений, имеющих более высокое значение константы Ван - дер - Ваальса. Кроме того, электростатические свойства этих соединений должны обеспечить изменение дзета-потенциала поверхности зерен в нужном направлении. При этом силы адгезии соприкасающихся тел тем больше, чем больше молекулярные массы.

По В.В.Комкову, методика модификации загрузки предусматривает ее последовательную обработку 1,5 % - ным раствором сернокислого железа (II), а затем 0,5 % - ным раствором перманганата калия. Суммарная продолжительность контакта 30 мин. Спустя 20 мин после начала работы фильтр отвечает лимитам ГОСТ 2874 - 82.

*Обезжелезивание воды упрощенной аэрацией, хлорированием и фильтрованием* заключается в удалении избытка углекислоты и обогащении воды кислородом при аэрации, что способствует повышению рН и первичному окислению железоорганических соединений. Окончательное разрушение комплексных соединений железа (II) и частичная его оксидация достигаются путем введения в обрабатываемую воду окислителя (хлора, озона, перманганата калия и др.). Соединения железа (II) и (III) извлекаются из воды при фильтровании ее через зернистую загрузку.

Хлор вводится в водяную подушку через специальную распределительную трубчатую систему; при этом требуется обеспечить необходимую экспозицию окислителя с обрабатываемой водой. В качестве фильтровального аппарата рекомендуются контактные фильтры КФ - 5 с повышенной грязеемкостью. В контактном фильтре КФ-5 фильтрующая загрузка состоит из трех слоев толщиной по 0,6 м: верхний слой - керамзит или полимеры с крупностью зерен 2,3 - 3,3 мм, средний слой - антрацит или доменный шлак с крупностью зерен 1,25 - 2,3 мм, нижний слой - кварцевый песок или горелые породы с зернами крупностью 0,8 - 1,25 мм. Скорость фильтрования до 10 м/ ч, промывка водовоздушная. Исследования Г.И.Николадзе и М.Ульда показали возможность использования озонирования и фильтрования воды для совместного извлечения железа и марганца.

*Обезжелезивание методом напорной флотации* основано на действии молекулярных сил, способствующих слипанию отдельных частиц гидроксида железа с пузырьками тонкодиспергированного в воде воздуха и всплыванию образующихся при этом агрегатов на поверхность воды. Метод флотационного выделения дисперсных и коллоидных примесей природных вод весьма перспективен вследствие резкого сокращения продолжительности процесса (в 3 - 4 раза) по сравнению с осаждением или обработкой в слое взвешенного осадка. По Ш. Ш. Шоимову, процесс тшпорно - флотационного разделения хлопьев гидроксида железа можно подразделить на следующие стадии: оксидация железа (II); растворение воздуха в воде и образование пузырьков; образование комплексов «пузырек воздуха - хлопья гидроксида железа»; подъем этих комплексов на поверхность воды. Каждая стадия оказывает существенное влияние на эффективность и экономичность процесса.

На эффективность процесса всплывания хлопьев при флотационном разделении оказывают влияние концентрация взвешенных веществ (исходная концентрация железа, доза извести), количество и размер пузырьков, продолжительность флотации, а также гидродинамические условия. Эффект флотации можно определять по формулам:

$$\mathcal{E} = 61,26 - 0,21t - 0,25\Pi + 0,056И + 0,278[\text{Fe}] - 13,4p;$$

$$Oк = 22,38 - 0,225\Pi - 0,0136И - 10,9p,$$

где  $t$  - продолжительность пребывания воды во флотаторе, мин;  $\Pi$  - количество воды, подвергаемое насыщению воздухом, л;  $И$  - доза извести, мг/ л;  $p$  - давление насыщения, МПа;  $[\text{Fe}]$  - исходная концентрация железа, мг/ л;  $\mathcal{E}$  - эффект обезжелезивания;  $Oк$  - окисляемость.

Снижение окисляемости зависит в основном от количества воды, подвергаемой насыщению воздухом, дозы извести и давления насыщения. При увеличении продолжительности флотации, давления в напорном баке, дозы извести, а также исходного содержания железа, эффект обезжелезивания повышается, а при увеличении количества диспергированной воды - понижается. Другие факторы существенного влияния не, оказывают.

Для обезжелезивания нестабильной воды Г.И.Николадзе, А.Райдом, Г.Н.Канделаки, В.Б.Викулиной разработана технология ее фильтрования через модифицированную щелочными реагентами зернистую загрузку; для совместного обезжелезивания и дефторирования ими рекомендовано фильтрование воды через зернистую загрузку, модифицированную сульфатом алюминия и триполифосфатом.

Удаление высококонцентрированных устойчивых форм железа из воды аэрацией, известкованием, отстаиванием в тонком слое и фильтрованием достигается после полной оксидации железа (II) и деструкции комплексных железоорганических соединений при рН не менее 7,1. Процесс выделения соединений железа в тонкослойном отстойнике носит циклический характер и при этом эффект обезжелезивания воды зависит главным образом от скорости потока в тонкослойных модулях, исходной концентрации железа и дозы щелочного реагента. Для агломерации хлопьев гидроксида железа, оседающих в отстойнике, объем камеры хлопьеобразования вихревого типа, совмещенной с отстойником, должен обеспечивать продолжительность пребывания обрабатываемой воды не менее 15 мин. По И.А.Абдурасулову, достигаемый в тонкослойных модулях эффект деферризации воды  $\mathcal{E}$ , %, зависит от скорости движения потока -  $v_0$ , дозы щелочного реагента  $D_{и}$ , содержания железа в обрабатываемой воде -  $Fe$  и описывается уравнением

$$\mathcal{E} = 32,23 + 0,33v_0 - 0,224v_0^2 + 1,28D_{и} - 0,007D_{и}^2 + 0,37Fe_{исх}$$

Скорость движения воды в тонкослойных модулях

Удаление высококонцентрированных устойчивых форм железа из воды аэрацией, известкованием, отстаиванием в тонком слое и фильтрованием достигается после полной оксидации железа (II) и деструкции комплексных железоорганических соединений при рН не менее 7,1. Процесс выделения соединений железа в тонкослойном отстойнике носит циклический характер и при этом эффект обезжелезивания воды зависит главным образом от скорости потока в тонкослойных модулях, исходной концентрации железа и дозы щелочного реагента. Для агломерации хлопьев гидроксида железа, оседающих в отстойнике, объем камеры хлопьеобразования вихревого типа, совмещенной с отстойником, должен обеспечивать продолжительность пребывания обрабатываемой воды не менее 15 мин. По И.А.Абдурасулову, достигаемый в тонкослойных модулях эффект деферризации воды  $\mathcal{E}$ , %, зависит от скорости движения потока -  $v_0$ , дозы щелочного реагента  $D_{и}$ , содержания железа в обрабатываемой воде -  $Fe$  и описывается уравнением

$$v_0 = 100 L_0 A_0 v_{кр} / \{1000 L_0 A_0 + v_{кр} F [2(Fe_{исх} - Fe_{ост}) + K]\},$$

где  $L_0$  - длина трубки (ячейки) отстойника, м;  $V_{кр}$  - критическая скорость потока в отстойнике, м/ч;  $A_0$  - параметр, характеризующий величину концентрации отложений, выпавших в отстойнике, г/л;  $F$  - функциональный параметр, зависящий в основном от продолжительности уплотнения осадка и цикла отстаивания, ч;  $K$  - концентрация нерастворимой взвеси в составе щелочного реагента, мг/л;  $Fe_{ост}$ ,  $Fe_{исх}$  - содержание железа в отстойной и исходной воде, мг/л.

Содержание железа, мг/л, в отстоянной воде можно найти из выражения

$$Fe_{ocm} = Fe_{ucx}(1 - 0,01Э)$$

Для удаления сульфата железа (II) применяют известкование. Добавленная известь реагирует вначале с сульфатом железа (II), а образующийся гидроксид железа (II) окисляется в  $Fe(OH)_3$ , при этом, если количество кислорода, содержащегося в воде, недостаточно для окислации, одновременно с известкованием проводят хлорирование или аэрирование воды.

Доза извести (при  $Fe^{2+} \cdot 28 > Ш_{ucx}$ ), мг/л,

$$D_{\text{изв}} = 28 [(CO_2)/22 + (Fe^{2+})/28 + D_w/e_1],$$

где  $(CO_2)$  - содержание в воде свободного оксида углерода (IV), мг/л;  $(Fe^{2+})$  - содержание в воде железа (II), мг/л;  $e_1$  - эквивалентная масса безводного вещества коагулянта, мг/мг-экв;  $Ш_{ucx}$  - щелочность исходной воды; мг-экв/л.

Дозу хлора или хлорной извести определяют по формуле  $D_{\text{акт.х}} = 0,7[Fe^{2+}]$ , мг/л, а дозу перманганата калия по формуле  $D_{KMnO_4} = [Fe^{2+}]$ , мг/л.

Для быстрой окислации железа (II), даже при низких значениях pH, применяют катализаторы, в качестве которых используют дробленый пиролюзит, «черный» песок (песок, покрытый пленкой оксидов марганца, образующейся в результате разложения 1 % - ного раствора перманганата калия, подщелоченного до pH = 8,5..9 водным раствором аммиака) и сульфуголь, покрытый пленкой оксидов марганца. В этих случаях для окисления железа (II) вода должна фильтроваться со скоростью 10 м/ч через слой катализатора толщиной 1 м.

*Обезжелезивание воды катионированием* допускается применять при необходимости одновременного удаления солей железа и солей, обуславливающих жесткость, и когда в обрабатываемой воде отсутствует кислород.

*Обезжелезивание поверхностных вод* осуществляют при одновременном осветлении и обесцвечивании. Железо, находящееся в воде в виде коллоидов, тонкодисперсных взвесей и комплексных соединений, удаляется обработкой воды коагулянтами. Для разрушения комплексных органических соединений железа воду обрабатывают хлором, озоном или перманганатом калия. При использовании железных коагулянтов достигается более полное удаление железа из воды в результате интенсивной адсорбции ионов железа на хлопьях гидроксида. Оптимум адсорбции ионов железа как в случае применения алюминиевых, так и железных коагулянтов лежит в интервале значений pH воды 5,7 - 7,5. Доза коагулянта устанавливается экспериментально. Технологическая схема обезжелезивания воды методом коагулирования включает реагентное хозяйство, смесители, осветлители и скорые фильтры.

Гидроксиды железа из воды наиболее эффективно извлекаются в осветлителях со слоем взвешенной контактной массы. Благодаря гетерогенно - каталитическому процессу железо (II) в слое взвешенной контактной среды окисляется быстрее. На эффект обезжелезивания влияют pH, температура, исходная концентрация железа, высота слоя осадка и скорость восходящего потока воды. При коагуляции без известкования эту скорость принимают равной 0,8 мм/с, с известкованием 1,0 мм/с. Высоту слоя взвешенной контактной среды в осветлителе принимают равной 2 м, высоту защитного слоя воды над осадком - 1,5 м. Объем осадкоуплотнителя в осветлителе должен обеспечивать пребывание в нем осадка в течение 6 ч. Количество отсасываемой в осадкоуплотнитель воды составляет 20..30 %.

В составе обезжелезивающих установок применяют скорые одно или двухслойные фильтры. При размере зерен 0,6 - 1,2 мм толщину фильтрующего слоя принимают равной 1,0 - 1,5 м. Скорость фильтрования на скорых фильтрах 5..7, а на двухслойных - до 10 м/ч. Для 1 очистки фильтрующих слоев применяют водовоздушную промывку, дополняя ее верхней промывкой.

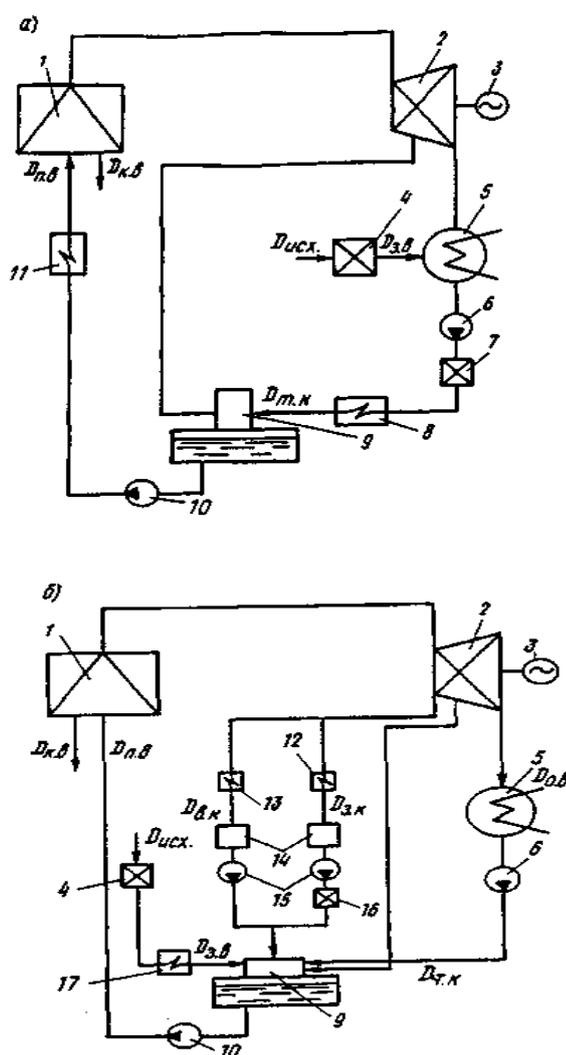
### 28.3. ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЕ КОНДЕНСАТА ТЭС И ТЭЦ

Оборудование современных ТЭС и АЭС работает при высоких тепловых нагрузках, что требует жесткого ограничения толщины отложений на поверхностях нагрева по

условиям температурного режима их металла в процессе эксплуатации. Эти отложения образуются из примесей добавочной воды и конденсата (табл. 7.22). Типичные схемы обращения воды в рабочих циклах конденсационных тепловых электростанций (КЭС) и теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) показаны на рис. 7.50.

**Рис. 7.50. Принципиальная схема обращения воды и тракте КЭС (а) и ТЭЦ (б)**

1 - котел (кипящий реактор), парогенератор; 2 - конденсационная турбина или турбина с отборами пара для нужд теплофикации и производства; 3 - электрогенератор; 4 - водоподготовительная установка; 5 - конденсатор турбины; 6 и 10 - конденсатный и питательный насосы; 7 - конденсатоочистка; 8 - подогреватель турбинного конденсата; 9 - деаэратор; 11 - подогреватель питательной воды; 12 и 13 - теплофикационный и производственный потребители пара; 14 - баки возвратного конденсата; 15 - насосы возвратного конденсата; 16 - установка очистки возвратного конденсата; 17 - подогреватель добавочной воды



На современных блочных КЭС конденсат турбин составляет не менее 98 % количества питательной воды, поэтому качество конденсата в значительной степени определяет качество питьевой воды. Конденсат загрязняется как в самом пароводяном цикле электростанции (продукты коррозии оборудования), так и из вне (добавочной водой, примесями охлаждающей воды).

Таблица 7.22

Источник загрязнений	Характеристика загрязнений
Добавочная вода	В зависимости от схемы очистки может содержать в различных концентрациях соли натрия и аммония, кремниевую кислоту, соединения железа, органические вещества, растворенные газы
Присосы охлаждающей воды	Все примеси природных вод в количестве, соответствующем удельному значению присоса
Коррозия конструктивных материалов	Оксиды и ионы железа, меди, алюминия, хрома и других элементов
Возвратный конденсат внешних потребителей пара на ТЭЦ	Оксиды железа, нефтепродукты, ионы кальция и магния, специфические загрязнения, определяемые типом паропользующего предприятия

Количество загрязнений, поступающих в питательную воду с конденсатом, может значительно превышать количество примесей, поступающих с добавочной водой. Даже при нормальной работе конденсаторов турбин присос охлаждающей воды составляет не менее 0,002 %, а обычно - 0,005 - 0,02 % общего расхода конденсата.

Железо в пароводяной цикл поступает в результате коррозии всего тракта, а в основном от не защищенного от коррозии оборудования химводоочистки и дренажей подогревателей. Железо попадает в воду также в результате отслаивания железистых отложений в котле при колебаниях температуры на отдельных участках. Вследствие большого количества загрязнений, поступающих в тракт от фильтров обессоливания, представляется целесообразным применение обезжелезивания перед деаэраторами, что позволяет снизить стоимость подогревателя низкого давления (ПНД) путем замены в них трубок из аустенитной стали на трубки из углеродистой стали. Так как температура перед деаэраторами значительно выше, чем на блочной опреснительной установке (БОУ), то и растворимость железа здесь будет значительно меньше, т.е. железо будет находиться в основном виде железистого шлама.

В воде ТЭС могут присутствовать разнообразные соединения железа. Основными факторами, определяющими преимущественное содержание в воде оксидов той или иной формы, являются ее температура, pH и окислительно-восстановительный потенциал  $E$ . При  $pH = 8,5$  ионы  $Fe^{2+}$  и  $Fe(OH)^+$  присутствуют в одинаковых количествах и обуславливают суммарную концентрацию железа около 5600 мкг/кг. При  $pH = 13$  - практически все молекулы гидроксида железа (II) образуют гидрокомплексы.

Вероятность присутствия в конденсате той или иной формы железа определяется модифицированной диаграммой Пурбе (см. рис. 7.48,в).

Максимально допустимое содержание кислорода, при котором еще устойчив магнетит, 400 мкг/кг, при большем содержании он может перейти в гидроксид железа (III) (точнее, в  $\gamma$  -  $FeOOH$  и  $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ ). Редокс-потенциала  $E$  должен быть не более +800 мВ (при  $pH = 7$ ) и содержание железа (III) резко ограничено; только в очень кислых и сильнокислых условиях активность этого иона более  $10^{-6}$ . Основное поле диаграммы (при  $pH$ , близких к условиям работы ТЭС) занимают магнетит  $Fe_3O_4$  и  $Fe_2O_3(FeOOH)$ . Термодинамически более устойчивым и поэтому преобладающим в циклах обычных ТЭС при температуре менее 570 °С является магнетит.

Первые установки конденсатоочистки предназначались только для задержания возможных примесей присосов солей и кремниевой кислоты и состояли лишь из ионитовых фильтров. Затем вследствие эксплуатационных затруднений, вызванных повышенным содержанием железа в конденсате, особенно при пуске блоков и после простоев оборудования, стали применять префильтры, для удаления продуктов коррозии, а на участках низкого давления системы регенеративного подогрева ( $t = 120^\circ C$ ) и совмещения этого процесса с обессоливанием был разработан метод Паудекс-очистки.

При этом способе горячий конденсат фильтруется через небольшой слой ионитов, намываемый на специальные фильтровальные элементы, что позволяет удалять даже коллоидные оксиды железа и кремниевую кислоту. Конструкция «Паудекс-фильтра» аналогична конструкции намывного механического фильтра. Он имеет свечи, на которые намывается смесь ионита и катионита толщиной 3 - 12 мм. Количество намываемого ионита составляет  $1 \text{ кг/м}^2$  при толщине слоя 6 мм, скорость фильтрования 10 м/ч, начальные потери напора  $0,035 \text{ МН/м}^2$ . Содержание в фильтрате железа, меди, кремниевой кислоты очень мало и находится в пределах чувствительности современных методов анализа. Паудекс - процесс проводится с ионитом в Н - ОН - форме, а также в  $\text{NH}_4$  - ОН - форме, в результате чего предотвращается снижение рН среды в цикле.

Степень использования полной обменной емкости ионитов вследствие устранения влияния процессов диффузии увеличивается с 20 - 50 (ФСД) до 90 %. Высокую степень удаления коллоидных частиц железа можно объяснить нейтрализацией их зарядов тонкодисперсными частицами ионитов. Скорость поглощения сильноосновных ионов ионитом в Паудекс - процессе увеличивается в 100 раз. Коллоидные частицы (50 - 100 мкм) удаляются при потере напора  $0,035$  вместо  $0,35 \text{ МН/м}^2$  на мембранных фильтрах. Так как иониты используют кратковременно, возможно повышение температуры конденсата до  $150^\circ\text{C}$ . Опыт эксплуатации Паудекс - установок позволяет сделать следующие выводы: Паудекс - процесс можно использовать для очистки конденсата при различных условиях работы блока (первый пуск, нормальная эксплуатация, период присоса в конденсаторах); очистка конденсата возможна при температуре до  $150^\circ\text{C}$ ; процесс обладает гибкостью, удаляет все виды загрязнений. Рабочий цикл фильтров составляет от 12 - 24 ч до 7 сут и иногда до 3 недель и определяется в основном потерей напора.

Достоинствами «Паудекс-фильтров» являются простота конструкции, малые капитальные затраты, небольшие потери напора в фильтре, эффективность удаления из конденсата растворенных солей, коллоидных и взвешенных частиц, высокая степень надежности оборудования, отсутствие необходимости обработки конденсата реагентами и нейтрализации стоков, высокая степень использования обменной емкости ионитов (80 - 90 %), возможность обезжелезивания конденсата при температуре до  $150^\circ\text{C}$ .

К числу недостатков Паудекс-процесса следует отнести большой расход высококачественных и дефицитных ионитов, отсутствие регенерации ионитов (нет их повторного использования), при аварии конденсаторов «Паудекс - фильтры» могут поддерживать работу блока в течение 30 - 60 мин, а при использовании морской охлаждающей воды - всего несколько секунд.

В конденсате содержится большое количество магнитовосприимчивых частиц, что позволило использовать магнитное поле, для удаления примесей. Магнитные свойства катионов железа довольно разнообразны. В конденсате присутствует гидроксид железа в двух формах  $\alpha - \text{Fe}(\text{OH})_3$  и  $\gamma - \text{Fe}(\text{OH})_3$ , он парамагнитен, так же как оксид железа  $\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$ . При высоких температурах в условиях котла железо стремится к магнетиту  $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ , который обладает ферромагнитными свойствами. Растворимость магнетита незначительная, поэтому можно считать, что все железо в конденсате находится в виде частиц диспергированных оксидов. Частички магнетита, однажды, намагниченные, сохраняют свои свойства длительное время. Магнетит намагничивается довольно слабо, магнитные свойства его слабее, чем металлического железа, в 30 - 40 раз. С увеличением температуры его магнитные свойства слабеют.

Е.В.Терновцевым и др. были проведены исследования по использованию магнитного поля для интенсификации работы фильтра с магнетитовой загрузкой. На фильтр с магнетитовой загрузкой с частицами  $d = 0,5..1 \text{ мм}$ , высотой 0,25 м накладывалось магнитное поле постоянного тока, напряженность которого 1000 - 2000 Э. Работу магнитомагнетитовых фильтров сравнивали с параллельно работающими магнетитовыми фильтрами. Температура фильтрата составляла 24 - 26  $^\circ\text{C}$ . Как показали исследования, при магнитном поле

напряженностью 500 Э и скорости фильтрования примерно 85 м/ч происходит эффективное удаление оксидов железа, значительно более глубокое, чем в обычных магнетитовых фильтрах. Это может быть обусловлено эффектом «магнитной коагуляции», сущность которой заключается в том, что частички магнетита, намагничиваясь, приобретают северный и южный полюсы. Сталкиваясь, частички коагулируют. Магнитная коагуляция отличается от коагуляции коллоидов, которая происходит благодаря электростатическим силам. Коагулированные субстанции отделяются на фильтрах значительно более полно.

В качестве механических фильтров для очистки конденсата применяют фильтры с намывным слоем (ФНС), в которых на фильтрующие элементы намывают вспомогательное фильтрующее вещество. Конструкции аппаратов для очистки турбинного конденсата самые различные: с плоским фильтрующим слоем или с патронными трубчатыми элементами, с нанесением вспомогательного материала на мелкие сетки или на обмотку из проволоки трапециевидного сечения, с удалением шлама вне фильтра струей из брандспойта или гидравлической промывкой Вигутри фильтра. Фильтрующий материал - волокна целлюлозы; иногда поверх подслоя из целлюлозы намывают активный уголь или смесь этих материалов. Применяют как периодический разовый намыв вспомогательного слоя, так и непрерывную дозировку малых его количеств (2 - 5 г/м<sup>3</sup>). Скорость фильтрования 7 - 10 м/ч (до 17 м/ч). Остаточное содержание железа составляет 2 - 3 мкг/л. Полимерные фильтрующие среды могут быть успешно применены как в намывных фильтрах вместо целлюлозы, так и в механических фильтрах, эксплуатация которых значительно проще. Результаты исследований и данные эксплуатации позволяют считать перспективными следующие области применения полимерных фильтрующих материалов: 1) обезжелезивание возвратного конденсата на ТЭС с барабанными котлами. Основная масса оксидов железа в возвратном конденсате ТЭС имеет фракции размером 0,9 мкм. В этих условиях использование полимерных материалов на ФНС обеспечивает снижение загрязнений до 80 %. Температура производственных конденсатов обычно не более 100 - 120 °С; в этом диапазоне температур многие полимеры устойчивы; 2) очистка дренажной воды ПНД на энергоблоках с прямоточными барабанными котлами. Очистка дренажной воды ПНД, а в некоторых случаях и ПВД позволяет отказаться от их каскадного сброса в конденсатор для последующей очистки. Возможность подачи дренажной воды с температурой до 150 °С (вместо 35°С) дает экономию теплоты 200 ккал/кг; 3) обезжелезивание турбинных конденсатов в блоках СКД перед ионитовыми фильтрами.

## **28.4. ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЕ ОБОРОТНЫХ ВОД**

Для многих производств возможно повторное использование воды без полного извлечения растворенных в ней продуктов при соблюдении условия сохранения их концентрации на постоянном уровне. Тогда надлежащий эффект очистки достигается уже в результате извлечения из оборотной воды лишь некоторого избытка загрязнений, что упрощает и удешевляет технологию ее очистки. Замкнутые системы водного хозяйства с извлечением железа из воды получили распространение на предприятиях черной металлургии, металлообработки и машиностроения. Ниже рассмотрены технологии обезжелезивания оборотных вод некоторых предприятий черной металлургии и машиностроения.

### **28.4.1. Сталеплавильное производство**

Основным компонентом состава пыли сталеплавильных агрегатов является железо в оксидной форме (до 98 %) в виде частичек крупностью около 0,1 мкм и плотностью 4,23 - 4,75 г/см<sup>3</sup>. Поэтому очистка газа от пыли помимо удовлетворения санитарных требований может дать значительную экономию, так как позволяет получить ценное металлургическое сырье (содержание чистого железа до 67 %). Первоначальная очистка газов от пыли

осуществляется с помощью турбулентных промывателей и скрубберов, либо электрофильтров, циклонов, пенных аппаратов, после чего пыль смешивают с водой и производят очистку последней. В сточной воде после газоочисток содержатся примеси в грубодисперсном, коллоидном и растворенном состояниях. При этом основными компонентами состава сточной воды газоочисток являются полидисперсные взвешенные вещества минерального происхождения или шлам, концентрация которого колеблется от 0,5 - 0,8 до 40 - 44 г/л.

Шламы представляют собой конгломерат с преобладающим размером частиц 10 - 100 мкм (55 %). По строению шламы следует отнести к кристаллическим и плотноаморфным группам. Химические анализы шлама показали, что содержание железа (общего) зависит от технологии производства, например в шламах конверторного цеха содержится 73,2 % железа, мартеновского цеха 64,4 %, электросталеплавильного цеха, 26,3 % и шламах доменной печи 65,4 %. В состав общего железа входят  $Fe_3O_4$  (магнетит);  $\gamma - Fe_2O_3$  (магхомит); FeO (франклит и пирротин). Наибольший процент магнитной составляющей железа  $Fe_3O_4$  содержит шлам мартеновского цеха (31,5 %). Магнетит находится в шламах в виде скоплений зерен неправильной формы; отдельные зерна магнетита имеют размеры 10 - 60 мкм.

Известны три технологические схемы очистки сточных вод газоочисток: одноступенчатая в радиальных отстойниках; двухступенчатая, предусматривающая предварительную очистку в гидроциклонах и окончательно в радиальных отстойниках; трехступенчатая, осуществляемая путем последовательного прохождения воды через гидроциклон, радиальный отстойник и гравийный фильтр. Следовательно, основным очистным сооружением для механической очистки сточных вод газоочисток является радиальный отстойник. В зарубежной практике наряду с отстойниками для очистки оборотных вод газоочисток используют аэроакселераторы и циклоторы.

Т.Г.Федоровской были проведены исследования с 0,1 % - ным раствором ПАА на оборотных водах конвертерных газоочисток, содержащих взвеси 1,5 - 24 г/л. При работе с оптимальными дозами ПАА 0,4 - 1 мг/л в течение 10 - 15 мин достигалось почти полное осветление оборотной воды. Примерно аналогичные результаты были получены при использовании флокулянтов К-4 и К-6 для осветления имитата с начальной концентрацией оксидов железа 5,5 - 7,2 г/л. Следует отметить, что эффект действия указанных флокулянтов прямо пропорционален содержанию минеральных примесей в оборотной воде. Было установлено, что в течение первых 30 мин при применении анионных флокулянтов в 4 - 5 раз ускоряется процесс осветления воды отстаиванием, а в дальнейшем влияние флокулянтов становится незначительным. Кроме того, существует обратная зависимость между рН сточной воды и эффектом действия рассмотренных флокулянтов. При применении анионных флокулянтов образуется пористый осадок, что способствует лучшему обезвоживанию его на вакуум-фильтрах. Ферромагнитные свойства шлама газоочисток металлургических производств позволили О.С.Хабарову использовать магнитные поля для интенсификации процесса осаждения взвеси благодаря магнитной коагуляции и притяжению частиц к полюсам магнитной системы. Промышленные шламы, обладающие ярко выраженным ферромагнетизмом, можно подразделять по объемной магнитной восприимчивости  $\chi$  на три типа: слабомагнитные ( $\chi \leq 0,5$ ), магнитные ( $\chi = 0,5..100$ ) и сильномагнитные ( $\chi > 100$ ).

При осветлении оборотных вод газоочисток отстаиванием магнитное поле способствует контактированию отдельных агрегатов с образованием флокул, которые также взаимодействуют между собой. Объем, плотность и скорость движения осаждения вновь образуемых флокул возрастают и достигают максимума у дна (скорость увеличивается на 15 - 20 %). Эффект осветления шлама прямо пропорционален напряженности намагничивающего поля и достигает максимума в интервале 800 - 1000 Э. Дальнейшее увеличение напряженности магнитного поля заметного влияния на эффект осветления не оказывает.

Наличие магнитного поля в процессе отстаивания полностью изменяет существующие закономерности осаждения частиц в воде, так как скорость падения намагниченных флокул изменяется во времени. Эта скорость зависит от полидисперсности среды, создаваемой магнитным полем, и способности флокул укрупняться в процессе седиментации, и прямо пропорциональна температуре воды. Эффект осветления воды осаждением при  $T = 58\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше на 2 - 3 % по сравнению с тем же процессом при  $T = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Сила магнитной коагуляции определяется величиной взаимодействия отдельных частиц и агрегатов и зависит от их размеров, расстояния между ними и напряженности поля. По данным микроскопических определений, средний диаметр флокул конвертерного шлама, формирующихся в зоне магнитного поля, равен 300 - 400 мкм, в то время как средний диаметр отдельных средних частиц 10 мкм.

Результаты исследований на моделях пластмассовых фильтров с загрузкой из стальных шаров диаметром 0,5 - 5 мм и высотой слоя 0,2 - 1 м с магнитным полем напряженностью 500 - 3000 Э, создаваемым соленоидной катушкой, размещенной по внешней поверхности аппарата, подтвердили возможность высокоэффективного осветления шлама при скоростях фильтрования до 50 м/ч. При достижении прироста потерь напора на фильтре  $6 \cdot 10^3$  -  $6,8 \cdot 10^3$  Па феррофильтрование прекращалось и фильтр подвергался промывке снизу вверх интенсивностью 8 л/(с · м<sup>2</sup>) в течение 2 - 3 мин при 1-гулевой напряженности магнитного поля. Опыты показали, что с повышением напряженности магнитного поля фильтра до 1000 - 1500 Э заметно уменьшается количество шлама в фильтрате, а дальнейшее увеличение напряженности свыше 2000 Э не влияет на степень его осветления. Установлено также, что с увеличением содержания железа (общего) в шламе качество фильтрата заметно возрастает. Содержание в исходном шламе 50 - 60 % общего железа позволяет достичь почти полного извлечения из него неферромагнитной компоненты.

С целью интенсификации осветления оборотной воды, содержащей оксиды железа, была исследована работа радиального отстойника с намагничивающим коагулирующим устройством соленоидного и полиградиентного типа. В основу были положены процессы отстаивания взвеси, предварительно намагниченной при прохождении воды через магнитное устройство. Для этого в устье центральной распределительной трубы монтируется фильтр из стальных шаров диаметром 1 мм с высотой слоя 0,5 - 1,0 м, а вокруг устанавливается намагничивающее устройство в виде катушки соленоидного типа, охватывающей весь периметр трубы. Намагничивающее устройство образует локальное магнитное поле, достаточное для формирования флокул.

Образуемое шарами трехмерное поле в 2 - 4 раза больше магнитной силы двумерного поля, что достигается за счет образования большой индукции насыщения по высоте загрузки. Проходя через распределительную трубу отстойника, ферромагнитная частица закрепляется на поверхности стального шара, что определяется пондеромоторной силой и происходит при условии, когда магнитная сила, воздействующая на частицу, равна или превышает сумму механических сил, т.е.  $F_{\text{маг}} / F_{\text{мех}} > 1$ . В результате на поверхности намагничивающей загрузки будут накапливаться частицы шлама - явление магнитного фильтрования. При этом за счет наведенных магнитных масс флокулы будут образовываться и в межпоровом пространстве. Как только механические силы станут превалировать над магнитными, начнется отрыв прядей - флокул с поверхности зерен и их вынос в зону осветления отстойника.

При использовании отстойника с полиградиентным полем с шаровой загрузкой эффект осветления воды на 40 - 60 % выше, чем в «однородном» поле. Кроме того, эффект осветления воды повышался с увеличением напряженности магнитного поля.

При изменении концентрации шлама от 600 до 1000 мг/л белее ярко наблюдается зависимость эффекта осветления воды (на 16 %) от исходного количества взвеси, при дальнейшем увеличении концентрации взвеси эффект осветления воды повышается в среднем на 5 - 7 %.

На кинетику осаждения шлама в отстойнике при прочих равных условиях влияют характер намагничивающего поля и его напряженность, начальная концентрация шлама (взвеси) в оборотной воде и удельная нагрузка.

Исследованиями влияния палиградиентного поля на продолжительность фильтроцикла магнитного фильтра и на потери напора установлена четкая зависимость продолжительности фильтроцикла  $T$  от удельной нагрузки и содержания шлама в воде, т.е. от количества и интенсивности поступления шлама в магнитный фильтр. Так, при увеличении концентрации взвеси в 5 раз фильтроцикл снижается на 1,5 - 2 ч, с повышением напряженности магнитного поля с 200 до 1800 Э фильтроцикл снижается на 0,5 и при увеличении удельной нагрузки с 1 до 4,8 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>ч) фильтроцикл снижается на 1,1 - 1,2 ч. Основным фактором, влияющим на потери напора в магнитном фильтре, является интенсивность поступления шлама на магнитный фильтр. Наряду с этим влияют исходная концентрация шлама и напряженность магнитного поля. С возрастанием удельной нагрузки потери напора увеличиваются в среднем на  $1,5 \cdot 10^3 - 4,5 \cdot 10^3$  Па. С возрастанием концентрации взвеси с 600 до 3000 мг/л потери напора увеличиваются на  $4,5 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^3$  Па. При увеличении напряженности магнитного поля с 200 до 1800 Э потери напора увеличиваются на  $3 \cdot 10^3 - 6,8 \cdot 10^3$  Па.

#### 28.4.2. Гальванические цехи

Традиционные технологии (реагентные, электрокоагуляция) обработки сбросных вод гальванического производства не позволяют получить очищенные воды, пригодные к повторному использованию, вследствие<sup>1</sup> высокой минерализации. В табл. 7.23 приведен состав сбросных вод травильных отделений (СВТО).

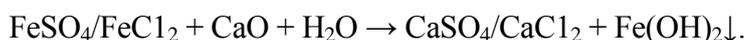
Существующие методы обработки отработанных солянокислых растворов СВТО классифицируют на четыре группы: нейтрализационные, кристаллизационные, ионообменные и экстракционные. Методы

Таблица 7.23

Показатель	Значения показателей при использовании для травления	
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HCl
Температура воды, °C	30 - 80	20 - 30
pH	1 - 2	1 - 2
Сухой остаток, г/л	100 - 300	100 - 300
Взвесь, г/л	0,5 - 50	0,4 - 30
Сульфаты, г/л Хлориды, г/л	100 - 300	-
FeSO <sub>4</sub> , г/л	-	120 - 250
FeCl <sub>2</sub> , г/л	-	250 - 350

ионного обмена и экстракции из-за дороговизны применяют крайне редко. Термический (кристаллизационный) способ регенерации травильных растворов получил распространение за рубежом. Несмотря на значительные энергетические затраты, он позволяет получить кислоту и снова ее использовать в производстве и оксид железа - Fe<sub>2</sub>O<sub>2</sub> либо хлористое железо - FeCl<sub>2</sub>, в твердом виде.

В практике очистки СВТО в нашей стране наибольшее распространение получил метод нейтрализации. Он основан на обработке кислых СВТО известковым молоком с доведением pH > 8 - 9. В результате нейтрализации содержащихся в СВТО кислот происходит декантация образующегося гидроксида железа (II)



Железосодержащий осадок после обезвоживания используют в качестве присадки при выплавке чугуна.

Технологическая схема нейтрализации СВТО предусматривает смеситель, нейтрализационную камеру, радиальный отстойник, реагентное хозяйство (сатураторы, дозаторы известкового молока), вакуум-фильтр для обезвоживания осадка и склады реагента и осадка.

Развитие гальванического производства вызвало необходимость совершенствования существующих и разработку новых методов очистки СВТО. Б.В.Мезиным была разработана и внедрена экономическая и экологическая безопасная технология очистки СВТО от ионов металлов (в том числе железа) на основе использования магнетита с гидроксидной оболочкой железа (II) в качестве сорбента, получаемого способом химической конденсации из растворов солей железа (II) и железа (III) в соотношении 1:1 при  $\text{pH} \geq 12$ , в результате чего образуются флоккулы: ядро - магнетит, оболочка - гидроксид железа (II), являющиеся превосходным сорбентом ионов тяжелых металлов. Применение магнетита позволяет интенсифицировать процесс гравитационного осветления воды и проводить обезвоживание осадка на фильтрпрессах без предварительного уплотнения. Технологическая схема сорбционного метода очистки СВТО с использованием магнетита состоит из усреднителя, механического смесителя, механической камеры реакции, тонкослойного отстойника, фильтр - пресса для обезвоживания осадка и аппаратов получения магнетита. В этой технологии весьма существенна роль камеры реакции, которая должна обеспечить равномерное по высоте распределение сорбента, достаточно интенсивное его перемешивание ( $\text{CT} = 1300..2000$ ) с массой сбросной воды в течение 10 - 12 мин. При этом оптимальная доза магнетита по отношению к ионам тяжелых металлов 3:1, в том числе по ионам хрома (VI) 6,5:1 при  $\text{pH}$  среды 7 - 8,5. Очищенные СВТО отвечают лимитам ПДК по содержанию ионов тяжелых металлов.

В реагентном хозяйстве приготавливают 20 % - ную суспензию магнетита, используя отработанные травильные растворы и растворы ванн обезжиривания. При нехватке солей железа используют электрокоагулятор насыпного (стружечного) типа.

В развитие описанной технологии У.Т.Темировым была предложена и внедрена очистка СВТО от железа сорбцией его на магнетите, извлечение последнего магнитной сепарацией с последующей доочисткой на магнитном фильтре. Для получения магнетита СВТО, содержащие сернистое железо, обрабатывались хлором дозой 0,07 - 0,08 мг на 1 мг железа (II) с последующей добавкой извести (щелочи). При соотношении железа (II): железо (III) = 1:2 в щелочной среде ( $\text{pH} > 9,5$ ) получается магнетит



Образующиеся кристаллической структуры частицы магнетита должны иметь размеры не менее  $2 \cdot 10^{-3}$  мкм, чтобы обладать ферромагнитными свойствами. Эти частицы являются центрами коагулирования железа (II). Их намагниченность до 90 - 100 гс достигается за 25 - 30 мин при температуре 30 - 40 °С, дальнейшее возрастание температуры практически не оказывает влияние на процесс. Такова же роль и  $\text{pH}$ , однако при  $\text{pH} = 9$  уже наблюдается корреляция между указанными величинами.

Технологическая схема очистки СВТО от железа магнитной сепарацией и фильтрованием на магнитных фильтрах состоит из усреднителя, механической камеры реакции, куда подается суспензия магнетита, ленточного магнитного сепаратора, магнитного фильтра и оборудования для получения и дозирования суспензии магнетита (ферромагнитная заправка). При непрерывном перемешивании мешалкой и поддержании  $\text{pH} = 9,5.. 10$  в камеру реакции вводится суспензия тонкодисперсного магнетита, на поверхности частиц которого сорбируются в течение 10 - 12 мин ионы тяжелых металлов. Образующаяся высококонцентрированная ферромагнитная суспензия затем передается через питатель на

ленточный магнитный сепаратор, который отделяет от воды более 90 % осадка, а оставшийся магнетит подается на магнитный фильтр для полного удаления.

Ленточный магнитный сепаратор имеет непрерывно вращающуюся эластичную резиновую ленту, под верхней частью которой по всей длине установлена система из постоянных магнитов, создающая индукцию поля в 0,2 Тл. Оптимальная напряженность магнитного поля  $15,8 \cdot 10^4$  А/м. Ферромагнитные частицы под действием магнитных сил прижимаются к поверхности транспортирующей ленты и движутся вверх. На желобообразном участке магнитной системы, расположенной выше питателя, происходит обезжелезивание шлама под действием магнитных сил, а отделяемая осветленная вода под действием сил гравитации поступает на нижний двускатный участок магнитной системы. Расположение нижнего двускатного участка ленты с обратным уклоном по отношению к верхнему желобообразному позволяет полностью погасить кинетическую энергию осветляемой воды и избежать ее загрязнения следами осадка, оставшегося на транспортирующей ленте, так как здесь частицы находятся под действием магнитных сил. Осветленная вода с двускатного участка поступает в сборные лотки и далее на магнитные фильтры.

В качестве загрузки магнитных фильтров рекомендуются зерна металлокерамического сплава марки 16 БА крупностью 3 - 7 мм с высотой слоя около 1 м. Индукция магнитного поля составляет порядка 0,15 Тл. При фильтровании обрабатываемой воды со скоростью 50 - 60 м/ч ферромагнитные комплексы задерживаются на поверхности постоянно намагниченных зерен загрузки под действием магнитных сил. Фильтрат практически не содержит частиц магнетита. Промывка фильтра - водовоздушная. Максимальная подача воды 10 - 12 л/(см<sup>2</sup>) и воздуха до 30 л/(с\*м<sup>2</sup>) в течение 10 - 15 мин.

## 28.5. ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЕ ШАХТНЫХ ВОД

Шахтные воды образуются при проходке подземных водоносных горизонтов, из воды, скопившейся в затопленных шахтных выработках, а также попадающей в шахты в процессе добычи полезных ископаемых. Шахтные воды классифицируют на два основных вида: кислые (железосодержащие) и высокоминерализованные. Состав шахтных вод характеризуется зернами угля (руды) и частицами размытых пород, соединениями железа (марганца), присутствием хлоридов и сульфатов, соединениями натрия, калия и кремния. Кислые шахтные воды отличаются не только низкими значениями рН, но и большим содержанием железа, что существенно осложняет их обработку. Образование кислых шахтных вод связано с окислением веществ, содержащих серу (марказит, пирит и др.), а также с жизнедеятельностью тионовых бактерий.

О количестве шахтных вод можно судить по следующим данным: на каждую тонну добытого угля откачивается на поверхность 3 м<sup>3</sup> воды. Сброс в водоемы неочищенных шахтных вод отрицательно действует на почву и растительный покров, загрязняет воду, приводит к необратимым процессам в природе. Особенно большой вред водоемам причиняют кислые железосодержащие шахтные воды, понижая рН, что влечет за собой гибель рыб, пресноводных организмов и сапрофитных микроорганизмов, участвующих в процессах самоочищения воды.

Основой технологии обезжелезивания шахтных вод является окисление железа (II) с последующим образованием гидроксида железа и выделение его при отстаивании или фильтровании. В зависимости от качества шахтной воды и требований к ее обработке может быть использована одна из следующих технологических схем: 1) аэрирование на ступенчатом аэраторе и отстаивание в горизонтальном отстойнике; 2) известкование, аэрирование на ступенчатом аэраторе и отстаивание в отстойнике; 3) смешивание с известью в вертикальном смесителе, флокулирование ПАА в вихревой камере хлопьеобразования и отстаивание в радиальном отстойнике; 4) известкование, аэрирование эжектированием, фильтрование через конические сетки, грубое осветление в песколовках, хлопьеобразование

в перегородчатых камерах, осветление в наклонных отстойниках, фильтрование на скорых фильтрах и обеззараживание (вариант); 5) известкование, аэрирование эжектированием, фильтрование через конические сетки, предварительное осветление в песколовках, электрокоагулирование (вариант), осветление в наклонных отстойниках, фильтрование на скорых фильтрах, бактерицидное облучение.

При обезжелезивании слабощелочных шахтных вод, содержащих двууглекислородное железо, а также кислых вод, содержащих сернокислородное железо, целесообразно применять соответственно **первую и вторую схемы**. Одним из основных сооружений указанных схем является ступенчатый аэратор, размещаемый над распределительным канатом отстойника. Аэратор представляет собой систему насадок из реек с зазором 2 - 3 мм, располагаемых по высоте друг над другом на 0,4 м. Постоянный обмен воздуха в объеме аэратора обеспечивается благодаря незначительной его ширине (0,4 - 0,8 м). При содержании железа (II) до 52 мг/л следует применять пять насадок, при большом количестве исходного железа нужно либо увеличить число насадок, либо предусмотреть повторную аэрацию или барботаж.

**Третья технологическая схема** предназначается для очистки кислых железосодержащих шахтных вод перед сбросом их в водоем и обеспечивает повышение рН до 6,6 - 8,5 и снижение содержания железа до 0,5 мг/л. Шахтные воды подают в приемный резервуар - усреднитель, затем разделяют на два равных потока и передают в двухсекционный смеситель, где смешивают с известковым молоком, доводя рН после первой секции до 3,8 - 6, а после второй - до 9,5 - 12. Из смесителя нейтрализованную воду направляют в камеру хлопьеобразования, перед которой оба потока смешивают, и в воду вводят раствор ПАА, затем вода подается в отстойник, откуда отводится в резервуар технической воды, а осадок идет на уплотнитель.

**Четвертая технологическая схема** предусматривает обезжелезивание также кислых шахтных вод с большим содержанием механических примесей перед сбросом их в местную гидрографическую сеть, снизив содержание взвешенных веществ до 15 мг/л и железа до 0,5 мг/л, а при наличии фильтров и установок обеззараживания воды - до лимитов ГОСТ 2874 - 82. Расход эжектируемого воздуха составляет 50 л на 1 м<sup>3</sup> воды. Для перевода железа (II) в оксидное и образования хлопьев гидроксида предусмотрены камеры хлопьеобразования, рассчитываемые на 30-минутное пребывание воды. Особенностью схемы является применение водоочистных аппаратов (песколовки, отстойники, фильтры и др.) заводского изготовления.

Песколовки ДонУГИ предназначены для предварительной очистки шахтных вод от плавающих грубодисперсных примесей. В их состав входят: фильтр предварительной очистки - объемная коническая самопромывающаяся сетка с отверстиями 1 мм; камера осветления с наклонными под углом 60° ячейками шириной 1 м, высотой 20 мм и длиной 1,2 м, в которых формируется ламинарный поток; камера накопления и уплотнения осадка и коллектор для сбора и отведения осветленной воды. В песколовке задерживаются примеси крупностью до 60 - 30 мкм. Производительность аппарата 300 м<sup>3</sup>/ч, допустимое давление 0,29 МПа, рабочая площадь по сечению потока 1 м<sup>2</sup>.

Тонкослойные отстойники ДонУГИ предназначены для очистки шахтных вод от механических примесей с гидравлической крупностью до 0,1 мм/с и соединений железа с применением реагентов или без них. Они состоят из камеры осветления, где размещены наклонные под углом 60° ячейки высотой 20 мм, длиной 1,7 м и шириной 0,75 м, обеспечивающие ламинарную структуру потока, и камеры накопления и уплотнения осадка. Отстойники выпускают двух производительное - той - 60 и 100 м<sup>3</sup>/ч, рабочей площадью по сечению потока соответственно 2,4 и 4,8 м<sup>2</sup>.

**Пятая технологическая схема** (автоматизированная) производительностью 150 м<sup>3</sup>/ч предназначена для обработки кислых железосодержащих шахтных вод с целью доведения их до питьевого качества. Помимо описанных аппаратов в рассматриваемой схеме предусматриваются бактерицидные установки ОВ - АКХ - 1 и электрокоагуляторы

проточного типа производительностью до 50 м<sup>3</sup>/ч с 60 алюминиевыми электродами толщиной 2 мм и общей площадью 168 м<sup>2</sup>, сгруппированными в шесть пакетов, При прохождении воды в течение 10 мин в межэлектродном пространстве шириной 5 мм должна обеспечиваться плотность тока 1 А/м<sup>2</sup> при напряжении на электродах 3 - 5 В. Ванна электрокоагулятора размером 3,71x1,51x5,4 м одновременно является камерой хлопьеобразования.

В комплект установки входят пять осветлительных фильтров типа ХВ - 044 - 2, выпускаемых Бийским котельным заводом и - работающих под давлением 0,49 МПа при скорости фильтрования до 30 м/ч. Фильтрующая загрузка имеет крупность 0.8 - 2 мм; высота ее 1,3 - 1,5 м. Одновременно работают три фильтра, один промывают и один в резерве.

## Глава 29. ДЕМАНГАНАЦИЯ ВОДЫ

Диаграмма Пурбе  $E = f(\text{pH})$  дает наглядное представление о возможных способах очистки воды от марганца (см. рис. 7.48,б): увеличением окислительно-восстановительного потенциала среды путем применения сильных окислителей без корректирования значения  $\text{pH}$  воды; повышением значения  $\text{pH}$  воды при недостаточном окислительно-восстановительном потенциале в случае использования слабых окислителей; совместным применением более сильного окислителя и повышением значения  $\text{pH}$  воды.

Многие из них основаны на окислении присутствующего в воде иона марганца (II) до марганца (III) и марганца (IV), образующих гидроксиды, растворимость которых при  $\text{pH} > 7$  меньше 0,01 мг/л. Для этого применяют различные окислители: перманганат калия, озон, хлор и его производные, кислород воздуха. Кроме того, удаление марганца из воды может быть достигнуто с помощью ионного обмена (водород - или натрий - катионированием), при умягчении известково-содовым методом, при фильтровании воды через загрузку из марганцевого цеолита, биохимическими и другими методами.

Известные в технологии улучшения качества воды методы ее деманганации можно классифицировать на безреагентные и реагентные; на окислительные, сорбционные, ионообменные и биохимические. К числу безреагентных методов удаления марганца из воды следует отнести: глубокую аэрацию с последующим отстаиванием (вариант) и фильтрованием на скорых осветлительных фильтрах с сорбцией марганца на свежееобразованном гидроксиде железа, метод «Виредокс».

К числу реагентных методов деманганации воды прежде всего относятся окислительные с использованием хлора и его производных, озона, перманганата калия, технического кислорода. К ним относятся и методы, предусматривающие использование щелочных реагентов.

Для окисления марганца (II) в диоксид марганца должен поддерживаться определенный окислительно-восстановительный потенциал, значение которого зависит от требуемой в данном конкретном случае концентрации остаточного марганца и  $\text{pH}$  среды.

*Удаление марганца методом глубокой аэрации с последующим фильтрованием* предусматривает первоначальное извлечение из воды под вакуумом свободной углекислоты ( $\text{pH}$  повышается до 8 - 8,5), которое производится в вакуумно-эжекционном аппарате с последующим насыщением обрабатываемой воды кислородом воздуха в его эжекционной части, ее диспергированием до капельного состояния и фильтрование через зернистую загрузку. Технологическая схема состоит из скорых осветлительных фильтров, над зеркалом воды которых размещены напорные вакуумно-эжекционные аппараты. Метод применим при окисляемости исходной воды до 9,5 мг  $\text{O}_2/\text{л}$ . Подобная технология позволяет успешно решать задачи не только деманганации, деферизации, но и дегазации воды.

Необходимым условием рассматриваемого метода деманганации воды является присутствие в ней железа (II), которое при окислении растворенным кислородом образует гидроксид железа (III), адсорбирующий на поверхности марганец (II) и каталитически влияющий на его окисление. Процесс успешно протекает при  $\text{pH}$  аэрированной воды ниже 8,5 и величине  $E < 0,4$  В. Сорбционный характер извлечения марганца подтверждается изотермой адсорбции, построенной по результатам производственного эксперимента, график которой адекватен изотерме Бедеккера - Фрейндлиха.

Производственные эксперименты, выполненные Г.И.Николадзе, А.П.Назаровым, В.Б.Викулиной на пяти артезианских водоисточниках, показатели качества воды которых характеризовались  $\text{pH} = 7,7,4$ , общей жесткостью до 7 мг-экв/л, щелочность 4 - 6 мг-экв/л, окисляемость до 8,1 мг/л  $\text{O}_2$ , сухим остатком 0,5 - 0,76 г/л,  $E = 0,21..0,39$  В, содержанием свободной углекислоты до 6,5 мг/л, содержанием общего железа до 6,3 мг/л, а марганца (II) до 0,76 мг/л, подтвердили целесообразность использования данного метода для получения питьевой воды. Следует отметить, что соотношение концентраций железа (II) и марганца (II) в исходной воде должно быть не менее 7:1.

Результаты проведенных экспериментов позволяют следующим образом объяснить механизм явления. Величина  $\zeta$ -потенциала гидроксида железа равна нулю при  $\text{pH} = 6,7$ , с возрастанием  $\text{pH}$  отрицательная величина  $\zeta$ -потенциала увеличивается. Положительно заряженные ионы железа (II) и марганца (II) сорбируются осадком из соединений железа (III), имеющим отрицательный  $\zeta$ -потенциал при  $\text{pH} > 7$ . Поскольку при повышении значения  $\text{pH}$  отрицательная величина  $\zeta$ -потенциала растет, адсорбция ионов железа (II) и марганца (II) увеличивается.

При фильтровании происходят следующие процессы. Поверхность песка при  $\text{pH} = 7$  имеет малый электрический отрицательный заряд и поэтому обладает слабыми сорбционными свойствами по отношению к ионам марганца (II) и железа (II), имеющими положительный заряд. С ростом  $\text{pH}$  эти свойства усиливаются. При фильтровании через песок сначала происходит адсорбция ионов железа (II) и марганца (II) поверхностью его зерен. Под действием растворенного в воде кислорода ион железа (II) окисляется до железа (III), который, гидролизуясь, образует на поверхности зерен загрузки качественно новый сорбент, состоящий из соединений железа, который и сорбирует ионы марганца (II). Растворенная в воде свободная углекислота также сорбируется этим сорбентом, ухудшая эффект очистки за счет понижения значения  $\text{pH}$ .

Достоинством этого метода очистки является возможность удалять марганец не только из вод, в которых он присутствует совместно с железом, но и из вод, где железо отсутствует, создавая необходимые условия для адсорбции ионов марганца (II) путем добавления в воду железного купороса, одного из самых дешевых реагентов.

*Удаление марганца из подземных вод в пласте* может быть достигнуто при условии достаточно высокого значения  $\text{pH}$ . При введении в подземный поток воды, содержащей растворенный кислород, достигается оксидация железа (II) и марганца (II), их соосаждение и задержание в порах водовмещающих пород. По Р.Л.Енукидзе, на процесс деманганации и деферизации воды по этому методу существенное влияние оказывают железно- и марганец-бактерии. Метод экономичный, относительно простой, однако не всегда обеспечивающий надлежащую глубину деманганации воды. Считается целесообразным его использование при содержании марганца в подземной воде до 1,5 мг/л и высоком  $\text{pH}$ .

Наиболее эффективным и простым технологическим методом удаления марганца из вод поверхностных и подземных источников в настоящее время является обработка их перманганатом калия. Этот метод может быть применен на очистных комплексах любой производительности при любом качестве исходной воды; существенного изменения технологической схемы при этом не происходит. На удаление 1 мг  $\text{Mn}^{2+}$  расходуется 1,88 мг  $\text{KMnO}_4$ .

*Использование катализаторов оксидации марганца* установлено, что предварительно осажденные на поверхности зерен фильтрующей загрузки оксиды марганца оказывают каталитическое влияние на процесс окисления иона марганца (II) растворенным в воде кислородом. При фильтровании аэрированной и подщелаченной (при низких  $\text{pH}$ ) воды, содержащей марганец, через песчаную загрузку по прошествии некоторого времени на поверхности зерен песка образуется слой, состоящий из отрицательно заряженного осадка гидроксида марганца  $\text{Mn(OH)}_4$ , который адсорбирует положительно заряженные ионы марганца (II). Гидролизуясь, эти ионы реагируют с осадком  $\text{Mn(OH)}_4$ , образуя хорошо окисляемый полтораоксид  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  по реакции:



Таким образом, в результате снова образуется гидроксид марганца (IV), который опять участвует в процессе окисления в качестве катализатора. Использование этого свойства оксидов марганца дало возможность применить в практике кондиционирования воды метод

ее фильтрования через песок, зерна которого предварительно покрыты пленкой оксида марганца (так называемый «черный песок»). Для этого обычный кварцевый песок крупностью 0,5 - 1,2 мм обрабатывают последовательно 0,5 % - ным раствором хлорида марганца и перманганата кальция. При использовании такой загрузки фильтров окисление марганца растворенным в воде кислородом воздуха возможно осуществить при значениях pH, значительно меньших, чем обычно ( $\text{pH} > 7,5$ ).

В практике водоподготовки за рубежом в качестве катализатора окисления марганца кислородом воздуха или хлором получили распространение соли меди, медно - никелевые сплавы.

*Деманганация воды перманганатом* калия основана на его способности окислять марганец (II) с образованием малорастворимого осадка марганца



Очень важным аспектом применения перманганата калия для очистки воды от марганца является образование дисперсного осадка оксида марганца  $\text{MnO}_2$ , который, имея большую удельную поверхность порядка  $300 \text{ м}^2/\text{г}$ , является эффективным сорбентом. При обработке воды перманганатом калия снижение привкусов и запахов происходит также вследствие частичной сорбции органических соединений образующимся мелкодисперсным хлопьевидным осадком гидроксида марганца. Кроме того, осадок оксида марганца, как это указывалось выше, обладает каталитическими свойствами по отношению к процессу окисления иона марганца (II) кислородом воздуха.

Применение перманганата калия дает возможность удалить из воды как марганец, так и железо независимо от форм их содержания в воде. В водах с повышенным содержанием органических веществ железо и марганец образуют устойчивые органические соединения (комплексы), медленно и трудно удаляемые при обычной обработке хлором и коагулянтом. Применение перманганата калия, сильного окислителя, позволяет разрушить эти комплексы с дальнейшим окислением ионов марганца (II) и железа (II) - и коагуляцией продуктов окисления. Кроме того, коллоидные частицы гидроксида марганца  $\text{Mn}(\text{OH})_4$  в интервале  $\text{pH} = 5..11$  имеют заряд, противоположный зарядам коллоидов коагулянтов  $\text{Al}(\text{OH})_3$  и  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , поэтому добавление перманганата калия к воде интенсифицирует процесс коагуляции. Таким образом, перманганат калия, оказывая совокупное действие как окислителя, сорбента и вспомогательного средства коагуляции, является высокоэффективным реагентом для очистки воды от целого ряда загрязнений, в том числе и от марганца.

Максимальное снижение концентрации марганца (II) в воде (до 97 %) достигается при обработке воды перманганатом калия дозой 2 мг  $\text{KMnO}_4$  на 1 мг марганца (II) с дальнейшим добавлением коагулянта для удаления продуктов оксидации и взвешенных веществ. Осадочное содержание марганца в воде при этом не превышало 0,1 мг/л, а после фильтрования воды на песчаных фильтрах она практически не содержала ионов марганца (II), одновременно наблюдалось полное удаление железа. Разработана технология применения перманганата калия для удаления марганца, а также привкусов и запахов воды в промышленном производстве. Достоинством этого метода является возможность использования его на уже действующих сооружениях очистки без изменения существующей технологической схемы.

На фильтровальных комплексах очистки воды из поверхностных источников раствор перманганата калия вводится в воду до коагулирования в смеситель или на насосной станции I подъема. При удалении марганца из подземных вод для увеличения фильтроцикла одновременно с раствором  $\text{KMnO}_4$  в обрабатываемую воду рекомендуется вводить активированную кремнекислоту в количестве 3 - 4 мг/л или флокулянт К-4. В этом случае укрупняются хлопья образующихся при оксидации соединений марганца (IV), которые медленнее проникают в фильтрующую загрузку.

*Деманганизация воды фильтрованием через модифицированную загрузку.* Метод фильтрования аэрированной воды через загрузку, обработанную оксидами марганца, имеет недостаток, заключающийся в постоянном измельчении частиц, образующих покрытие зерен загрузки, и проскоке их в фильтрат. Попытки исправить этот недостаток заключались в растворении этих частиц до того, как они обрели способность проскакивать в фильтрат, что усложняет процесс очистки воды. Другим недостатком деманганизации - фильтрованием через «черный песок» является значительный расход перманганата калия. Для исключения указанных недостатков в МГСУ был запатентован метод деманганизации воды фильтрованием через модифицированную загрузку, приготовляемую последовательным пропуском снизу вверх через кварцевый песок растворов железного купороса и перманганата калия, что позволяет достичь экономию последнего. Для закрепления образующейся пленки из гидроксида железа и оксида марганца на зернах фильтрующей загрузки последнюю затем дополнительно обрабатывают тринатрийфосфатом или сульфитом натрия. Обрабатываемая вода фильтруется сверху вниз со скоростью 8 - 10 м/ч. Производственные испытания указанного метода подтвердили его универсальность и высокие технико-экономические показатели.

*Очистка воды от марганца с использованием сильных окислителей.* Скорость окисления ионов марганца (II) хлором, озоном, оксидом хлора зависит от величины рН среды. Хлор - сильный окислитель, однако эффект окисления им марганца может быть достаточно полным при значениях рН = 8.. 8,5, что чаще всего требует подщелачивания воды. На окисление 1 мг  $Mn^{2+}$  в  $Mn^{4+}$  требуется 1,3 мг хлора. Экспериментальные исследования показали, что хлор окисляет марганец (II) при рН = 7 за 60 - 90 мин всего на 50 %. В отсутствие ионов  $Mn^{4+}$  при рН = 8 окисление марганца (II) хлором за 60 - 90 мин завершается полностью, остаточное содержание марганца в воде составляет 0,05 - 0,1 мг/л. Остаточное содержание марганца (II) в воде, подвергнутой хлорированию и фильтрованию, через 60 мин при исходной концентрации марганца 10 мг/л составило: при рН = 9 - 5,0 мг/л; при рН = 9,45 - 1,3 мг/л; при рН = 10 - менее 0,02 мг/л, т.е. эффект окислительного действия хлором был намного ниже эффекта окислительного действия кислородом воздуха в присутствии катализатора. Окисление марганца (II) озоном или оксидом хлора (IV), при рН = 6,5..7,0 завершается в течение 10 - 15 мин, при этом расход озона составляет 1,45, а оксида хлора (IV) - 1,35 мг/мг марганца (II).

Исследования А.И.Назарова показали, что слабый окислитель (кислород) в присутствии более сильного (хлора) активизируется. Это позволило разработать технологию деманганизации воды, сущность которой сводится к глубокой аэрации воды, что влечет за собой повышение рН, обогащение воды кислородом воздуха, окисление железа (II) с образованием гидроксида. Затем в «водяную подушку» фильтра вводится хлор, воздействующий как окислитель и как катализатор окислительного действия растворенного кислорода. В результате в поровом пространстве фильтрующей загрузки формируется гидроксид железа (II). Образующийся оксид марганца (IV) также катализирует процесс окислительного действия марганца (II).

Как показали результаты экспериментов, для осуществления этого метода требуется соблюдение соотношения  $Fe^{2+}/Mn^{2+} \approx 7..10$ . Процесс деманганизации воды зависит от ее температуры, рН, окисляемости, присутствия силикатов, соотношения  $Fe^{2+}/Mn^{2+}$ .

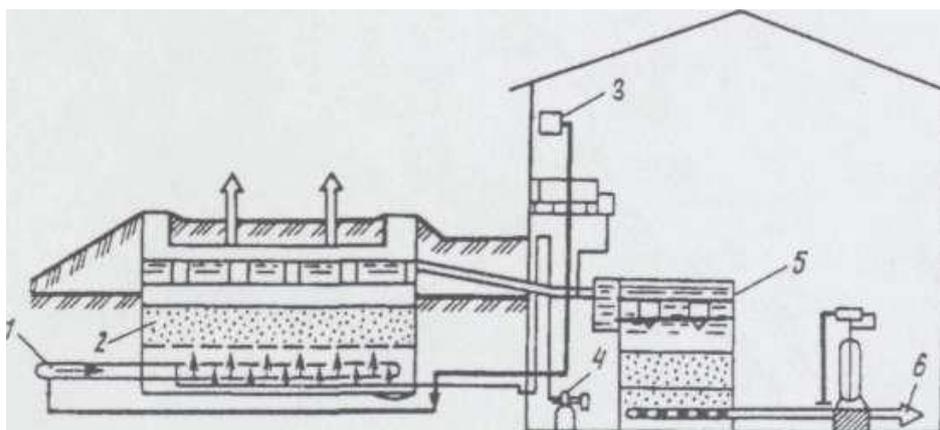
Результаты исследований М.Ульда процессов окислительного действия иона марганца (II) озоном показали, что расход последнего на 1 мг марганца составил: при концентрации марганца 0,4 мг/л - 2 мг и при концентрации 0,8 мг/л - 4 мг. Объяснить этот факт можно каталитическим разложением озона мелкодисперсной агрегативно - устойчивой взвесью оксидов марганца, образующихся в процессе озонирования воды. Удаление взвеси происходит эффективно после коагулирования и фильтрования. Без коагулирования (просто фильтрованием) взвесь удаляется незначительно. Обнаружено, что взвесь оксидов железа, образующаяся в первую очередь, также является катализатором

распада озона. В связи с этим очистку вод, содержащих одновременно большое количество железа (II) и марганца (II), предлагается производить в две стадии: на первой осуществляется оксидация железа (II) и выделение его из воды, на второй - оксидация марганца (II) озоном, коагулирование, отстаивание и фильтрование. Очевидно, что известная громоздкость этой технологической схемы может быть оправдана лишь для водопроводов большой производительности, в основном при заборе воды из поверхностных источников. Несмотря на свою высокую эффективность, озон используют редко из-за высокой стоимости и сложности эксплуатации озонаторных установок.

Оксид хлора  $ClO_2$  также является сильным окислителем, однако использование этого реагента затруднено из-за необходимости применения сложных в строительстве и эксплуатации установок, что особенно невыгодно на сооружениях очистки подземных вод небольшой производительности, которые составляют большинство.

*Удаление марганца (II) и железа (II) из воды методом ионного обмена.* Это происходит как при натрий -, так и при водород - катионировании при фильтровании воды через катионитовую загрузку в ходе умягчения. Метод целесообразно применять при необходимости одновременного глубокого умягчения воды и освобождения ее от железа (II) и марганца (II).

*Биохимический метод удаления марганца* (рис. 7.51). Заключается в высевании на зернах загрузки фильтра марганецпотребляющих бактерий и последующем фильтровании обрабатываемой воды. Эти бактерии поглощают марганец из воды в процессе жизнедеятельности, а отмирая, образуют на зернах песка пористую массу, содержащую большое количество оксида марганца, служащего катализатором



**Рис. 7.51. Установки биохимической деманганации воды**

1, 6 - подача исходной и отвод обработанной воды; 2 - реактор биохимического окисления; 3 - приготовление раствора триполифосфата натрия; 4 - воздушодувка; 5 - скорый фильтр

оксидации марганца (II). При скорости фильтрований до 22 м/ч фильтры полностью удаляют из воды марганец.

Т.П.Пейчевым предложен метод удаления марганца на биофильтрах и скорых обычных фильтрах. Испытывалась артезианская вода с содержанием железа 3,75 - 9,0 мг/л и марганца 0,2 мг/л. Для очистки воды от железа и марганца использовались двухступенчатые биофильтры. Первая ступень предназначалась для удаления железа и состояла из двух слоев керамзита и кварцевого песка: нижнего высотой 0,8 м и крупностью 1 - 2 мм и верхнего высотой 1,05 м и крупностью 1,5 - 2,5 мм. Вторая ступень предназначалась для удаления марганца; ее загрузка состояла из песка крупностью 1,5 - 2,5 мм, высота слоя составила 1,4 м. При скорости фильтрования 16 - 28 м/ч достигалось стабильное снижение содержания железа до 0,1 - 0,2 мг/л, марганца - до 0,02 - 0,05 мг/л. Продолжительность фильтроцикла (до достижения сопротивления 0,08 - 0,1 МПа) составляла 40 - 100 ч в зависимости от скорости фильтрования. Для интенсификации процессов очистки на биофильтры подавался кислород.

Из сказанного следует, что" для демангации подземных вод наибольший интерес представляют метод сорбции на гидроксиде железа (III), фильтрование через модифицированную загрузку и биохимический метод.

## Глава 30. УМЯГЧЕНИЕ ВОДЫ

### 30.1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ, ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УМЯГЧЕНИЯ ВОДЫ

Умягчение воды (УВ) - процесс уменьшения ее жесткости, обусловленный присутствием солей кальция и магния. По ГОСТ 2874 - 82 «Вода питьевая» жесткость воды не должна превышать 7 мг-экв/л. Умягчение воды производят в основном при ее подготовке для технологических нужд. Например, жесткость питательной воды для барабанных котлов не должна превышать 0,005 мг-экв/л. Известны пять основных методов умягчения воды (табл. 7.24), при выборе которых руководствуются качеством исходной воды, требуемой глубиной умягчения и технико-экономическими соображениями.

Наиболее широкое распространение в современной практике получили следующие методы умягчения воды:

термохимический, применяют при подготовке воды для питания котлов; сущность метода заключается в умягчении нагретой до 105 - 165 °С воды известью и содой, фосфатами или едким натрием и содой;

реагентный или метод осаждения, заключается в связывании ионов кальция и магния известью, содой или едким натрием, фосфатами в

Таблица 7.24

Показатель	Методы умягчения воды				
	термический	реагентный	термохимический	ионообменный	диализа
Характеристика процесса	Воду нагревают до температуры выше 100°С, при этом удаляется карбонатная и некарбонатная жесткость (в виде карбоната кальция, гидроксида магния и гипса)	В воду добавляют известь, устраняющую карбонатную и магниевую жесткость, а так же соду, устраняющую некарбонатную жесткость	В нагретую до 105 - 150 °С воду вводят известь и соду, а затем фосфаты для доумягчения воды	Умягчаемая вода пропускается через катионитовые фильтры	Исходная вода фильтруется через полупроницаемую мембрану
Назначение метода	Устранение карбонатной жесткости из воды, употребляемой для питания котлов низкого и среднего давления	Неглубокое умягчение при одновременном осветлении воды от взвешенных веществ	Подготовка глубокого умягчения воды для питания поровых котлов	Глубокое умягчение воды, содержащей незначительное количество взвешенных веществ	Глубокое умягчение воды
Расходы воды на собственные нужды, %	-	Не более 10	Не более 8	До 30 % и более пропорционально жесткости исходной воды	10
Мутность исходной воды, мг/л	До 50	До 5000	Не более 2	Не более 8	До 2,0
Жесткость исходной воды, мг-экв/л	Карбонатная жесткость с преобладанием $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ некарбонатная жесткость в виде гипса	5 - 30	До 30	Не выше 15	До 10,0
Остаточная жесткость воды, мг-экв/л	Карбонатная жесткость до 0,035, $\text{CaSO}_4$ до 0,70	До 0,70	0,02 – 0,03	0,03 – 0,05 при одноступенчатом и до 0,01 при двухступенчатом катионировании	0,01 и ниже
Температура воды, °С	До 270	До 90	До 150	До 30 (глауконит), до 60 (сульфоугли)	До 60

практически нерастворимые карбонат кальция и гидроксид магния, легко извлекаемые осаждением и фильтрованием;

катионитовый, в основе которого лежит обменная адсорбция катионов натрия или водорода (не обуславливающих жесткость воды), которыми заряжен ионообменный материал (катионит), на катионы кальция и магния умягчаемой воды; обмен ионов водорода называют Н-катионированием, а ионов натрия - Na-катионированием;

диализа, основанный на разделении растворенных веществ, отличающихся молекулярными массами и различными скоростями диффузии через полупроницаемую мембрану, разделяющую концентрированный (рассол NaCl) и разбавленный (вода) растворы; ионы натрия из рассола мигрируют в мембрану и далее в умягчаемую воду, а ионы кальция и магния - в противоположном направлении: из умягченной воды в рассол.

В соответствии с рекомендациями СНиПа при умягчении подземных вод следует применять ионообменные методы; при умягчении поверхностных вод, когда одновременно требуется и осветление воды, - известковый или известково-содовый метод, а при глубоком умягчении воды - последующее катионирование.

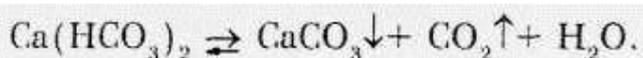
Для получения воды для хозяйственно-питьевых нужд обычно умягчают лишь ее некоторую часть с последующим смешиванием с исходной водой, при этом количество умягчаемой воды  $Q_y$  в процентах определяют по формуле:

$$Q_y = [(Ж_{o.исх} - Ж_{o.c}) / (Ж_{o.исх} - Ж_y)] \cdot 100,$$

где  $Ж_{o.исх}$  — общая жесткость исходной воды, мг-экв/л;  $Ж_{o.c}$  — общая жесткость воды, поступающей в сеть, мг-экв/л;  $Ж_y$  — жесткость умягченной воды, мг-экв/л.

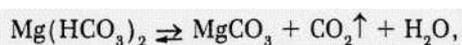
## 30.2. ТЕРМИЧЕСКИЙ МЕТОД УМЯГЧЕНИЯ ВОДЫ

Термический метод умягчения воды целесообразен при использовании карбонатных вод, идущих на питание котлов низкого давления, а также в сочетании с реагентными методами умягчения воды. Он основан на смещении углекислотного равновесия при ее нагревании в сторону образования карбоната кальция, что описывается реакцией

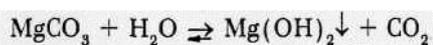


Равновесие смещается за счет понижения растворимости оксида углерода (IV), вызываемого повышением температуры и давления. Кипячением можно полностью удалить оксид углерода (IV) и тем самым значительно снизить карбонатную кальциевую жесткость. Однако полностью устранить указанную жесткость не удастся, поскольку карбонат кальция хотя и незначительно (13 мг/л при температуре 18 °С), но все же растворим в воде.

При наличии в воде гидрокарбоната магния процесс его осаждения происходит

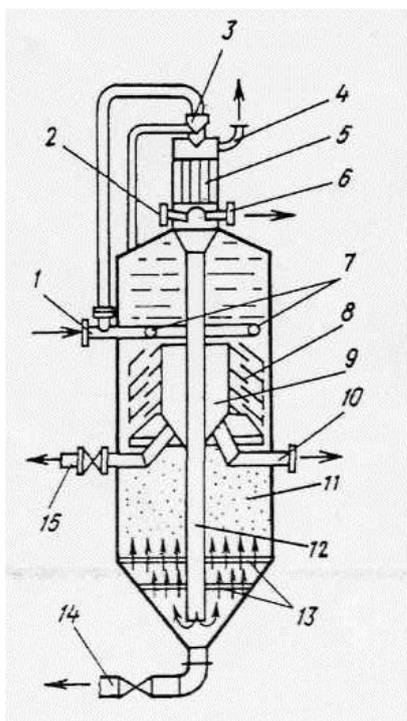


следующим образом: вначале образуется сравнительно хорошо растворимый (110 мг/л при температуре 18 °С) карбонат магния который при продолжительном кипячении гидролизуеться, в результате чего выпадает осадок малорастворимого (8,4 мг/л) гидроксида магния



Следовательно, при кипячении воды жесткость, обуславливаемая гидрокарбонатами кальция и магния, снижается. При кипячении воды снижается также жесткость, определяемая сульфатом кальция, растворимость которого падает до 0,65 г/л.

На рис. 7.52 показан термоумягчитель конструкции Копьева, отличающийся относительной простотой устройства и надежностью работы. Предварительно подогретая в аппарате обрабатываемая вода поступает через эжектор на розетку пленочного подогревателя и разбрызгивается над вертикально размещенными трубами и по ним стекает вниз навстречу горячему пару. Затем совместно с продувочной водой от котлов она по центрально подающей трубе через дырчатое днище поступает в осветлитель со взвешенным осадком. Выделяющиеся при этом из воды углекислота и кислород вместе с избытком пара сбрасываются в атмосферу. Образующиеся в процессе нагревания воды соли кальция и магния задерживаются во взвешенном слое. Пройдя через взвешенный слой, умягченная вода поступает в сборник и отводится за пределы аппарата.



**Рис. 7.52. Термоумягчитель конструкции Копьева**

1, 10 - подача исходной и отвод умягченной воды; 2 - продувка котлов; 3 - эжектор; 4 - выпар; 5 - пленочный смешивающий подогреватель; 6 - выход пара; 7 - кольцевая труба подачи исходной воды к эжектору; 8 - циклонные сепарирующие перегородки; 9 - сборник умягченной воды; 11 - осветлитель со взвешенным слоем осадка; 12 - центральная подающая труба; 13 - ложные днища; 14 - дренаж; 15 - водосток

Время пребывания воды в термоумягчителе составляет 30 - 45 мин, скорость ее восходящего движения во взвешенном слое 7 - 10 м/ч, а в отверстиях ложного дна 0,1 - 0,25 м/с.

Описанная технология рекомендуется для умягчения вод, характеризующихся преобладанием карбонатной жесткости, используемых для подготовки питательной воды для котлов среднего и низкого давлений. Она также служит первой ступенью обработки для некоторых методов умягчения воды.

### 30.3. РЕАГЕНТНОЕ УМЯГЧЕНИЕ ВОДЫ

В практике водоподготовки применяют ряд реагентных методов умягчения воды (табл. 7.25). Реагентное умягчение воды осуществляют без подогрева и с подогревом воды. В последнем случае глубина У.В. резко возрастает.

Использование различных реагентных методов У.В. и их сочетаний определяется качеством исходной воды и требуемой глубиной умягчения. Иногда У.В. сочетают с извлечением из нее других ингредиентов (железа, марганца, кремния, сульфатов).

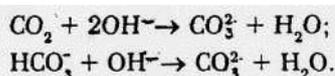
Таблица 7.25

Метод реагентного умягчения	Используемые реагенты
Известковый	CaO или Ca(OH) <sub>2</sub>
Известково-содовый	CaO и Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Едконатриевый	NaOH
Известково-едконатриевый	CaO и NaOH
Содово-едконатриевый	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> и NaOH
Фосфатный (обычно после известково-содового УВ)	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
Бариевый (используется редко из-за дефицитности и дороговизны реагента)	BaCO <sub>3</sub> или Ba(OH) <sub>2</sub>

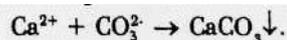
### 30.3.1. Устранение карбонатной жесткости воды известкованием (декарбонизация воды)

Умягчение воды известкованием применяют при ее высокой карбонатной и низкой некарбонатной жесткости, когда требуется одновременное снижение жесткости и щелочности воды. Этот метод получил распространение в сочетании с последующим натрий - катионированием для получения глубоко умягченной воды с небольшой щелочностью.

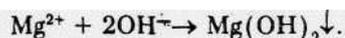
В качестве реагента используют известь, которую вводят в виде раствора или суспензии (молока) в предварительно подогретую обрабатываемую воду. Растворяясь, известь обогащает воду ионами OH<sup>-</sup> и Ca<sup>2+</sup>, что приводит к связыванию растворенного в воде свободного оксида углерода (IV) с образованием карбонатных ионов и переходу гидрокарбонатных ионов в карбонатные:



Повышение в обрабатываемой воде концентрации ионов CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> и присутствие в ней ионов Ca<sup>2+</sup> с учетом введенных с известью приводит к повышению произведения растворимости и осаждению малорастворимого карбоната кальция



При избытке извести в осадок выпадает и гидроксид магния:



Для ускорения удаления дисперсных и коллоидных примесей и снижения щелочности воды одновременно с известкованием применяют коагуляцию этих примесей сульфатом железа (II) FeSO<sub>4</sub> 7H<sub>2</sub>O, так как при pH > 9 гидроксид алюминия будет пептизировать. Остаточная жесткость умягченной воды при декарбонизации может быть получена на 0,4 - 0,8 мг-экв/л больше некарбонатной жесткости, а щелочность 0,8 - 1,2 мг-экв/л.

Доза извести D<sub>и</sub> определяется соотношением концентрации в воде ионов кальция и карбонатов жесткости:

$$\begin{aligned} &\text{при соотношении } (\text{Ca}^{2+})/20 < \mathcal{J}_k \\ D_n &= 28 [(\text{CO}_2)/22 + 2\mathcal{J}_k - (\text{Ca}^{2+})/20 + D_n/e_k + 0,5]; \\ &\text{при соотношении } (\text{Ca}^{2+})/20 > \mathcal{J}_k \\ D_n &= 28 [(\text{CO}_2)/22 + \mathcal{J}_k + D_n/e_k + 0,3], \end{aligned}$$

где  $(\text{CO}_2)$  - концентрация в воде свободного оксида углерода (IV), мг/л;  $(\text{Ca}^{2+})$  - концентрация ионов кальция, мг/л;  $\mathcal{J}$  - карбонатная жесткость воды, мг-экв/л;  $D_m$  - доза коагулянта ( $\text{FeSO}_4$  или  $\text{FeCl}_3$  в пересчете на безводные продукты), мг/л;  $e$  - эквивалентная масса активного вещества коагулянта, мг/ мг-экв (для  $\text{FeSO}_4$   $e_{\text{ж}} = 76$ , для  $\text{FeCl}_3$   $e_{\text{ц}} = 54$ ); 0,5 и 0,3 - избыток извести для обеспечения большей полноты реакции, мг-экв/л.

При известково-содовом методе умягчения воды образующиеся карбонат кальция и гидроксид магния могут пересыщать растворы и долго оставаться в коллоидно - дисперсном состоянии. Их переход в грубодисперсный шлам длителен, особенно при низких температурах и наличии в воде органических примесей, которые действуют как защитные коллоиды. При большом их количестве жесткость воды при реагентном умягчении может снижаться всего на 15 - 20 %. В подобных случаях перед умягчением или в процессе его из воды удаляют органические примеси окислителями и коагулянтами. При известково-содовом методе часто процесс проводят в две стадии. Первоначально из воды удаляют органические примеси и значительную часть карбонатной жесткости, используя соли алюминия или железа с известью, проводя процесс при оптимальных условиях коагуляции. После этого вводят соду и остальную часть извести и доумягчают воду. При удалении органических примесей одновременно с умягчением воды в качестве коагулянтов применяют только соли железа, поскольку при высоком значении рН воды, необходимом для удаления магниевой жесткости, соли алюминия не образуют сорбционно-активного гидроксида. Дозу коагулянта при отсутствии экспериментальных данных рассчитывают по формуле (7.57). Количество взвеси определяют по формуле

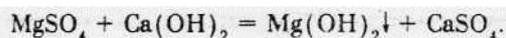
$$C = M_{\text{исх}} + 50 (\mathcal{J}_o + \mathcal{J}_k + \frac{(\text{CO}_2)}{22} + 0,5) + 29 \frac{(\text{Mg}^{2+})}{12} + D_n \left( \frac{100 - m}{100} \right),$$

где  $\mathcal{J}_o$  - общая жесткость воды, мг-экв/л.

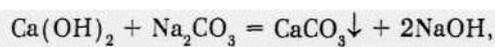
Более глубокое умягчение воды может быть достигнуто ее подогревом, добавлением избытка реагента - окислителя и созданием контакта умягчаемой воды с ранее образовавшимися осадками. При подогреве воды уменьшается растворимость  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  и более полно протекает реакция умягчения.

Остаточная жесткость, близкая к теоретически возможной, может быть получена только при подогреве воды. Значительный эффект умягчения наблюдается при 35 - 40°C, дальнейший подогрев менее эффективен. Глубокое умягчение ведут при температуре выше 100°C.

Большой избыток реагента-осадителя при декарбонизации добавлять не рекомендуется, так как возрастает остаточная жесткость из-за непрореагировавшей извести или при наличии в воде магниевой некарбонатной жесткости вследствие ее перехода в кальциевую жесткость



Поэтому рекомендуется принимать избыток извести не более 0,5 мг-экв/л. При известково-содовом методе также не рекомендуется применять большие избытки извести, однако в данном случае они не вызывают увеличение остаточной жесткости, поскольку снимаются содой



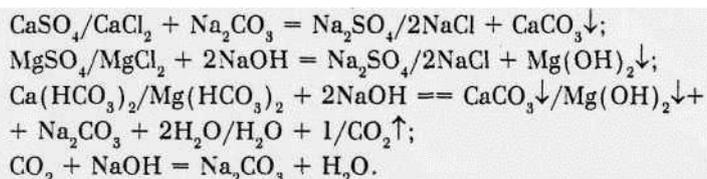
но избыток извести приводит к нерациональному перерасходованию соды, повышению стоимости умягчения воды и увеличению гидратной щелочности. Поэтому избыток соды принимают около 1 мг-экв/л. Жесткость в результате контакта с ранее выпавшим осадком понижается на 0,3 - 0,5 мг-экв/л по сравнению с процессом без контакта с осадком.

Контроль процесса умягчения воды следует осуществлять коррекцией рН умягченной воды. Когда это невозможно, его контролируют по значению гидратной щелочности, которую при декарбонизации поддерживают в пределах 0,1 - 0,2 мг-экв/л, а при известково-содовом умягчении - 0,3 - 0,5 мг-экв/л.

Контакт умягчаемой воды с ранее сформировавшимся осадком оказывает существенное влияние на глубину умягчения, ускорение процесса и ее стабилизацию. Частицы осадка ускоряют кристаллизацию и агломерацию в крупные хлопья образующихся при умягчении воды карбоната кальция и гидроксида магния. Высокий эффект достигается при пропуске умягчаемой воды через слой взвешенного осадка в осветлителях.

### 30.3.3. Содово-едконатрисвый и содово-регенеративный методы умягчения воды

При Содово-натриевом методе умягчения воды ее обрабатывают содой и гидроксидом натрия:



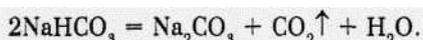
Так как сода образуется при реакции гидроксида натрия с гидрокарбонатом, необходимая для добавки в воду доза ее значительно уменьшается. При высокой концентрации гидрокарбонатов в воде и низкой некарбонатной жесткости избыток соды может оставаться в умягченной воде. Поэтому этот метод применяют лишь с учетом соотношения между карбонатной и некарбонатной жесткостью.

Содово-натриевый метод обычно применяют для умягчения воды, карбонатная жесткость которой немного больше некарбонатной. Если карбонатная жесткость приблизительно равна некарбонатной, соду можно совсем не добавлять, поскольку необходимое ее количество для умягчения такой воды образуется в результате взаимодействия гидрокарбонатов с едким натром. Доза кальцинированной соды увеличивается по мере повышения некарбонатной жесткости воды.

Для подготовки питательной воды для котлов низкого давления применяют содово-регенеративный метод ее умягчения, основанный на возобновлении соды в процессе умягчения:



Гидрокарбонат натрия, попадая в котел с умягченной водой, разлагается под влиянием высокой температуры

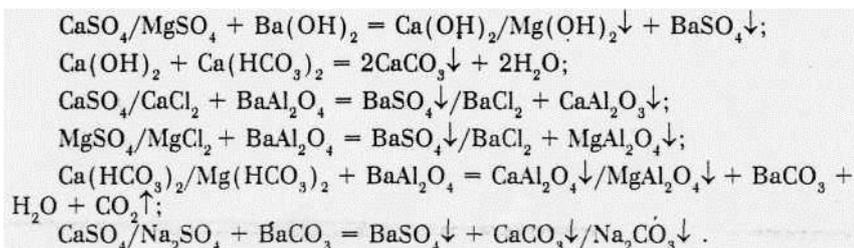


Образующаяся при этом сода вместе с избыточной, введенной вначале в водоумягчитель, тут же в котле гидролизует с образованием гидроксида натрия и оксида углерода (IV), который с продувочной водой поступает в водоумягчитель, где

используется для удаления из умягчаемой воды гадрокарбонатов кальция и магния. Недостаток этого метода состоит в том, что образование значительного количества  $\text{CO}_2$  в процессе умягчения вызывает коррозию металла и повышение сухого остатка в котловой воде.

### 30.3.4. Бариевый метод умягчения воды

Метод основан на использовании карбоната, гидроксида и алюмината бария, ионы которого замещают ионы кальция и магния, образуя плохо растворимые в воде их сульфаты и алюминаты. Обычно бариевый метод У.В. применяют в сочетании с другими методами. Вначале вводят барийсодержащие реагенты в воду для устранения сульфатной жесткости, затем после осветления воды ее обрабатывают известью и содой для умягчения. Химизм процесса описывается реакциями:



Карбонат бария не может быть отдозирован в виде раствора вследствие его малой растворимости, поэтому умягчаемую воду пропускают через слой карбоната бария или эту воду обрабатывают осажденным карбонатом бария. Из-за низкой концентрации карбонатов бария соли кальциевой некарбонатной жесткости осаждаются только в присутствии сульфат-ионов.

Из-за высокой стоимости реагентов бариевый метод применяют очень редко. Для подготовки питьевой воды из-за токсичности бариевых реагентов он непригоден. Образующийся сульфат бария осаждается очень медленно, поэтому необходимы отстойник и осветлитель больших размеров. Для ввода  $\text{BaCO}_3$  следует использовать флокуляторы с механическими мешалками, поскольку  $\text{BaCO}_3$  образует тяжелую, быстро осаждающуюся суспензию.

Необходимые дозы бариевых солей, мг/л, можно найти, пользуясь выражениями: гидроксид бария (продукт 100 % - по активности)

$$D_b = 1,8(\text{SO}_4^{2-});$$

алюминат бария

$$D_b = 128 \text{ Ж}_0;$$

углекислый барий

$$D_b = 2,07 \gamma (\text{SO}_4^{2-}).$$

Углекислый барий применяют с известью. Путем воздействия углекислоты на карбонат бария получают бикарбонат бария, который и дозируют в умягчаемую воду. При этом дозу углекислоты, мг/л, определяют из выражения

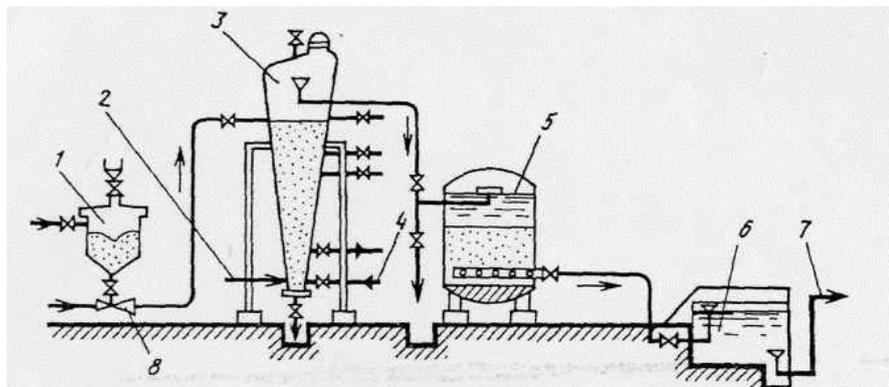
$$D_{\text{CO}_2} = 0,46 [\text{SO}_4^{2-}],$$

где  $[\text{SO}_4^{2-}]$  - содержание сульфатов в умягчаемой воде, мг/л;  $\gamma = 1,15..1,20$  - коэффициент, учитывающий потери углекислого бария.

### 30.3.5. Аппаратное оформление реагентного умягчения воды

В технологии реагентного умягчения воды используют аппаратуру для приготовления и дозирования реагентов, смесители, тонкослойные отстойники или

осветлители, фильтры и установки для стабилизационной обработки воды. Схема напорной водоумягчительной установки представлена на рис. 7.53. В этой установке отсутствует камера хлопьеобразования, поскольку хлопья осадка карбоната кальция формируются в контактной массе. При необходимости воду перед реакторами осветляют.



**Рис. 7.53. Установки умягчения воды с вихревым реактором**

1 - бункер с контактной массой; 2, 7 - подача исходной и отвод умягченной воды; 3 - вихревой реактор (спирактор); 4 - ввод реагентов; 5 - скорый фильтр; 6 - резервуар умягченной воды; 8 - эжектор

Оптимальным сооружением для умягчения воды известковым или известково-содовым методами является вихревой реактор (спирактор напорный или открытый). Реактор представляет собой конический железобетонный или стальной корте, суженный книзу (угол конусности  $15 - 20^\circ$ ) и наполненный примерно до половины высоты контактной массой. Скорость движения воды в нижней узкой части вихревого реактора равна  $0,8 - 1$  м/с; скорость восходящего потока в верхней части на уровне водоотводящих устройств -  $4 - 6$  мм/с. В качестве контактной массы применяют песок или мраморную крошку с размером зерен  $0,2 - 0,3$  мм из расчета  $10$  кг на  $1$  м<sup>3</sup> объема реактора. При винтовом восходящем потоке воды контактная масса взвешивается, песчинки стапливаются друг с другом и на их поверхности интенсивно кристаллизуется  $\text{CaCO}_3$ ; постепенно песчинки превращаются в шарики правильной формы. Гидравлическое сопротивление контактной массы составляет  $0,3$  м на  $1$  м высоты. Когда диаметр шариков увеличивается до  $1,5 - 2$  мм, крупную наиболее тяжелую контактную массу выпускают из нижней части реактора и догружают свежую. Вихревые реакторы не задерживают осадка гидроксида магния, поэтому их следует применять совместно с установленными за ними фильтрами только в тех случаях, когда количество образующегося осадка гидроксида магния соответствует грязеемкости фильтров.

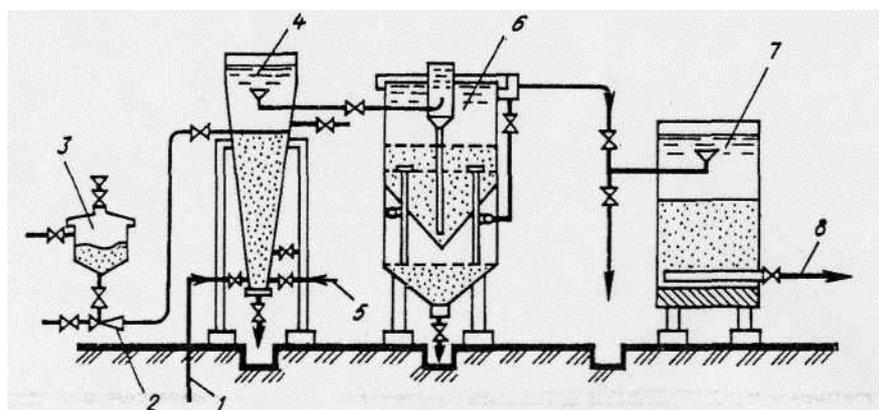
При грязеемкости песчаных фильтров, равной  $1 - 1,5$  кг/м<sup>3</sup>, и фильтроцикле  $8$  ч допустимое количество гидроксида магния составляет  $25 - 35$  г/м<sup>3</sup> (содержание магния в исходной воде не должно превышать  $10 - 15$  г/м<sup>3</sup>). Возможно применение вихревых реакторов и при большем содержании гидроксида магния, но при этом после них необходимо устанавливать осветлители для выделения гидроксида магния.

Расход свежей контактной массы, добавляемой с помощью эжектора, определяют по формуле

$$G = 0,045 \text{ Ж}q,$$

где  $C$  - количество добавляемой контактной массы, кг/сут;  
 $\text{Ж}$  - удаляемая в реакторе жесткость воды, мг-экв/л;  
 $q$  - производительность установки, м<sup>3</sup>/ч.

В технологических схемах реагентного умягчения воды с осветлителями вместо вихревых реакторов применяют вертикальные смесители (рис. 7.54). В осветлителях следует поддерживать постоянную температуру, не допуская колебаний более 1 °С в течение часа, поскольку возникают конвекционные токи, взмучивание осадка и его вынос. Подобную технологию применяют для умягчения мутных вод, содержащих большое количество солей магния. В этом случае смесители загружают контактной массой. При использовании осветлителей конструкции Е.Ф.Кургаева, смесители и камеры хлопьеобразования не предусматривают, поскольку смешение реагентов с водой и формирование хлопьев осадка происходят в самих осветлителях. Значительная высота при небольшом объеме осадкоуплотнителей позволяет применять их для умягчения воды без подогрева, а также при обескремнивании воды каустическим магнезитом. Распределение исходной воды соплами обуславливает ее вращательное движение в нижней части аппарата, что повышает устойчивость взвешенного слоя при колебаниях температуры и подачи воды. Смешанная с реагентами вода проходит горизонтальную и вертикальную смесительные перегородки и поступает в зону сорбционной сепарации и регулирования структуры осадка, что достигается изменением условий отбора осадка по высоте взвешенного слоя, создавая предпосылки для получения его оптимальной структуры, улучшающей эффект умягчения и осветления воды. Проектируют осветлители так же, как и для обычного осветления воды.



**Рис. 7.54. Установка известково-содового умягчения воды с осветлителями**

1, 8 - подача исходной и отвод умягченной воды; 2 - эжектор; 3 - бункер для контактной массы; 4 - вихревой реактор; 5 - ввод реагентов; 6 - осветлитель со взвешенным осадком; 7 - скорый фильтр

При расходах умягчаемой воды до 1000 м<sup>3</sup>/сут может быть применена водоочистная установка типа «Струя». Обрабатываемая вода с добавленными к ней реагентами поступает в тонкослойный отстойник, затем на фильтр.

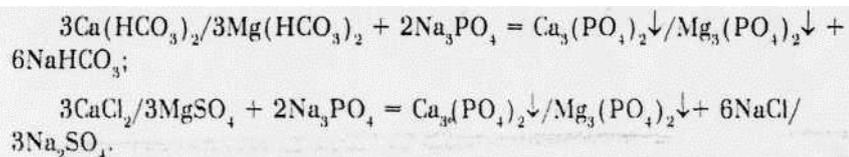
#### **30.4. ТЕРМОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД УМЯГЧЕНИЯ ВОДЫ**

Термохимическое умягчение применяют исключительно при подготовке воды для паровых котлов, так как в этом случае наиболее рационально используется теплота, затраченная на подогрев воды. Этим методом умягчение воды производят обычно при ее температуре свыше 100 °С. Более интенсивному умягчению воды при ее подогреве способствует образование тяжелых и крупных хлопьев осадка, быстрее его осаждение вследствие снижения вязкости воды при нагревании, сокращается также расход извести, так как свободный оксид углерода (IV) удаляется при подогреве до введения реагентов. Термохимический метод применяют с добавлением коагулянта и

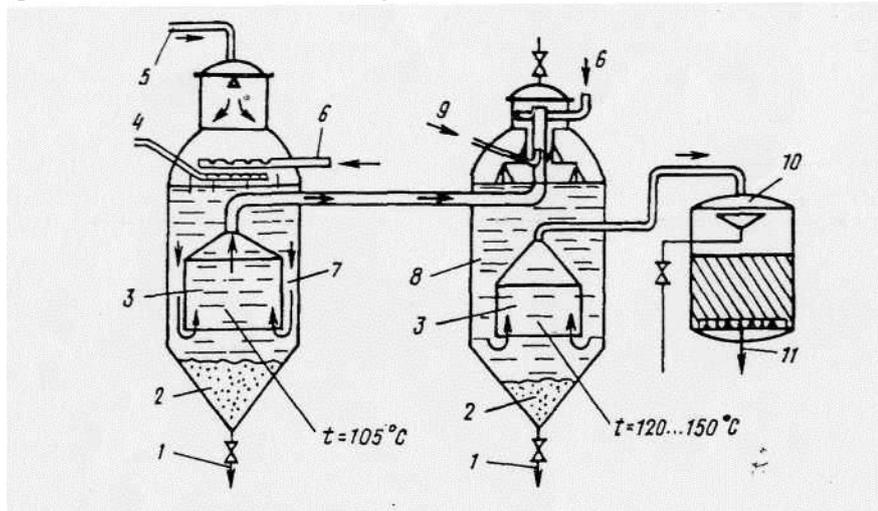
без него, поскольку большая плотность осадка исключает необходимость в его утяжелении при осаждении. Помимо коагулянта используют известь и соду с добавкой фосфатов и реже гидроксид натрия и соду. Применение гидроксида натрия вместо извести несколько упрощает технологию приготовления и дозирования реагента, однако экономически такая замена не оправдана в связи с его высокой стоимостью.

Для обеспечения удаления некарбонатной жесткости воды соду добавляют с избытком. При избытке соды 0,8 мг-экв/л кальциевая жесткость может быть снижена до 0,2, а общая - до 0,23 мг-экв/л. При дальнейшем добавлении соды жесткость еще более понижается. Остаточное содержание магния в воде может быть снижено до 0,05 - 0,1 мг-экв/л при избытке извести (гидратной щелочности) 0,1 мг-экв/л.

Фосфатный метод доумягчения воды (рис. 7.55) как самостоятельный не применяют в связи с высокой стоимостью реагентов. Фосфаты используют для доумягчения воды после ее обработки известью и содой. При добавлении к воде три- или динатрийфосфата образуются малорастворимые фосфаты кальция и магния:



Как видно из приведенных реакций, сущность метода заключается в образовании кальциевых и магниевых солей фосфорной кислоты, которые обладают малой растворимостью в воде и поэтому достаточно полно выпадают в осадок.



**Рис. 7.55. Установка термохимического умягчения воды**

1 - сброс шлама из шламонакопителя; 2, 3 - сборник умягченной воды; 4 - ввод извести и соды; 5, 11 - подача исходной и отвод умягченной воды; 6 - подача пара; 7, 8 - термореактор I и II ступени; 9 - ввод тринатрийфосфата; 10 - скорый фильтр

Фосфатное умягчение обычно осуществляют при подогреве воды до 105 - 150 °С, достигая ее умягчения до 0,02 - 0,03 мг-экв/л. Доза безводного тринатрийфосфата, мг/л, для доумягчения может быть определена из выражения

$$D_{\text{ф}} = 54,67 (Ж_{\text{ост}} + 0,18),$$

$Ж$  - остаточная жесткость умягченной воды перед фосфатным доумягчением, мг-экв/л.

Образующиеся при фосфатном умягчении осадки  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  и  $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ , хорошо адсорбируют из умягченной воды органические коллоиды и кремниевую кислоту, что

позволяет считать целесообразным применение этого метода при подготовке воды для питания котлов среднего и высокого давления (588 - 980 МПа).

*Известково - доломитовый метод* используют для одновременного умягчения и обескремнивания воды при температуре 120°C. Этим методом умягчения щелочность воды, обработанной известью или известью и содой (бел избытка), может быть снижена до 0,3 мг-экв/л при остаточной концентрации кальция 1,5 мг-экв/л и до 0,5 мг-экв/л при остаточной концентрации кальция 0,4 мг-экв/л. Исходная вода обрабатывается известково - доломитовым молоком и осветляется в напорном осветлителе. Затем она проходит через напорные антрацитовые и Ка - катионитовые фильтры I и II ступеней.

В осветлителях высоту зоны осветления принимают равной 1,5 м, скорость восходящего потока при известковании - не более 2 мм/с. Время пребывания воды в осветлителе от 0,75 до 1,5 ч в зависимости от вида удаляемого загрязнения. Коагулянт - соли железа (III) рекомендуется добавлять в количестве 0,4 мг-экв/л.

*Метод высокотемпературного умягчения воды* применяют практически для полного ее умягчения. Установки термохимического умягчения воды обычно более компактны. Они состоят из дозаторов реагентов, подогревателей тонкослойных отстойников или осветлителей и фильтров.

Дозы извести  $D$  и соды  $D_c$ , мг/л, при термохимическом умягчении воды

$$D_n = 28 [(HCO_3^-)/61 + (Mg^{2+})/12] 100/C_n \text{ (без избытка);}$$

$$D_c = 53 [Ж_0 - (HCO_3^-)61 + 0,6] 100/C_c \text{ (с избытком 0,6 мг-экв/л)}$$

где  $C_n$ ,  $C_c$  - содержание соответственно CaO и Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, в техническом продукте, %.

### 30.5. УМЯГЧЕНИЕ ВОДЫ КАТИОНИТАМИ

Катионовый метод УВ основан на способности некоторых нерастворимых в воде ионообменников (катионитов) вступать в ионный обмен с растворенными в воде солями, сорбируя из воды их катионы и отдавая в воду эквивалентное количество катионов, которыми катионит насыщается при регенерации. Этот метод водоподготовки называют катионированием.

Катиониты в воде разбухают, увеличиваясь в объеме. Отношение объемов одинаковых масс катионитов в набухом и воздушно - сухом состоянии называют *коэффициентом набухания*. Он выражается отношением насыпных плотностей воздушно - сухого и набухшего ионита.

Ионный состав и степень разбухания частиц ионообменной смолы являются результатом движущихся сил в системе частица - вода. Наряду с небольшой долей энергии, освобождающейся вследствие гидратации функциональных групп, движущие силы возникают в основном из-за разности концентраций между внутренней набухшей частью зерна и окружающей его водой. Вода набухания в частице смолы с мобильными противоионами функциональных групп имеет концентрацию 1,5 - 6 г-экв/л. Следуя за перепадом концентрации, противоионы функциональных групп пытаются покинуть частицу смолы и протолкнуть в нее молекулы воды. Это влечет за собой смещение заряда частицы, что, в свою очередь, приводит к образованию потенциала Доннана на граничной поверхности частицы. Миграция противоионов и набухание смолы прекращаются по достижении условий минимального запаса энергии. Внутри частицы аккумулируются те многоатомные противоионы с небольшим радиусом, которые вступают с функциональными группами в ассоциации с малым запасом энергии. Эта селективность, являющаяся основой процесса, понижается

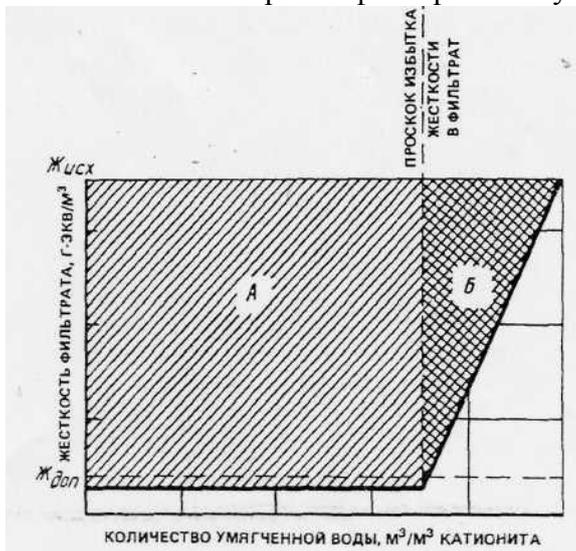
с увеличением концентрации среды и уменьшением степени «сшивания» ионообменника.

Энергия вхождения различных катионов в катионит по величине их динамической активности может быть охарактеризована для одинаковых условий следующим рядом:  $\text{Na}^+ < \text{NH}_4^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Al}^{3+} < \text{Fe}^{3+}$ , т.е. чем больше заряд катионов, тем больше их энергия вхождения в катионит. Для катионов одинаковой валентности энергия вхождения в катионит зависит от их гидратации; что касается энергии вхождения иона водорода в катионит, то она в 17 раз больше, чем у натрия, и в 4 раза больше, чем у кальция.

Основополагающим фактором кинетики процесса является скорость ионообмена между ионами воды и омываемой частицей смолы. Непосредственно на наружной поверхности омываемой частицы образуется неподвижная водяная пленка, толщина которой зависит от скорости потока умягчаемой воды и размеров зерна смолы. Ион  $\text{Ca}^{2+}$  или  $\text{Mg}^{2+}$ , который стремится попасть внутрь частицы смолы в функциональную группу, должен диффундировать из воды через пленку, пройти через граничную поверхность частицы и внутри смолы в растворе набухания устремиться к ассоциации с функциональной группой.

У чистых смол, диффузионные пути которых не загрязнены и не заблокированы, диффузия ионов через пленку является важнейшим этапом процесса. С увеличением скорости потока уменьшается толщина водяной пленки, что облегчает прохождение через нее ионов. Повышение температуры умягчаемой воды влечет уменьшение ее вязкости, что способствует увеличению скорости диффузии и улучшению кинетики ионообмена. Другим важным фактором является отношение объема частицы к ее поверхности. С уменьшением диаметра частицы на каждую функциональную группу приходится большая поверхность обмена.

Скорость обмена катионов зависит от их диффузии к поверхности раздела катионит - вода и определяется структурой катионита. При компактной структуре катионита обмен происходит быстро и в основном на наружных поверхностях - экстрамицеллярный обмен. Однако при этом не полностью используется сорбционная емкость катионита. При пористой структуре катионита, когда размеры капиллярных каналов больше диаметра гидратированных ионов, обмен происходит на внутренних поверхностях - интермицеллярный обмен. Скорость его меньше, а обменная способность катионита больше. Скорости реакции обмена ионов в катионитах до достижения полного равновесия весьма велики. По данным В.А.Клячко, даже в пористых катионитах реакция обмена  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{2+}$  на ионы водорода достигают 90 - 98 % в течение долей минуты, а равновесие устанавливается: за 5 - 6 мин. Поэтому допустимы большие скорости фильтрования умягчаемой воды через катиониты.



**Рис. 7.56. Кинетика работы катионитового фильтра**  
 А и А+Б - рабочая и полная обменная способность катионита

Каждый катионит обладает определенной обменной емкостью (способностью), выражающейся количеством катионов, которые катионит может обменять в течение фильтроцикла. Обменную емкость катионита измеряют в грамм-эквивалентах задержанных катионов на 1 м<sup>3</sup> катионита, находящегося в набухшем состоянии после пребывания в воде, т.е. в таком состоянии, в котором катионит находится в фильтре. Различают полную и рабочую обменную емкость катионита (рис. 7.56). *Полной обменной емкостью* называют то количество катионов кальция и магния, которое может задержать 1 м<sup>3</sup> катионита, находящегося в рабочем состоянии, до того момента, когда жесткость фильтрата сравнивается с жесткостью исходной воды. *Рабочей обменной емкостью* катионита называют то количество катионов Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup>, которое издерживает 1 м<sup>3</sup> катионита до момента «проскока» в фильтрат катионов солей жесткости. Обменную емкость, отнесенную ко всему объему катионита, загруженного в фильтр, называют *емкостью поглощения*.

При пропуске воды сверху вниз через слой катионита происходит ее умягчение, заканчивающееся на некоторой глубине. Слой катионита, умягчающий воду, называют работающим слоем или зоной умягчения. При дальнейшем фильтровании воды верхние слои катионита истощаются и теряют обменную способность. В ионный обмен вступают нижние слои катионита и зона умягчения постепенно опускается. Через некоторое время наблюдаются три зоны: работающего, истощенного и свежего катионита. Жесткость фильтрата будет постоянной до момента совмещения нижней границы зоны умягчения с нижним слоем катионита. В момент совмещения начинается «проскок» катионов, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> и увеличение остаточной жесткости, пока она не станет равной жесткости исходной воды, что свидетельствует о полном истощении катионита. Пренебрегая жесткостью умягченной воды, рабочую обменную емкость фильтра E<sub>р</sub>, г-экв/м<sup>3</sup>, можно выразить уравнениями:

$$E_p = J_n q, E_p = e_p V_k.$$

Объем загруженного в фильтр катионита в набухшем состоянии

$$V_k = a_\phi h_k.$$

Преобразовав это выражение, получим формулу для определения рабочей обменной емкости катионита, г-экв/м<sup>3</sup>

$$e_p = (J_n q) / (a_\phi h_k),$$

где J<sub>и</sub> - жесткость исходной воды, г - экв/м<sup>3</sup>; q - количество умягченной воды, м<sup>3</sup>; a<sub>φ</sub> - площадь катионитового фильтра, м<sup>2</sup>; h<sub>к</sub> - высота слоя катионита, м.

Обозначив скорость фильтрования воды в катионитовом фильтре v<sub>к</sub>, количество умягченной воды можно найти по формуле

$$q = v_k a_\phi T_k = e_p h_k a_\phi / J_n,$$

откуда длительность работы катионитового фильтра (межрегенерационный период) находим по формуле

$$T_k = (e_p h_k) / (J_n v_k).$$

По исчерпанию рабочей обменной способности катионита его подвергают регенерации, т.е. восстановлению обменной емкости истощенного ионообменника путем пропуска раствора кислоты (H-катионирование) или поваренной соли (Na-катионирование).

### 30.5.1. Свойства катионитов

Катиониты классифицируют на органические и минеральные, которые в свою очередь подразделяют на естественного происхождения или приготовленные искусственно.

Минеральные катиониты естественного происхождения характеризуются малой обменной способностью и недостаточной химической стойкостью, что привело к замене их искусственными катионитами. Минеральные катиониты искусственного происхождения приготавливают смешением раствора сульфата алюминия с растворами соды и жидкого стекла.

В технологии подготовки воды широко применяют органические катиониты искусственного происхождения. Они содержат функциональные химически активные группы, водород которых способен замещаться другими катионами: четвертичные амины  $\text{NH}_3\text{OH}$ , сульфогруппы  $\text{HSO}_3^-$ , одновалентную фенольную группу  $\text{OH}\sim$  фосфорную группу  $\text{HPO}_3^-$ , карбоксильную группу  $\text{COOH}$ . Группа  $\text{HSO}_3^-$  обладает сильнокислотными, а группы  $\text{COOH}$  и  $\text{OH}\sim$  слабокислотными свойствами. В зависимости от содержащейся функциональной группы катиониты делят на сильнокислотные и слабокислотные. Сильнокислотные катиониты обменивают катиониты в щелочной, нейтральной и кислой средах, слабокислотные - только в щелочной среде.

Катионит может содержать несколько функциональных групп. Катиониты с однотипными функциональными группами называют монофункциональными, а имеющие несколько функциональных групп - полифункциональными. Если подвижные ионы функциональных групп имеют положительные заряды, ионит обладает катионообменными, а если отрицательные - анионообменными свойствами.

Ионообменные смолы подразделяют на гетеропористые, макропористые и изопористые. Гетеропористые смолы на дивинил бензоловой основе характеризуются гетерогенным характером гелевидной структуры и небольшими размерами пор. Макропористые имеют губчатую структуру и поры свыше молекулярного размера. Изопористые имеют однородную структуру и полностью состоят из смолы, поэтому их обменная способность выше, чем у предыдущих смол.

Качество катионитов характеризуется их физическими свойствами, химической и термической стойкостью, рабочей обменной емкостью и др. Физические свойства катионитов зависят от их фракционного состава, механической прочности и насыпной плотности (набухаемости). *Фракционный (или зерновой) состав* характеризует эксплуатационные свойства катионитов. Он определяется ситовым анализом. При этом учитываются средний размер зерен, степень однородности и количество пылевидных частиц, непригодных к использованию.

Мелкозернистый катионит, обладая более развитой поверхностью, имеет несколько большую обменную емкость, чем крупнозернистый. Однако с уменьшением зерен катионита гидравлическое сопротивление и расход электроэнергии на фильтрование воды увеличивается. Оптимальные размеры зерен катионита, исходя из этих соображений, принимают в пределах 0,3 - 1,5 мм. Рекомендуется применять катиониты (для удобства эксплуатации) с коэффициентом неоднородности  $K_n = 2$  (табл. 7.26).

Таблица 7.26

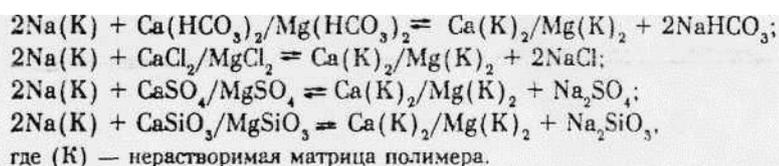
Марка катионита	Активная группа	Насыпная масса продукта, т/м <sup>3</sup>		Размер зерен, мм	Полная обменная емкость, г-экв/м <sup>3</sup>	Стоимость 1 т, руб. (на 1984 г.)
		товарного	набухшего			
Сульфуголь (сорт СК-1 крупный)	$\text{HSO}_3$	0,67-0,70	0,42	0,5-1,2	500	170
КУ-1	$\text{HSO}_3$	0,60-0,75	0,33	0,3-2,0	650	1200
КУ-2-8	$\text{HSO}_3$	-	-	0,35-1,25	1700	22500
КУ-2	$\text{HSO}_3$	0,73	0,65	0,3-1,5	1700	-
КУ-2-8чС	$\text{HSO}_3$	0,7-0,9	0,33	0,4-1,5	1700	6000
КБ-4-П2	$\text{COOH}$	0,68-0,82	0,17-0,33	0,25-1,0	2800	3600
Амберлайт РС-50	$\text{COOH}$	0,50	0,42	0,3-1,0	2800	-
Зеролит 225	$\text{COOH}$	0,64	0,56	0,3-1,0	2000	-

*Механическая прочность, термическая и химическая стойкость* имеют важное значение для установления износа катионитов в процессе эксплуатации и выбора марки катионита. Неправильный выбор катионита может привести к измельчению его при фильтровании и взрыхлении. Кроме того, при высокой температуре обрабатываемой воды и повышенных значениях кислотности или щелочности катиониты способны пептизироваться, т.е. переходить в состояние коллоидного раствора и терять обменную способность.

Рабочая обменная емкость катионита зависит от вида извлекаемых из воды катионов, соотношения солей в умягчаемой воде, значения pH, высоты слоя катионита, скорости фильтрования, режима эксплуатации катионитовых фильтров, удельного расхода регенерирующего реагента и от других факторов.

### 30.5.2. Умягчение воды натрий-катионированием

Натрий - катионитовый метод применяют для умягчения воды с содержанием взвеси не более 8 мг/л и цветностью не более 30 град. Жесткость воды снижается при одноступенчатом натрий - катионирования до 0,05 - 0,1, при двухступенчатом - до 0,01 мг-экв/л. Процесс Na-катионирования описывается следующими реакциями обмена:

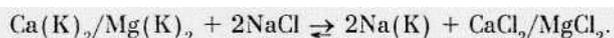


После истощения рабочей обменной емкости катионита он теряет способность умягчать воду и его необходимо регенерировать. Процесс умягчения воды на катионитовых фильтрах складывается из следующих последовательных операций: фильтрование воды через слой катионита до момента достижения предельно допустимой жесткости в фильтрате (скорость фильтрования в пределах 10 - 25 м/ч); взрыхление слоя катионита восходящим потоком умягченной воды, отработанного регенерата или отмывных вод (интенсивность потока 3 - 4 л/(см<sup>2</sup>); спуска водяной подушки во избежание разбавления регенерирующего раствора; регенерации катионита посредством фильтрования соответствующего раствора ( $u = 3.5$  м/ч); отмывки катионита неумягченной водой (скорость фильтрования 8 - 10 м/ч). На регенерацию обычно затрачивают около 2 ч, из них на взрыхление - 10 - 15, на фильтрование регенерирующего раствора - 15 - 30, на отмывку - 30 - 60 мин.

Выбор метода катионирования диктуется требованиями, предъявляемыми к умягченной воде, свойствами исходной воды и технико-экономическими соображениями (табл. 7.27). Наиболее простой является схема одноступенчатой Na-катионитовой установки (рис. 7.57,а). Вода, пройдя Na-катионитовые фильтры, отводится в сборный бак, откуда насосом подается потребителю. При работе по этой схеме отсутствуют вода и растворы с кислой реакцией, необходимость в применении кислотостойкой арматуры труб и защитных покрытий фильтров.

Регенерации Na-катионита достигается фильтрованием через него со скоростью 3 - 4 м/ч хлористого натрия концентрацией 5 - 8 %. При жесткости умягченной воды до 0,2 мг-экв/л принимают концентрацию соли 5 %, при жесткости порядка 0,05 мг-экв/л предусматривают ступенчатую регенерацию: сначала 5 - % - ным раствором NaCl в количестве 1,2 м<sup>3</sup> раствора на 1 м<sup>3</sup> катионита, затем остальным количеством соли в виде 8 % - ного раствора.

Процесс регенерации описывается следующей реакцией:



Поваренную соль применяют для регенерации из-за ее доступности, дешевизны, а также вследствие того, что получают при этом хорошо растворимые соли CaCl<sub>2</sub> и MgCl<sub>2</sub>, легко удаляемые с регенерационным раствором и отмывочной водой.

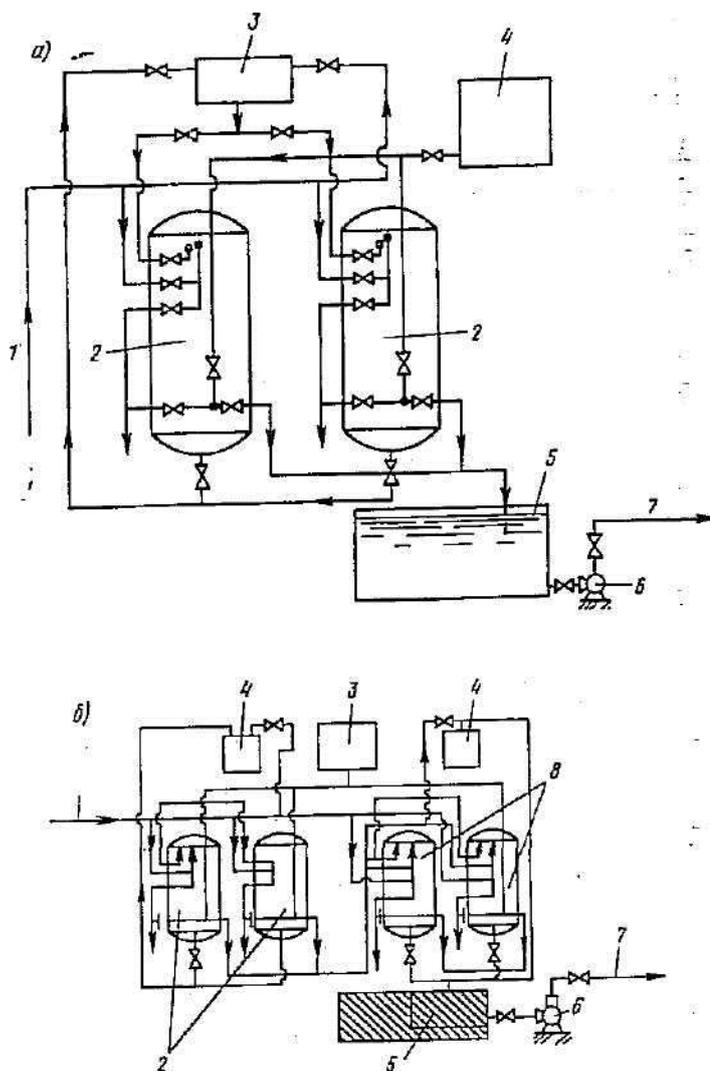
Расход соли  $p$  на одну регенерацию Na-катионитового фильтра первой ступени находят из выражения

$$p = ah_k e_p^{N_{Na}} \alpha / 1000,$$

где  $a$  - площадь фильтра, м<sup>2</sup>;  $h_k$  - высота слоя катионита в фильтре, м;  $e_p^{Na}$  - рабочая обменная емкость катионита при Na-катионировании;  $\alpha$  - удельный расход соли на 1 г экв рабочей обменной емкости катионита (для фильтров I ступени в двухступенчатой схеме  $\alpha$  120/150 г/г-экв, в одноступенчатой  $\alpha$  = 150-200 г/г-экв, удельный расход соли на фильтрах II ступени 300-100 г/г-экв).

Таблица 7.27

Технологическая схема	Качество фильтрата		Условия применения
	$J_{\sigma}$ мг-экв/л	$Ш_{\sigma}$ мг-экв/л	
Одноступенчатое натрий - катионирование	0,1 - 0,2	Равна щелочности исходной воды	Для неглубокого умягчения воды, когда не требуется снижение ее щелочности
Двухступенчатое натрий - катионирование	0,01	То же	Для глубокого умягчения воды, для умягчения воды жесткостью выше 6 мг-экв/л
То же, с промежуточным подкислением и удалением углекислоты	0,01	0,35	-
Водород - катионирование с декарбонизацией и подщелачиванием	0,1 - 0,2	0,35	Для умягчения воды с содержанием до 1 мг-экв/л хлор - иона + сульфат-ионов
Параллельное водород - натрий - катионирование с буферным натрий - катионитовым фильтром II ступени	0,01	0,35	Для глубокого умягчения воды, содержащей до 3 - 5 мг - экв/л хлор - ионов ++ сульфат-ионов и до 2 мг-экв/л натрий ионов
Последовательное водород - натрий - катионирование с бу - ферным натрий - катионитовым фильтром II ступени	0,01	0,7	Для умягчения воды жесткость свыше 6 мг-экв/л с общим солесодержанием более 0,7 г/л карбонатной жесткостью менее 50 %общей жесткости
Последовательное водород - натрий - катионирование с "голодной" регенерацией водород - катионитовых фильтров	0,1	0,7 - 1,5	Для умягчения воды с карбонатной жесткостью свыше 1 мг-экв/л и общим солесодержанием до 1,5 г/л
Совместное, водород - натрий - катионирование с буферным натрий - катионитовым фильтром II ступени	0,1	1 - 1,5	Для умягчения воды с общей жесткостью до 6 мг-экв/л и карбонатной жесткостью свыше 50 % общей жесткости
Известкование - натрий - катионирование	0,1	1 - 1,5 безподогрева; 0,3 с подогревом до 80 - 90 °С	Для умягчения поверхностных вод и без вод с высокой щелочностью
Аммоний - натрий - катионирование	0,1	Равна щелочности исходной воды	Если в фильтрате допустимо наличие ионов аммония



**Рис. 7.57. Схема одноступенчатого (а) и двухступенчатого (б) Na-катионирования**

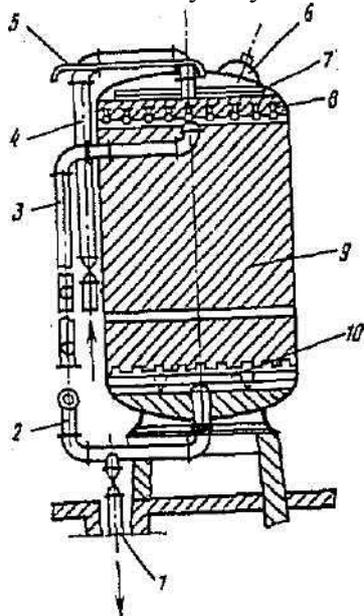
1, 7 – подача исходной и отвод умягченной воды; 2 – Na-катионитовые фильтры I ступени; 3 – бак с раствором поваренной соли; 4 – бак с частично умягченной водой для взрыхления катионита; 5 – бак умягченной воды; 6 – насос; 8 – Na-катионитовые фильтры II ступени

При фильтровании раствора поваренной соли сверху вниз при регенерации полный обмен ионов натрия, находящихся в катионите  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , происходит в верхних слоях ионообменника, при этом в фильтре возрастает концентрация вытесненных из катионита  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  и снижается концентрация ионов натрия. Возрастание концентрации противоионов (в рассматриваемом случае  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ ) в регенерационном растворе подавляет диссоциацию истощенного катионита и ослабляет процесс ионного обмена. Образующийся при этом *противоионный эффект* тормозит регенерацию, в результате чего по мере продвижения регенерационного раствора в нижние слои катионита их регенерация происходит неполно, и некоторое количество катионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  остаются невытесненными из нижних слоев катионита. Устранение этого недостатка возможно пропуском через катионит свежих порций раствора реагента. Однако это увеличивает удельный расход поваренной соли и повышает стоимость обработки воды. На практике ограничиваются однократным пропуском соли при жесткости умягченной воды до 0,2 мг-экв/л или двукратным - при жесткости ниже 0,05 мг-экв/л. По аналогии, при фильтровании умягчаемой воды сверху вниз также возникает противоионный эффект, снижающий глубину умягчения воды, при этом противоионами являются катионы натрия.

Этот недостаток устраняется путем подачи регенерационного раствора и умягчаемой воды в разных направлениях, последняя, фильтруясь снизу вверх при выходе из фильтра, соприкасается с наиболее полно отрегенированными слоями катионита, благодаря чему обеспечивается более глубокое умягчение воды. Такой метод умягчения воды называется методом *противоточного катионирования*. При этом значительно снижается расход реагентов на регенерацию катионита без уменьшения глубины умягчения. На рис. 7.58 показан фильтр противоточного катионирования. Когда необходимо одновременно с умягчением воды понизить ее щелочность, применяют Na-катионирование с предварительным известкованием воды и коагуляцией (рис. 7.59). Известкование и коагулирование производят в установке для реагентного умягчения воды. В ней понижают карбонатную жесткость воды до 1 - 1,5 мг-экв/л и после Na-катионирования щелочность ее снижается до 1,5 мг-экв/л. Подобных результатов достигают, нейтрализуя щелочность фильтрата сорной кислотой после Na - катионирования. Остаточная щелочность воды при этом составляет 0,5 - 1,0 мг-экв/л.

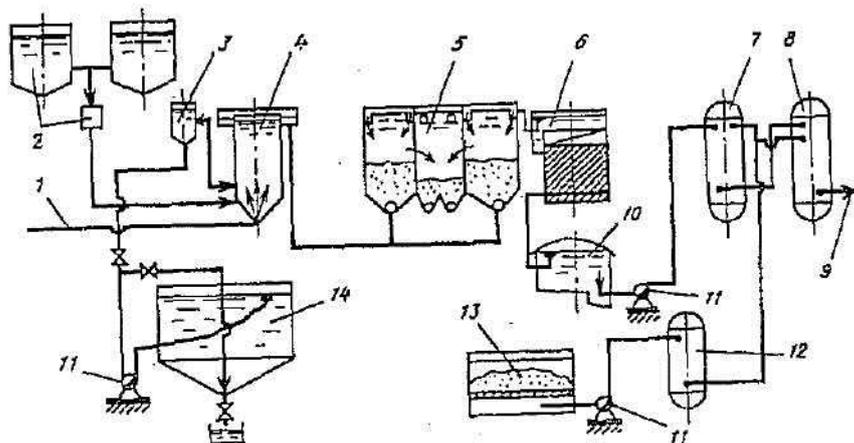
Схема одноступенчатого Na-катионирования имеет недостатки, лимитирующие ее применение: невозможность глубокого умягчения воды (до 0,01 - 0,02 мг-экв/л); высокий удельный расход соли на регенерацию; неполное использование емкости поглощения катионита.

Более глубокого умягчения воды, экономии соли и увеличения фильтроцикла достигают двухступенчатым Na - катионированием (см. рис. 7.57, б).



**Рис. 7.58. Противоточный катионитовый фильтр**

1 - сброс отмывочной воды; 2, 3 - подача исходной и отвод умягченной воды; 4 - подача реагента на регенерацию; 5 - сброс воздуха; 6 - люк; 7 - система распределения реагента; 8 - дренажная колпачковая система; 9 - слой катионита; 10 - распределительная колпачковая система



**Рис. 7.59. Установка известково-натрий-катионитного умягчения воды**

1, 9 – подача исходной и отвод умягченной воды; 2 – аппаратура для коагулирования примесей воды; 3 – дозатор известкового молока; 4 – вихревой реактор; 5 – осветлитель со взвешенным осадком; 6 – скорый фильтр; 7, 8 – Na-катионитовый фильтр I и II ступеней; 10 – промежуточный резервуар; 11 – насос; 12 – фильтр осветления солевого раствора; 13 – бак мокрого хранения поваренной соли; 14 – бак известкового молока с гидравлическим перемешиванием

В этом случае в фильтрах I ступени вода подвергается умягчению до остаточной жесткости 0,1 - 0,2 мг-экв/л при обычной скорости фильтрования 15 - 25 м/ч. Затем умягченная вода передается на Na-катионитовые фильтры II ступени, где жесткость предварительно умягченной воды снижается до 0,02 - 0,01 мг-экв/л. Так как количество солей жесткости, поступающих на фильтры II ступени, незначительно, скорость фильтрования принимают до 40 м/ч, а высоту слоя катионита 1,5 м. Фильтры II ступени создают своего рода барьер, препятствующий проскоку удаляемых катионов при случайных отклонениях в работе фильтров первой ступени. Поэтому Na-катионитовые фильтры второй ступени называют барьерными. При их наличии упрощается эксплуатация установок, поскольку катионитовые фильтры первой ступени отключаются на регенерацию не по проскоку катионитов солей жесткости, требующему тщательного контроля жесткости фильтрата, а по количеству воды, прошедшей через них. Некоторое повышение количества солей жесткости после фильтров первой ступени неопасно, так как гаш будут задержаны барьерными фильтрами. Емкость поглощения на фильтрах и срок их полезной работы при двухступенчатом катионировании увеличиваются. Так как фильтры второй ступени несут небольшую нагрузку по умягчению воды, продолжительность межрегенерационной их работы достигает 200 ч и более.

Катионит после регенерации фильтров первой ступени отмывают неумягченной водой до тех пор, пока содержание хлоридов в фильтрате не станет примерно равным содержанию их в отмывочной воде. Половину отмывочной воды направляют в водостоки, а вторую половину в баки для использования при взрыхлении катионита или для приготовления регенерационного раствора. Удельный расход воды на отмывку принимают равным 4 - 5 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> катионита. Катионит в фильтрах второй ступени отмывают фильтратом первой ступени. Удельный расход соли принимают 300 - 400 г/г-экв задержанных катионов жесткости.

Объем катионита, м<sup>3</sup>, в фильтрах первой ступени

$$V_k = 24qJ_{o.ux.} / (nE_{\rho}^{Na}),$$

где  $q$  - расход умягченной воды, м<sup>3</sup>/ч;  $J_{o.ux.}$  - общая жесткость исходной воды, г-экв/м<sup>3</sup>;  $E_{\rho}^{Na}$  - рабочая обменная емкость катионата при Na-катионировании, г-экв/м<sup>3</sup>;  $n = 1...3$  – число регенераций каждого фильтра в сутки.

Рабочая обменная емкость катионита при Na-катионировании

$$e_{\rho}^{NA} = \alpha_{\delta}^{Na} \beta_{Na} E_n - 0,5q_y J_{o.ux.},$$

где  $\alpha_{\delta}^{Na}$  - коэффициент эффективности регенерации (зависит от удельного расхода соли на регенерацию);  $\beta_{Na}$  - коэффициент, учитывающий снижение обменной емкости катионита по катионам Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> вследствие частичного задержания катионов Na<sup>+</sup>;  $E_n$  - полная обменная емкость катионита, определяемая по паспортным данным;  $q_y$  - 4...6 – удельный расход воды на отмывку катионита, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Площадь катионитовых фильтров первой ступени

$$A_k = V_k / h_k,$$

где  $h_k = 2...3$  – высота слоя катионита в фильтре, м.

Скорость фильтрования воды на катионитовых фильтрах первой ступени принимают в зависимости от жесткости исходной воды:

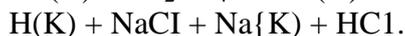
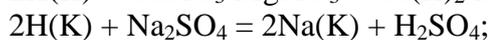
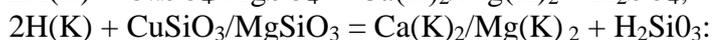
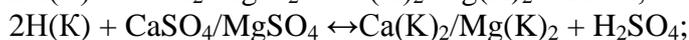
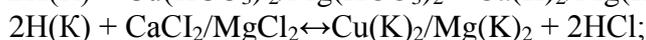
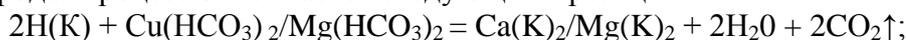
общая жесткость воды, мг-экв/л до	5	5 - 10	10 - 15
скорость фильтрования, м/ч	25	15	10

Допускается кратковременное увеличение скорости фильтрования на 10 м/ч по сравнению с указанными выше значениями при выключении фильтров на регенерацию или ремонт.

Число катионитовых фильтров первой ступени принимают: рабочих - не менее 2, резервных - 1.

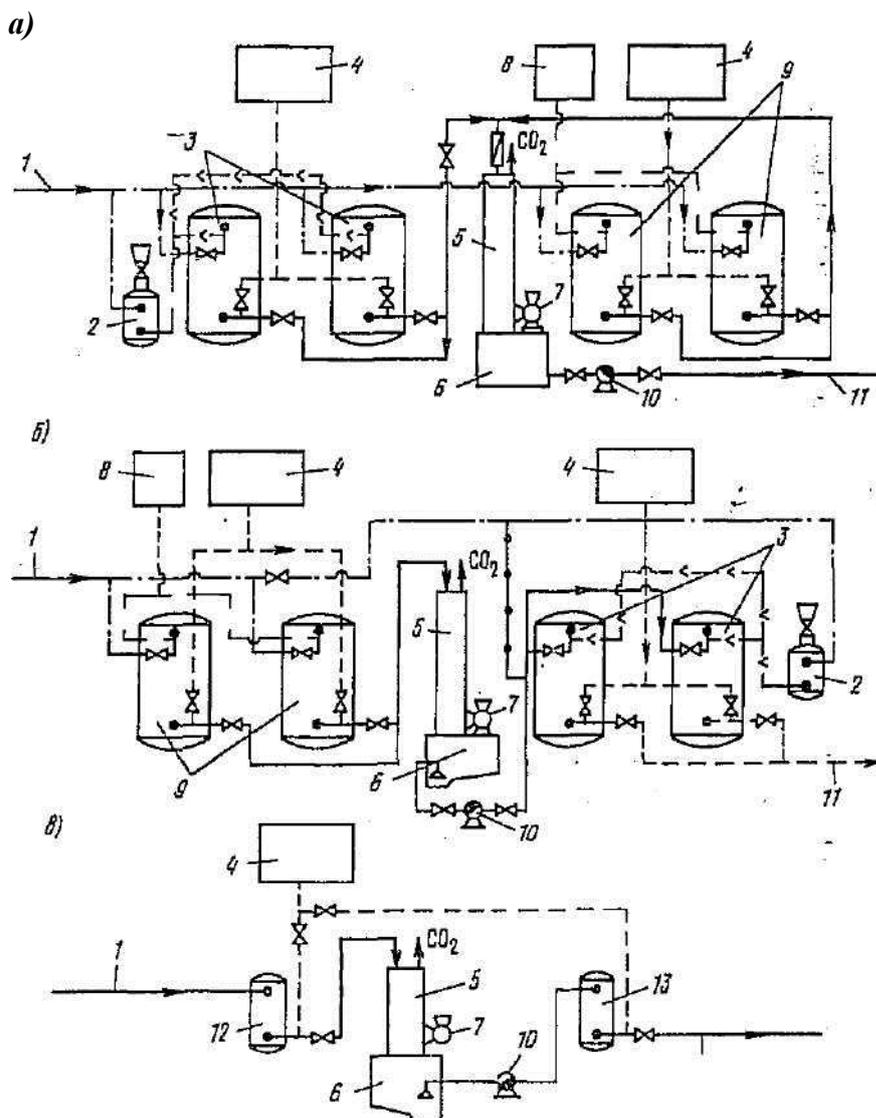
### 30.5.3. Водород-натрий-катионитовое умягчение воды

Обработка воды водород - катионированием (Н-катионированием) основана на фильтровании ее через слой катионита, содержащего в качестве обменных ионов катионы водорода. Процесс описывается следующими реакциями:



При Н-катионировании воды значительно снижается ее рН из-за кислот, образующихся в фильтрате. Выделяющийся при Н-катионировании оксид углерода (IV) можно удалить дегазацией, и в растворе останутся минеральные кислоты в количествах, эквивалентных содержанию сульфатов и хлоридов в исходной воде.

Из приведенных выше реакций для Na-катионитового умягчения воды видно, что щелочность воды в процессе ионного обмена не изменяется. Следовательно, пропорционально смешивая кислый фильтрат после Н-катионитовых фильтров со щелочным фильтратом после Na-катионитовых фильтров, можно получить умягченную воду с различной щелочностью. В этом заключаются сущность и преимущество Н-Na-катионитового метода умягчения воды. Применяют параллельное, последовательное и смешанное (совместное) Н-Na-катионирование.



**Рис. 7.60. Технологические схемы параллельного (а), последовательного (б) и совместного (в) водород-натрий-катионирования воды**  
 1, 11 - подача исходной и отвод умягченной воды; 2 - солерастворитель; 3 - натрий - катионитовые фильтры; 4 - бак для взрыхления; 5 - декарбонизатор; 6 - резервуар; 7 - вентилятор; 8 - бак раствора кислоты; 9 - водород - катионитовые фильтры; 10 - насос; 12 - водород - натрий - катионитовый фильтр; 13 - буферный натрий - катионитовый фильтр

При параллельном  $H - Na$  - катионировании (рис. 7.60,а) одна часть воды пропускается через  $Na$ -катионитовые фильтры, другая - через  $H$ -катионитовые фильтры, а затем оба потока смешивают. Образующиеся щелочные и кислые воды смешивают в такой пропорции, чтобы их остаточная щелочность не превышала 0,4 мг-экв/л. Для получения устойчивого и глубокого умягчения (до 0,01 мг-экв/л) воду после дегазатора пропускают через барьерный  $Na$ -катионитовый фильтр. Схему параллельного  $H$ - $Na$ -катионирования целесообразно применять в тех случаях, когда суммарная концентрация сульфатов и хлоридов в умягчаемой воде не превышает 4 мг-экв/л и содержание натрия не более 2 мг-экв/л.

При последовательном  $H$ - $Na$ -катионировании (рис. 7.60,б) часть воды пропускается через  $H$ -катионитовые фильтры, затем смешивают с остальной водой; полученную смесь пропускают через дегазатор для удаления оксида углерода (IV), а затем всю воду подают на  $Na$ -катионитовые фильтры. Количество воды, подаваемое на  $H$ -катионирование, определяют, как и при параллельном  $H$ - $Na$ -катионировании. Подобная схема позволяет более полно использовать обменную емкость  $H$ -катионита и снизить расход кислоты на

его регенерацию, поскольку отключение Н-катионитовых фильтров в данном случае диктуется не проскоком катионов жесткости порядка 0,5 мг-экв/л, а допуском их содержанием - 1,0 мг-экв/л. При повышенных требованиях к умягчению воды схема дополняется барьерными Na-катионитовыми фильтрами. К недостатку схемы следует отнести большой расход электроэнергии, затрачиваемой на передачу воды через последовательно включенные фильтры. Схему последовательно Н-Na-катионирования применяют при умягчении воды с повышенной жесткостью и содержанием солей; остаточная щелочность при этом составляет примерно 0,7 мг-экв/л.

Известна схема последовательного Н-Na-катионирования воды при «голодном» режиме регенерации Н-катионитовых фильтров. В этом случае весь поток умягчаемой воды последовательно проходит через Н-катионитовые фильтры, регенерируемые стехиометрическим количеством кислоты, затем через дегазаторы для удаления оксида углерода (IV) и далее одну или две ступени Na-катионитовых фильтров. Стехиометрический расчет режима регенерации Н-катионита позволяет устранить из воды лишь карбонатную жесткость, некарбонатная жесткость удаляется при Na-катионировании. По этой схеме отсутствуют кислые стоки и можно получить глубоко умягченную воду с остаточной щелочностью  $Щ_0 < 0,7$  мг-экв/л. Эту схему используют для умягчения вод, содержащих до 3 г/л солей при различных концентрациях натрия, но карбонатная жесткость должна быть не менее 1 мг-экв/л.

*Совместное Н-Na-катионирование* (рис. 7.60,в) осуществляют в одном фильтре, верхним слоем загрузки которого является Н-катионит, а нижним - Na-катионит. Катионит регенерируют следующим образом. После взрыхления слоя его обрабатывают сначала раствором кислоты, затем раствором поваренной соли с последующей отмывкой. При совместном Н-Na-катионировании остаточная щелочность воды составляет 1,5 - 2,0 мг-экв/л, а жесткость 0,1 - 0,3 мг-экв/л. Жесткость исходной воды должна составлять не более 6 мг-экв/л, содержание натрия до 1 - 1,5 мг-экв/л, отношение карбонатной жесткости к некарбонатной должно быть больше единицы. Достоинством данной схемы является отсутствие кислых стоков, недостатком - сложность регенерации.

Расход воды  $q_{II}^{Na}$ , подаваемой на Na-катионитовые фильтры, и  $q_{II}^H$ , подаваемый на Н-катионитовые, определяют по формулам:

$$q_{II}^{Na} = q_{II} - q_{II}^H;$$

$$q_{II}^H = q_{II} (Щ - Щ_y) / (A_1 + Щ),$$

где  $q_{II}$  - полезная производительность Н - Na-катионитовой установки, м<sup>3</sup>/ч;  $q_{II}^{Na}$  и  $q_{II}^H$  - полезная производительность Na - Н-катионитовых фильтров, м<sup>3</sup>/ч;  $Щ_y$  - требуемая щелочность умягченной воды, мг-экв/л;  $Щ$  - щелочность исходной воды, мг-экв/л;  $A_1$  - суммарное содержание в умягченной воде анионов сильных кислот, мг-экв/л.

Объем катионита  $V_H$ , м<sup>3</sup>, в Н-катионитовых и  $V_{Na}$ , м<sup>3</sup>, в Na-катионитовых фильтрах определяют по формулам:

$$V_H = 24q_{II}^H (Ж_0 + C_{Na}) n e_p^H;$$

$$V_{Na} = 24q_{II}^{Na} Ж_0 / n e_p^{Na},$$

где  $Ж_0$  - общая жесткость умягченной воды, г-экв/м<sup>3</sup>;  $C_{Na}$  - концентрация в воде натрия, г-экв/м<sup>3</sup>;  $n = 1..3$  - число регенераций каждого фильтра в сутки;  $e_p^{Na}$  и  $e_p^H$  - рабочая обменная емкость Na - Н-катионита, г-экв/м<sup>3</sup>.

Рабочая обменная емкость, г-экв/м<sup>3</sup>, Н-катионита

$$e_p^H = \alpha_3 E_{II} - 0,5q_y C_k,$$

где  $\alpha_3$  - коэффициент эффективности регенерации Н-катионита, зависящий от удельного расхода кислоты;  $E_{II}$  - полная обменная емкость катионита (паспортная) в

нейтральной среде;  $q_y$  - удельный расход воды на отмывку катионита после регенерации, принимаемый 4 - 5 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> объема катионита в фильтре;  $C_k$  - общее содержание в воде катионов кальция, магния, натрия и калия, г-экв/м<sup>3</sup>.

Суммарная площадь, м<sup>2</sup>, Н - Na-катионитовых фильтров

$$A_n = V_n / h_k; A_{Na} = V_{Na} / h_k,$$

где  $h_k = 2 \dots 2,5$  - высота слоя катионита в фильтре, м.

Количество Н - Na-катионитовых фильтров в установке должно быть не менее двух. При количестве фильтров на установке менее шести принимают один резервный фильтр, при большем их количестве - два. Резервные Na-катионитовые фильтры устанавливать не рекомендуется.

Для удаления оксида углерода (IV) из воды после Н-катионирования, а также из смешанной воды после Н-Na-катионирования применяют дегазаторы с кольцами Рашига или пластмассовыми 25x25x3 мм. Высоту слоя насадки подбирают в зависимости от концентрации, мг/л, оксида углерода (IV) в воде, подаваемой в дегазатор,

$$(CO_2) = (CO_2)_{и} + 44Щ,$$

где  $(CO_2)_{и}$  - концентрация свободного оксида углерода (IV) в исходной воде, мг/л;  $Щ$  - щелочность умягчаемой воды, мг-экв/л.

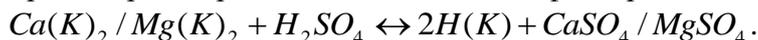
Вентилятор к дегазатору подбирают, исходя из условия подачи 20 м<sup>3</sup> воздуха на 1 м<sup>3</sup> обрабатываемой воды. Развиваемый им напор определяют на основании учета сопротивления насадки, для колец Рашига - 294,3 Па на 1 м высоты слоя, все другие сопротивления принимают равным 294,3 - 392,4 Па.

Н-катионитовые фильтры регенерируют 1 - 1,5 % - ным раствором серной кислоты. Регенерационный раствор серной кислоты фильтруют через слой катионита со скоростью не менее 10 м/ч с последующей его отмывкой неумягченной водой, пропускаемой через катиониты сверху вниз со скоростью 10 м/ч. Расход 100 % - ной кислоты, на одну регенерацию Н-катионитового фильтра

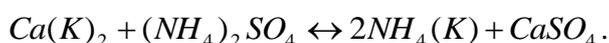
$$q_n = ae^h b h_k / 1000,$$

где  $a$  - площадь одного Н-катионитового фильтра, м<sup>2</sup>;  $b$  - удельный расход кислоты для регенерации катионита, г/г-экв.

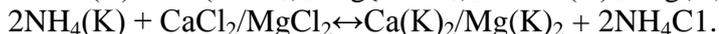
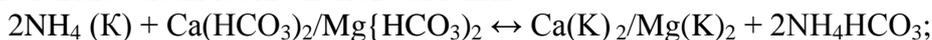
Процесс регенерации Н-катионитовых фильтров описывается следующей реакцией:



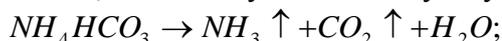
Если в умягченной воде не допускается присутствие карбонатов натрия или калия, но возможно содержание ионов аммония, то вместо водород - и натрий - катионирования рекомендуется аммоний - натрий катионирование воды. Первоначально катионит регенерируют раствором аммонийной соли и его обменные катиониты замещаются ионом аммония



При умягчении кальций и магний поглощаются катионитом, вытесняя в фильтрат эквивалентное количество ионов аммония:



При нагревании и кипении аммоний - катионированной воды соли аммония разлагаются, аммиак и уголекислота улетучиваются с паром:



Разложение аммонийных солей сопровождается образованием сильных кислот, подкисляющих воду. Для предотвращения этого вместе с аммоний - катионированием рекомендуется применять натрий - катионирование части умягчаемой воды с тем, чтобы

образующийся при термическом распаде бикарбонат натрия едкий натр нейтрализовывал кислоты, которые получаются при термическом распаде сульфата и хлорида аммония.

Аммоний - натрий - катионирование можно осуществлять в одном фильтре, регенерацию которого производят раствором хлористого аммония и поваренной соли, либо последовательным пропуском через аппарат сначала раствора поваренной соли, а затем раствора аммонийной соли.

При необходимости получения постоянного и глубокого умягчения воды (менее 0,03 мг-экв/л) схему, приведенную на рис 7.60, приходится дополнять Na-катионитовыми фильтрами второй ступени, так как при практически приемлемой системе контроля за работой катионитовых фильтров при одноступенчатом катионировании трудно уловить начало проскока жесткости в фильтрат и, следовательно, предотвратить периодическое ухудшение его качества. Подобную схему используют, если жесткость исходной воды значительна (более 6 - 8 мг-экв/л). На определенном этапе работы H-катионитовых фильтров начинает снижаться кислотность фильтрата в результате попадания в него ранее поглощенных катионов натрия. Для устранения снижения кислотности фильтрата прибегают к двухступенчатому H-катионированию. На H-катионитовых фильтрах первой ступени работают до проскока в фильтрат катионов  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$ , после чего их отключают на регенерацию. H-катионитовые фильтры второй ступени служат для задержания из обрабатываемой воды катионов  $Na^+$ , которые почти не задерживаются фильтрами первой ступени, при условии работы их до проскока  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$ . При извлечении из умягчаемой воды катионов  $Na^+$  кислотность фильтрата сохраняется постоянной длительное время, поскольку H-катионитовые фильтры второй ступени имеют более продолжительный межрегенерационный период, потому что на них поступает вода с малым содержанием катионов (катионы  $Na^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  уже задержаны в фильтрах первой ступени).

Фильтроцикл на H-катионитовых фильтрах второй ступени невыгодно заканчивать в момент проскока  $Na^+$  в фильтрат; при обнаружении проскока  $Na^{2+}$  на фильтры второй ступени вместо фильтрата после фильтров первой ступени целесообразней подавать исходную умягчаемую воду. Это позволяет использовать H-катионитовый фильтр второй ступени в цикле Na-катионирования воды так как к моменту проскока  $Na^+$  в фильтрат этот фильтр представляет собой как бы отрегенированный Na-катионитовый фильтр. Лишь после проскока в фильтрат  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  фильтр второй ступени отключают на регенерацию. Таким образом, если к умягченной воде предъявляют высокие требования в отношении глубины умягчения и если вместе с тем исходная вода характеризуется значительным содержанием  $Na^+$  и повышенной карбонатной жесткостью, то схему H - Na-катионитового умягчения целесообразно принимать в следующем виде. Сначала проводят двухступенчатое H-катионирование, затем оба фильтрата смешивают, и вода подается на дегазатор для удаления свободной углекислоты, после этого вся вода поступает на Na-катионитовые буферные фильтры.

Другим приемом получения глубоко умягченного фильтрата является противоточное катионирование, о котором указывалось выше. Сущность противоточного катионирования заключается в том, что умягчаемая вода направляется через слой катионита снизу вверх, в то время как регенерирующий раствор и отмывочная вода пропускаются через катионит в обычном направлении - сверху вниз.

Противоточное катионирование реализуется в фильтрах с гидравлически зажатой (см. рис. 7.58) загрузкой. Регенерация фильтра производится без предварительных взрыхляющих промывок. Результаты работы таких фильтров показали: 1) возможно повышение скорости противоточного фильтрования до 25 м/ч; 2) при умягчении вод средней жесткости (до 10 мг-экв/л) остаточная жесткость фильтрата не превышает 0,01 мг-экв/л, т.е. получаемый эффект не уступает эффекту двухступенчатого катионирования; 3) при некотором снижении удельного расхода соли на регенерацию (до 165 г/г-экв) емкость поглощения фильтра уменьшается, но эффект умягчения не снижается; 4) должна быть предусмотрена возможность обратной промывки дренажа током воды от

водопровода, так как во время рабочего цикла умягчения дренажные колпачки, расположенные в слое катионита, частично забиваются мелкими: зернами; 5) возможно противоточное катионирование без взрыхляющей промывки загрузки перед ее регенерацией.

### 30.5.4. Оборудование катионитовых установок

Катионитовые фильтры бывают напорные и открытые. *Напорные катионитовые фильтры* (горизонтальные, вертикальные) состоят из цилиндрического корпуса, дренажной системы для отвода из фильтров умягченной воды и подачи на него воды для взрыхления катионита, распределительной системы для подачи в фильтр регенерационного раствора и сборной системы для отвода из фильтра воды при взрыхлении катионита и распределении по площади фильтра умягчаемой воды (см. рис. 7.58). Наиболее широко применяют напорные фильтры, главным образом вертикальные. Открытые катионитовые фильтры применяют только на установках большой производительности (более 500 м<sup>3</sup>/ч) и только при одноступенчатом катионировании.

Напорные катионитовые фильтры выпускаются серийно отечественной промышленностью семи типоразмеров различных диаметров и с различной высотой загрузки катионитов, рассчитанные на рабочее давление 0,6 МПа и рабочую температуру до 60°С (табл. 7.28). Фильтр оборудуют необходимым количеством задвижек (или гидравлических затворов) и вентилей для управления работой фильтра, отбора проб воды. Кроме того, каждый фильтр снабжают следующей контрольно - измерительной аппаратурой: расходомером для измерения производительности фильтра, счетчиком для замера общего количества умягченной воды и двумя манометрами, один из которых показывает давление воды до фильтра, другой - после него. Вся аппаратура сконцентрирована с одной стороны фильтра, называемой фронтом фильтра.

Таблица 7.28

Название фильтра	Шифр	Диаметр, мм	Строительная высота, мм	Масса фильтра без арматуры, кг	Нагрузочная масса, т
Натрий-катионитовый I ступени	-	1000	3688	1012	5,0
		1500	3980	1660	10,0
Натрий-катионитовый II ступени	-	1000	2978	926	3,5
		1500	3373	1614	7,5
Водород-катионитовый I ступени	-	1000	3598	1039	5,0
		1500	3928	1692	10,0
Водород-катионитовый II ступени	-	1000	2923	957	3,5
		1500	3314	1678	7,5
Ионообменный натрий-катионитовый I ступени	ФИПаI-1,0-6	1000	3753	1068	5,9
То же, II ступени	ФИПаI-1,4-6	1400	4016	1771	6,8
	ФИПаI-1,0-6	1000	3040	984	4,7
Ионообменный водород-катионитовый I ступени	ФИПаI-1,0-6	1400	3410	1666	5,6
	ФИПаI-1,0-6	1000	3660	1069	5,8
То же, II ступени	ФИПаI-1,4-6	1400	3962	1760	6,8
	ФИПаII-1,0-6	1000	2988	966	4,6
Ионообменный параллельноточный I ступени (водородный и натриевый)	ФИПаII-1,4-6	1400	3352	1720	5,7
	ФИПаI-2,0-6	2000	4930	2630	15,0
Ионообменный параллельноточный II ступени (водородный и натриевый)	ФИПаI-2,6-6	2600	5200	4258	27,0
	ФИПаI-3,0-6	3000	5470	5187	36,0
Ионообменный параллельноточный II ступени (водородный и натриевый)	ФИПаI-3,4-6	3400	5740	7398	47,0
	ФИПаII-2,0-6	2000	3630	2089	13,0
То же, II ступени	ФИПаII-2,6-6	2600	4015	3697	20,0
	ФИПаII-3,0-6	3000	4385	4750	30,0

В катионитовых фильтрах поддерживающие слои обычно не устраивают, а применяют щелевые дренажи.

Для предотвращения коррозии внутреннюю поверхность корпуса и все детали катионитовых фильтров, соприкасающиеся с агрессивной средой, либо изготавливают из коррозионно-стойких материалов, либо надежно защищают специальными покрытиями. При использовании для изготовления Н-катионитовых фильтров обычной листовой стали внутреннюю поверхность корпуса фильтра гуммируют, оклеивают винилпластовой фольгой или пластиком, окрашивают перхлорвиниловым или бакелитовым лаком.

В состав катионитовых водоумягчительных установок кроме фильтров входят вспомогательные устройства для регенерации и отмывки фильтров в процессе их эксплуатации. На водоумягчительных установках малой производительности с расходом поваренной соли меньше 0,5 т/сут ее можно хранить в сухом виде в неоттапливаемых складах и растворять в проточных солерастворителях непосредственно перед регенерацией Na-катионитового фильтра. Они представляют собой металлические цилиндрические резервуары с двумя полусферическими днищами, рассчитанные на рабочее давление до 0,6 МПа. В нижней части солерастворителя укреплено дренажное устройство в виде коробки со щелями у основания. Над ним расположены гравийные подстилающие слои с уменьшающимися сверху размерами зерен, на которые загружается поваренная соль в количестве, необходимом для одной регенерации.

Концентрация раствора соли, выходящего из проточного солерастворителя, неблагоприятна для регенерации Na-катионитовых фильтров - вначале она большая и по мере растворения соли падает. Поэтому иногда раствор соли из солерастворителя направляют в отдельный бак, где поддерживают концентрацию рассола в пределах до 10 %, затем при регенерации его разбавляют. При больших расходах соли применяют мокрое хранение (рис. 7.61,а), при котором поступающую на водоумягчительную установку поваренную соль засыпают в большую емкость и заливают водой. Объем баков для мокрого хранения соли, м<sup>3</sup>, рассчитывают по формуле

$$V_{м.х.} = (q^{Na} Ж_0 m q_{y.д.}) / (10^4 \rho C),$$

где  $q^{Na}$  - расход воды на Na-катионитовые фильтры, м<sup>3</sup>/сут;  $Ж_0$  - удаляемая при Na-катионировании общая жесткость воды, г-экв/м<sup>3</sup>;  $m$  - срок хранения запаса соли (обычно 20 - 40 сут);  $q_{y.д.}$  - удельный расход соли на регенерацию катионита, г/г-экв поглощенной жесткости;  $\rho$  - плотность раствора соли, г/см<sup>3</sup>;  $C$  - концентрация раствора соли (обычно равна 20 - 25 %).

По приведенной формуле 1 т поваренной - соли занимает 5 - 6 м<sup>3</sup> емкости бака. Для сокращения его объема соль можно хранить не в виде раствора, а в замоченном состоянии; необходимая при этом емкость составляет 2 - 2,5 м<sup>3</sup> на 1 т соли.

Железобетонные баки - хранилища обычно располагают вне здания с некоторым заглублением в грунт и перекрывают дощатыми щитами. При однорядном расположении хранилищ мокрой соли их располагают параллельно стене здания водоумягчительной установки, при двухрядном - между ними устраивают железнодорожную колею, а также оборудуют насосную станцию с насосами и воздуходувками. Для ускорения растворения соли применяют перемешивание воздухом, циркуляцию рассола или сочетают оба способа: при низкой температуре окружающей среды желательнее применять подогретую воду. На дне емкостей - хранилищ прокладывают лоток или сборную дырчатую трубу и ограждают коробом с отверстиями, который обсыпают гравием или щебнем крупностью 3 - 4 до 30 - 40 мм, что позволяет освободить рассол от грубодисперсных примесей. Более полно раствор поваренной соли осветляется на кварцевых фильтрах. Рекомендуется применять открытые фильтры со скоростью фильтрования 4 - 5 м/ч при толщине слоя песка 0,6 - 0,8 м (размер зерен 1 - 1,5 мм). Осветленный концентрированный раствор соли собирают в бак из двух отделений, используемых в качестве мерников. Целесообразно

подавать рассол на катионитовые фильтры эжектором, одновременно разбавляя его до нужной концентрации. При этом на трубопроводе эжектирующей воды (давление не менее 0,4 - 0,45 МПа) устанавливают расходомер, а за эжектором автоматический концентратор.

При Н - Na-катионитовом методе умягчения воды установку оборудуют также кислотным хозяйством, которое должно обеспечивать месячный запас реагента (рис. 7.61,б). В связи с тем, что железнодорожные цистерны, в которых поставляют серную кислоту, имеют грузоподъемность до 50 - 60 т (емкость баков при плотности раствора 1,8 составляет 28 - 33 м<sup>3</sup>), объем хранилищ должен обеспечивать их опорожнение. Кислотное хозяйство состоит из цистерн - хранилищ, мерников для концентрированной кислоты и вакуум-насосов.

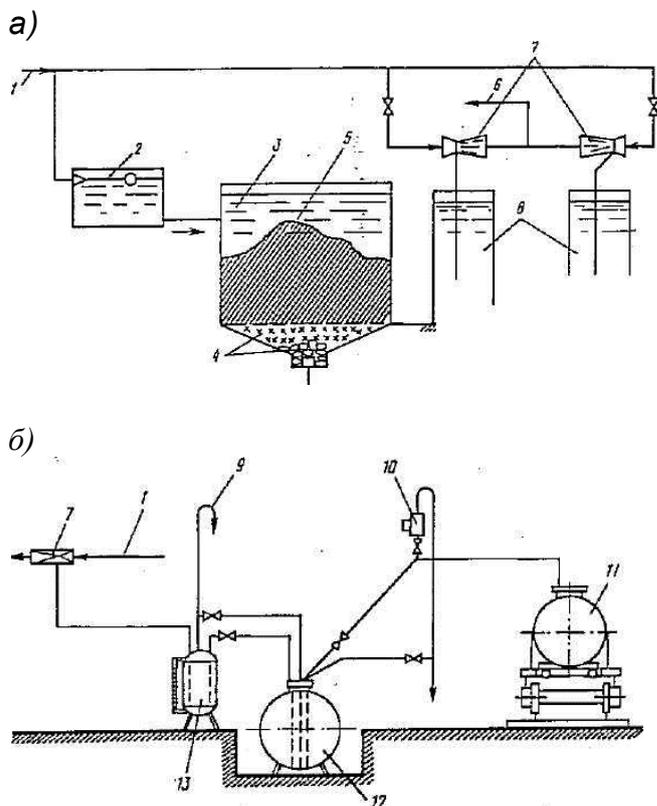
Объем цистерн для хранения серной кислоты и полезную емкость мерника, м<sup>3</sup>, определяют по формулам:

$$V_{ц} = 0,0024q_n Ж_0 q_{уд} m / (C\rho); V_m = q_n Ж_0 t q_{уд} / (10^4 C\rho n),$$

где  $q_n$  - расход воды на Н-катионитовые фильтры, м<sup>3</sup>/ч;  $Ж_0$  - общая жесткость исходной воды, мг-экв/л;  $q_{уд}$  - удельный расход кислоты на регенерацию катионита, г/г-экв;  $m$  - срок хранения запаса кислоты, сут;  $C$  - концентрация серной кислоты (принимается равной 90 - 9 %);  $\rho$  - плотность кислоты, г/см<sup>3</sup>;  $t$  - фильтроцикл, ч;  $n$  - число рабочих фильтров.

При проектировании установок с применением серной кислоты необходимо избегать схем, в которых кислота находится или транспортируется под давлением.

Объем баков для регенерационного раствора поваренной соли  $V_c$ , м<sup>3</sup>, и серной кислоты  $V_k$ , м<sup>3</sup>, если предусмотрено их разбавление до фильтров, рассчитывают по формулам:



**Рис. 7.61. Схема солевого (а) и кислотного (б) хозяйств катионитовых установок**  
 1, б – подача воды и отвод насыщенного раствора соли; 2 – бак постоянного уровня; 3 – бак - хранилище технической поваренной соли; 4 – гравийно-песчаный фильтр; 5 – слой

соли; 7 – эжектор; 8 – расходные баки насыщенного раствора соли; 9 – к вакуум-наосу; 10 – промежуточный бачок; 11,12 – железнодорожная и стационарная цистерны; 13 – мерник кислоты

$$V_c = 20q_c / 1000; V_k = 65q_k / 1000;$$

где  $q_c$  и  $q_k$  - расход соответственно поваренной соли и кислоты на регенерацию, м<sup>3</sup>.

Бак для воды, используемой для взрыхления слоя катионита, рассчитывают на последовательное проведение этой операции в двух фильтрах. Объем м<sup>3</sup> определяют по формуле

$$V_B = 260wat_B / 1000 = 0,12wat_B$$

где  $w$  - интенсивность взрыхления катионита, л/(м<sup>2</sup>с);  $a$  - площадь одного фильтра, м<sup>2</sup>;  $t_B$  - продолжительность взрыхления, мин.

Бак располагают так, чтобы его дно было на 4 м выше сборной воронки фильтра.

Расход воды на собственные нужды Н - Na-катионитовых установок складывается из потребления воды на следующие технологические операции: приготовление регенерационных растворов соли и кислоты; взрыхление катионита в фильтрах перед регенерацией; отмывка катионита после генерации. На эти цели используют осветленную, неумягченную воду. На катионитовую установку ее должно поступать  $Q$ , м<sup>3</sup>/сут,

$$Q = Q_y + Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

$Q_y$  - полезная производительность установки по умягчению воды; ( $Q_1, Q_2, Q_3$  - соответственно расход воды на приготовление регенерационного раствора, взрыхление и отмывку катионита.

При повторном использовании отмывочной воды для взрыхления фильтров расход воды на собственные нужды сокращается на  $Q_2$ .

Расчетный расход воды, м<sup>3</sup>/сут, на приготовление растворов поваренной соли  $Q_1$  и серной кислоты  $Q_1'$  равен

$$Q_1 = \frac{100nn_1ahE_p^{Na}q_{y\delta.c}}{1000 * 1000 * C}$$

$$Q_1' = \frac{100n_1ahE_p^Hq_{y\delta.k}}{1000 * 1000 * C_1}$$

где  $n$  и  $n_1$  - соответственно число Na и H-катионитовых фильтров и регенераций каждого фильтра в сутки;  $a$  и  $h_k$  - площадь, м<sup>2</sup>, и высота, м, загрузки фильтра катионитом;  $E_p^{Na}$  и  $E_p^H$  - рабочая обменная емкость соответственно Na - и H-катионита, г-экв/м<sup>3</sup>;  $q_{y\delta.c}$  и  $q_{y\delta.k}$  - удельные расходы соли и кислоты, г/г - эки, удаляемой жесткости;  $C = 5..8$  - средняя концентрация регенерационного раствора соли, %;  $C_1$  - средняя концентрация регенерационного раствора кислоты (в расчетах принимается равной 1 %).

Расход воды на взрыхление катионита, м<sup>3</sup>/сут,

$$Q_2 = 0,06nn_1awt,$$

где  $t = 15$  - продолжительность взрыхления, мин;  $w$  - интенсивность взрыхления, принимаемая в зависимости от крупности зерен катионита в пределах 3 - 4 л/(м<sup>2</sup>с).

Расход воды на отмывку катионита, м<sup>3</sup>/сут

$$Q_3 = nn_1ah_kq_{y\delta.e},$$

где  $q_{y\delta.e}$  - удельный расход отмывочной воды ( $q = 4..5$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> катионита).

## 30.6. УМЯГЧЕНИЕ ВОДЫ ДИАЛИЗОМ

Диализ - метод разделения растворенных веществ, значительно отличающихся молекулярными массами. Он основан на разных скоростях диффузии этих веществ через полупроницаемую мембрану, разделяющую концентрированные и разбавленные растворы. Под действием градиента концентрации (по закону действующих масс) растворенные вещества с различными скоростями диффундируют через мембрану в сторону разбавленного раствора. Растворитель (вода) диффундирует в обратном направлении, снижая скорость переноса растворенных веществ. Диализ осуществляют в мембранных аппаратах с нитро- и ацетатцеллюлозными пленочными мембранами.

Эффективность полупроницаемой мембраны для умягчения воды определяется высокими значениями селективности и водопроницаемости, которые она должна сохранять в течение продолжительного времени работы. Селективность мембраны можно выразить следующим образом:

$$\frac{C_u - C_{ум}}{C_u} 100,$$

где  $C_u$  - концентрация исходного раствора ( $\mathcal{J}_{исх}$ );  $C_{ум}$  - концентрация умягченной воды ( $\mathcal{J}_{ум}$ ).

На практике часто используют коэффициент снижения соледержания  $C_u / C_{ум}$ . Он наиболее полно отражает изменения в работе мембраны, связанные с ее изготовлением или с воздействием внешних факторов.

Основой теоретических разработок процесса явилось положение, что через полупроницаемую мембрану вода и растворенные соли проникают при помощи диффузии и движения через поры. Мембраны будут полупроницаемыми, если они хотя бы в поверхностном слое имеют поры, не превышающие по размеру удвоенной толщины слоя связанной жидкости. Селективность мембран объясняется различием в коэффициентах диффузии и растворимости компонентов системы в ее материале. При движении умягчаемой воды с одной стороны селективной (катионитовой) мембраны, а рассола - с другой ионы натрия мигрируют в мембрану и далее в исходную воду, а ионы кальция и магния - в противоположном направлении, т.е. из жесткой воды в рассол. Таким образом, происходит извлечение из умягчаемой воды ионов кальция и магния и замена их неосадкообразующими ионами натрия.

Уравнение обмена между ионами  $(Ca^{2+})_и$ , содержащимися в исходной воде, и ионами  $(Na^+)$  в мембране имеет вид



где  $x, \overline{x}$  - прочие ионы, содержащиеся в растворе и в мембране.

Константа равновесия

$$K_1 = \frac{(Ca^{2+})^{0,5}(\overline{x})(Na)_u^+}{(Ca^{2+})_u^{0,5}(\overline{x})_u(\overline{Na})^+}$$

Уравнение обмена написано только для иона кальция, но фактически необходимо учитывать сумму ионов кальция и магния. Равновесие между рассолом и мембраной имеет вид:  $0,5Ca_p^{2+} + x + Na^+ = 0,5Ca_p^{2+} + \overline{x} + Na_p^+$ ,

$$K_2 = \frac{(Ca^{2+})^{0,5}(\overline{x})(Na^+)_p}{(Ca^{2+})_p^{0,5}(\overline{x})_p(Na^+)}$$

Если  $K_1 = K_2$ , то

$$[Ca^{2+}]_и = [Ca^{2+}]_p [x]_p^n [Na^+]_p^2 / [x]_и^n [Na^+]_и^2,$$

где  $n$  - показатель степени, зависящий от того, какие ионы входят в состав раствора.

Из последнего выражения видно, что если в равновесии отношение ионов натрия в рассоле и жесткой исходной воде равно, например, 10, то жесткость в исходной воде будет примерно в 100 раз меньше, чем в рассоле.

Движущей силой процесса умягчения воды диализом является разность активностей растворенного вещества по обе стороны селективных мембран, разделяющих растворы. Это условие можно выразить следующим образом

$$C_p / \mathcal{J}_p \neq C_d / \mathcal{J}_d,$$

где  $C_p$  и  $C_d$  - концентрации растворенных солей в рассольной и диализатной камерах;  $\mathcal{J}_p$  и  $\mathcal{J}_d$  - жесткость рассола и диализата.

Скорость процесса диализа описывается уравнением

$$d[(C_p / \mathcal{J}_p) - (C_d / \mathcal{J}_d)]dt = -bA(C_p - C_d),$$

где  $b$  - константа, зависящая от свойств мембраны и растворов;  $A$  - площадь общей поверхности мембран.

Преобразуя это дифференциальное уравнение с учетом баланса расходов и масс и интегрируя, получим выражение, позволяющее определить жесткость умягченной воды  $\mathcal{J}_y$  в зависимости от площади поверхности мембран, длины пути потока, скорости движения диализата, начальной жесткости рассола и диализата, расходов воды в рассоле и диализате в следующем виде

$$\mathcal{J}_y = \frac{C_d [(Q_d / Q_p) + 1]}{[(Q_d C_d / Q_p \mathcal{J}_d) + (C_p / \mathcal{J}_p) - (C_p / \mathcal{J}_p) - (C_d / \mathcal{J}_d)] e^{-\lambda}},$$

где  $C_d$  и  $C_p$  - концентрация солей в начале аппарата соответственно в диализате и в рассоле, мг-экв/л;  $Q_d$  и  $Q_p$  - производительность аппарата соответственно по диализату и рассолу, муч;  $\mathcal{J}_d$  и  $\mathcal{J}_p$  - жесткость в начале аппарата соответственно в диализате и в рассоле, мг-экв/л;  $v$  - скорость движения диализата в камере, м/с.

$$\lambda = [(Q_d / Q_p) + 1](bAL / v),$$

где  $L$  - длина пути раствора  $m$ , а в диализатной и рассольной камерах.

Площадь,  $m^2$ , поверхности мембраны

$$A = M / (K_d \Delta C_{cp}),$$

где  $M$  - количество вещества, прошедшее через мембрану;  $\Delta C_{cp}$  - движущая сила процесса, т.е. разность концентраций вещества по обе стороны мембраны;  $K_d$  - коэффициент массопередачи, определяемый обычно экспериментально или приближенно из выражения

$$K_d = +(1/\beta_1 + \delta/D + 1/\beta_2)^{-1},$$

здесь  $\beta_1$  и  $\beta_2$  - соответствующие коэффициенты скорости переноса вещества в концентрированном растворе к мембране и от нее - в разбавленном;  $\delta$  - толщина мембраны;  $D$  - коэффициент диффузии растворенного вещества.

Экспериментальная проверка этого уравнения на катионитовых мембранах МКК показала хорошую сходимость результатов. Анализ формулы показывает, что уменьшение скорости движения диализата в камерах аппарата увеличивает эффект умягчения, снижение жесткости умягченной воды прямо пропорционально концентрации рассола.

## Глава 31. МАГНИТНАЯ ОБРАБОТКА ВОДЫ

В последнее время в отечественной и зарубежной практике для борьбы с накипеобразованием и инкрустацией успешно применяют магнитную обработку воды. По Е.Ф.Тибенихину, под влиянием магнитного поля происходят поляризация и деформация ионов, сопровождающиеся уменьшением их гидратации, повышающей вероятность их сближения, и в конечном итоге образование центров кристаллизации.

Сущность метода состоит в том, что при пересечении водой магнитных силовых линий накипеобразователи выделяются не на поверхности нагрева, а в массе воды. Образующиеся рыхлые осадки (шлам) удаляют при продувке. Метод эффективен при обработке вод кальциево - карбонатного класса, которые составляют около 80 % вод всех водоемов нашей страны и охватывают примерно 85 % ее территории.

Обработка воды магнитным полем получила широкое применение для борьбы с накипеобразованием в конденсаторах низкого давления и малой производительности, в тепловых сетях и сетях горячего водоснабжения и различных теплообменных аппаратах, где применение других методов обработки воды экономически нецелесообразно. В сравнении с умягчением воды основными преимуществами ее магнитной обработки являются простота, дешевизна, безопасность и почти полное отсутствие эксплуатационных расходов.

Магнитная обработка природных вод (как пресных, так и минерализованных) приводит к уменьшению интенсивности образования накипи на поверхности нагрева только при условии перенасыщенности их как карбонатом, так и сульфатом кальция в момент воздействия магнитного поля и при условии, что концентрация свободного оксида углерода (IV) меньше его равновесной концентрации.

Противонакипный эффект зависит от состава, напряженности магнитного поля, скорости движения воды и продолжительности ее пребывания в магнитном поле и от других факторов. На практике применяют магнитные аппараты с постоянными стальными или ферритобариевыми магнитами и электромагнитами. Аппараты с постоянными магнитами конструктивно проще и не требуют питания от электросети. В аппаратах с электромагнитом на сердечник (кern) наматываются катушки проволоки, создающие магнитное поле.

Магнитный аппарат монтируется к трубопроводам в вертикальном и горизонтальном положении с помощью переходных муфт. Скорость движения воды в зазоре не должна превышать 1 м/с. Процесс работы аппаратов может сопровождаться загрязнением проходного зазора механическими, главным образом ферромагнитными примесями. Поэтому аппараты с постоянными магнитами необходимо периодически разбирать и чистить. Оксиды железа из аппаратов с электромагнитами удаляют, отключив их от сети.

Результаты исследований Ю.И.Федькушева показали, что для воды с карбонатной жесткостью 6 - 7 мкг-экв/л, окисляемостью 5,6 мг  $O_2$ /л и солесодержанием 385 - 420 мг/л оптимальная напряженность магнитного поля составляла (10 - 12,8)  $19^4$  А/м, что соответствует силе тока 7 - 8 А.

Схема установки для обработки добавочной питательной воды отопительных паровых котлов приведена на рис. 7.62.

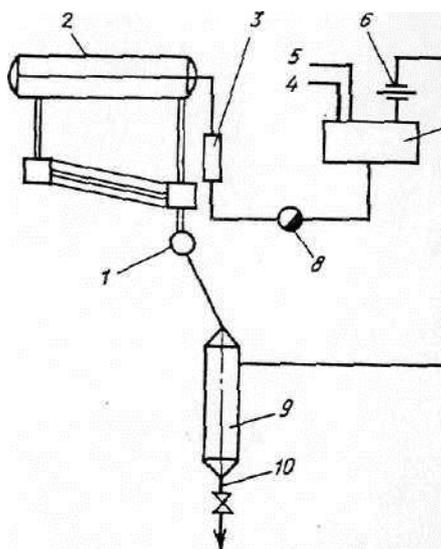


Рис. 7.62.Схема установки магнитного аппарата

1 - место отбора шлама; 2 - котел; 3 - аппарат магнитной обработки воды; 4 - конденсат; 5 - свежая вода; 6 - дроссельная шайба; 7 - бак питательной воды; 8 - насос; 9 - осадкоотделитель; 10 - сброс осадка

В последнее время получили распространение аппараты с внешними намагничивающими катушками. Для омагничивания больших масс воды созданы аппараты с постоянной ее обработкой.

Помимо предотвращения накипеобразования магнитная обработка, по данным П.П.Строкача, может применяться для интенсификации процесса коагуляции и кристаллизации, ускорения растворения реагентов, повышения эффективности использования ионообменных смол, улучшения бактерицидного действия дезинфектантов.

При проектировании магнитных аппаратов для обработки воды задаются такие данные: тип аппарата, его производительность, индукция магнитного поля в рабочем зазоре или соответствующая ей напряженность магнитного поля, скорость воды в рабочем зазоре, время прохождения водой активной зоны аппарата, род и его напряжение для электромагнитного аппарата или магнитный сплав и размеры магнита для аппаратов с постоянными магнитами.

## **Глава 32. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВОДООЧИСТНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

### **32.1. ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ, ОТДЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ И РЕАГЕНТОВ**

Водоочистные комплексы должны быть рассчитаны на равномерную работу в течение суток максимального водопотребления, при этом следует предусматривать необходимость отключения отдельных сооружений на текущий ремонт, осмотр и т.п. Для водоочистных комплексов производительностью 5 тыс.м<sup>3</sup>/сут допускается организация работы в течение части суток.

При проектировании водоочистных комплексов их коммуникации необходимо рассчитывать на возможность пропуска расхода воды на 30 % больше расчетного, руководствуясь соображениями интенсификация или реконструкции водоочистных сооружений.

Состав водоочистных сооружений зависит от качества воды в источнике водоснабжения, требований, предъявляемых к обработанной воде, которые обусловлены регламентами потребителя, и от производительности установки. При подготовке воды питьевого качества состав водоочистных сооружений назначается по СНиПу, а при подготовке воды для технологических нужд - в соответствии с требованиями технологии. Рассмотренные ранее технологические схемы составлены исходя из оптимальных режимов эксплуатации отдельных водоочистных сооружений и с учетом технико-экономических показателей их работы. Так, сооружения предварительной обработки воды (отстойники, осветлители со взвешенным осадком, флотаторы и др.) должны осветлять воду до содержания взвесей 3 - 12 мг/л и снижать ее цветность до 25 - 30 град. При этом минимальная продолжительность работы вертикального отстойника должна быть не менее 6 ч, горизонтального - 12 - 24 ч, осветлителей со взвешенным осадком - 3 - 12 ч между выпусками осадка.

Если мутность обрабатываемой воды больше 1,5 г/л, то необходимо предусматривать сооружения предварительного безреагентного осветления, выбор которых обусловлен характером взвеси и производительностью водоочистного комплекса. Обычно для этой цели используют горизонтальные или радиальные отстойники, гидроциклоны и водозаборы - осветлители.

Более сложным и ответственным является обоснование выбора конструкций отдельных технологических сооружений. Например, при проектировании установок с осветлителями со взвешенным осадком или с контактными осветлителями предпочтение следует отдавать вертикальным смесителям, которые обеспечивают не только требуемое смешение реагентов с

водой, но и воздухоудаление, что является необходимым условием для надежной работы указанных аппаратов. Следует предусматривать рассредоточенный ввод реагентов.

При необходимости удаления из воды планктона следует предусматривать микрофильтры, или принимать технологию с флотаторами, или на первой ступени фильтровать воду через плавающую полимерную загрузку.

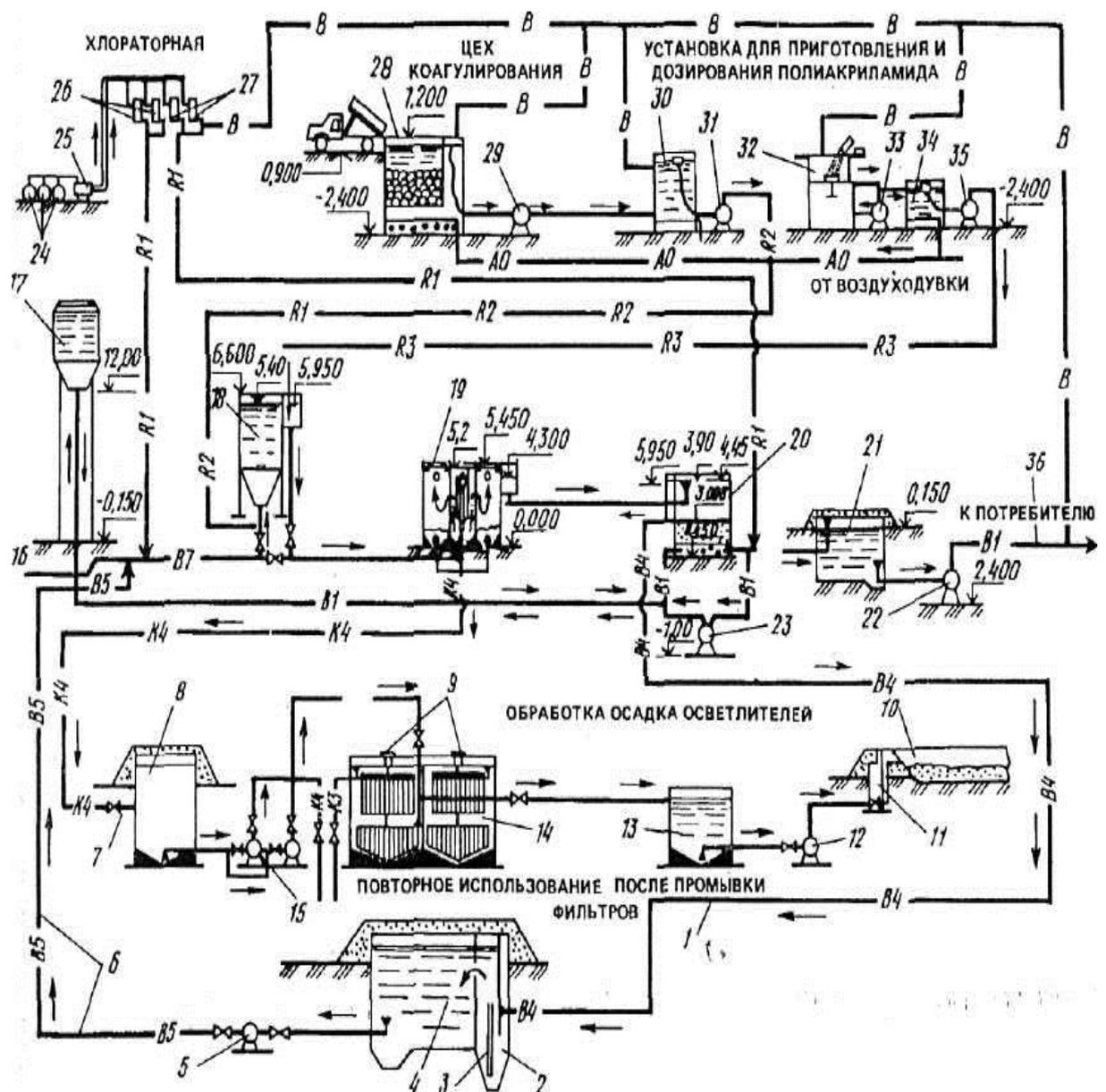
В случае дезодорации воды с использованием угольной пульпы или сильного окислителя в начале технологического тракта следует принимать в качестве входного устройства контактный резервуар, а при длительном периоде дезодорации - угольные фильтры, располагаемые после осветлительных, предусматривая, если это необходимо, ввод хлора в воду перед фильтрами с активным углем.

При коагулировании примесей воды в условиях низких температур, а также при ее реагентном умягчении следует использовать железные коагулянты. Для обесцвечивания воды рекомендуются алюминиевые коагулянты (или их смесь с железными), озон и активированная кремниевая кислота.

## **32.2. ВЫСОТНАЯ СХЕМА И ПЛАНИРОВКА ВОДООЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

На крупных водоочистных комплексах обрабатываемая вода от сооружения к сооружению движется самотеком. Поэтому важно знать взаимное высотное расположение технологической схемы. Это достигается построением высотной схемы (рис. 7.63) - продольного профиля по воде в произвольном масштабе, на котором показывают все основные и вспомогательные сооружения и аппараты и проставляют отметки уровней воды в каждом сооружении и отметки дна сооружений. При составлении высотной схемы необходимо обеспечить условия самотечного движения воды от контактной камеры или смесителя до резервуара чистой воды при одновременном соблюдении требований удобства эксплуатации. Для этого прежде всего необходимо знать максимально возможные потери напора во всех водоочистных сооружениях технологической схемы, потери напора в коммуникациях между сооружениями и потери напора в измерительной аппаратуре.

Согласно СНиПу величины перепадов уровней воды в водоочистных сооружениях и соединительных коммуникациях следует рассчитывать, однако для предварительного построения высотной схемы можно руководствоваться следующими данными потерь напора, м: в контактной камере - 0,3 - 0,5; в устройствах ввода реагентов - 0,1 - 0,3; в микрофильтрах и барабанных сетках - 0,4 - 0,6; в гидравлическом смесителе - 0,5 - 0,6; в механическом смесителе - 0,1 - 0,2; в гидравлической камере хлопьеобразования - 0,4 - 0,5; в механической камере (флокуляторе) - 0,1 - 0,2; в осветлителе со взвешенным осадком - 0,7 - 0,8; в отстойнике - 0,7 - 0,8; во флотаторе - 0,5 - 0,7; в скорых фильтрах - 3,0 - 3,5; в медных фильтрах - 1,5 - 2,0; в контактных осветлителях и префильтрах - 2 - 2,5; в трубопроводах от резервуара чистой воды до фильтровальных сооружений - 1,0 - 0,5; от фильтров до осветлителей или отстойников - 0,5 - 0,6; от камеры хлопьеобразования до смесителя - 0,3 - 0,5; от осветлителя со смешанным осадком до смесителя - 0,3 - 0,4; от контактного осветлителя до смесителя (входной камеры) - 0,5 - 0,7; в измерительной аппаратуре на входе и выходе из водоочистного комплекса - по 0,5; в индикаторах расхода на отстой пикал, осветлителях, флотаторах, фильтрах и контактных осветлителях - 0,2 - 0,3.



**Рис. 7.63. Высотно - технологическая схема водоочистного комплекса**

1 - подача промывной воды от фильтров; 2 - песколовка; 3 - гидроэлеватор; 4 - резервуар - усреднитель промывной воды; 5 - насос перекачки промывной воды; 6 - возврат промывной воды на очистные сооружения; 7 - подача осадка от осветлителей; 8 - резервуар приема осадка; 9 - установка медленного перемешивания осадка; 10 - площадка обезвоживания осадка; 11 - колодец для напуска осадка; 12 - насос перекачки сгущенного осадка; 13 - емкость сгущенного осадка; 14 - осадкоуплотнитель; 15 - насосы перекачки сырого осадка; 16 - подача исходной воды; 17 - башня промывной воды; 18 - вихревой смеситель; 19 - осветлитель со взвешенным осадком; 20 - скорый фильтр; 21 - резервуар чистой воды; 22 - насос II подъема; 23 - насос подкачки промывной воды; 24 - бочки с хлором; 25 - испаритель; 26, 27 - хлораторы первичного и вторичного хлорирования; 28 - растворно - хранилищный бак коагулянта; 29 - насос перекачки раствора коагулянта; 30 - расходный бак коагулянта; 31 - насос-дозатор раствора коагулянта; 32 - мешалка полиакриламида; 33 - насос для циркуляции и подачи полиакриламида в расходный бак; 34 - растворный бак раствора полиакриламида; 35 - насос-дозатор раствора ПАА

При проектировании высотной схемы максимальную отметку уровня воды в резервуаре чистой воды назначают на 0,25 - 0,5 м выше поверхности земли и принимают как

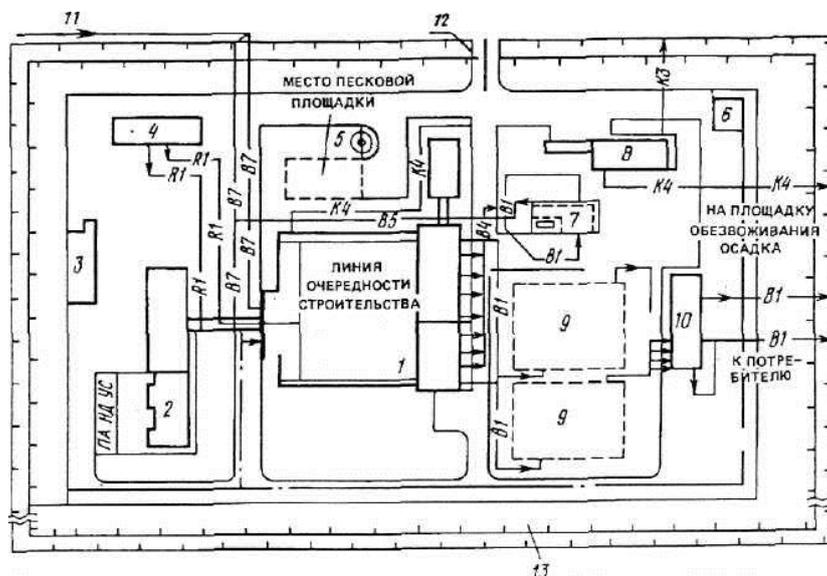
исходную минимальную. Далее путем последовательного суммирования потерь напора определяют отметки уровней воды в остальных сооружениях.

Определение потерь напора в коммуникациях связано с вычислением сечений соединительных трубопроводов и каналов между отдельными сооружениями технологической схемы. Для этого используют величины допустимых в них скоростей движения воды, м/с: от НС-1 подъема к смесителю - 1,0 - 1,2; от смесителя к камере хлопьеобразования или осветлителю - 0,6 - 1,0; от отстойников или осветлителей со взвешенным осадком к фильтрам - 0,8 - 1,2; от фильтровальных аппаратов к резервуарам чистой воды - 1,2 - 1,5; в трубопроводах подачи и отвода промывной воды - 1,5 - 2,0.

Помимо профиля по воде при составлении высотной схемы необходимо определить высоту отдельных сооружений и отметки их дна по отношению к поверхности земли. При привязке очистных сооружений и проектировании высотной схемы необходимо учитывать рельеф площадки очистных сооружений, глубину залегания грунтовых вод, максимальный уровень воды в водоеме в период паводка, возможность самотечного отвода сточных вод и осадков с очистных сооружений, условия производства строительномонтажных работ и их объем, условия работы насосов насосной станции II подъема. Отметки днищ водоочистных сооружений должны назначаться с соблюдением условия минимального объема земляных и бетонных работ и наиболее благоприятных условий производства работ.

На высотной схеме водоочистного комплекса должно быть показано реагентное хозяйство, сооружения по обороту промывной воды и обработки осадка из сооружений предварительной очистки, отметки оси промывных насосов или днища бака промывной башни, отметки вакуум-насосов, насосов-дозаторов, кислотных насосов, воздуходувок.

На территории водоочистных комплексов, т.е. в санитарной зоне строгого режима, помимо основных технологических сооружений размещают все вспомогательные помещения (склады реагентов и фильтрующих материалов, мастерские, лаборатории, диспетчерские и др.). Склады реагентов, кроме хлора и аммиака, должны располагаться вплотную к реагентному цеху, где находятся аппараты для приготовления их растворов и суспензий (рис. 7.64). Площадь складов реагентов рассчитывают на хранение 15 - 30 - дневного запаса в зависимости от продолжительности паводка и местных условий их доставки.



**Рис. 7.64. Генеральный план водоочистного комплекса**

1 - блок (очистных сооружений); 2 - реагентное хозяйство; 3 - котельная; 4 - служебный корпус; 5 - башня промывной воды; 6 - хлораторная; 7 - сооружения оборота промывной воды; 8 - сооружения обработки осадка; 9 - резервуар чистой воды; 10 - насосная станция второго подъема; 11 - водоводы от НС I подъема; 12 - проходная; 13 - резервная территория для расширения комплекса.

В соответствии с видом реагента и производительностью комплекса предусматривают его сухое или мокрое хранение в виде концентрированных растворов или продуктов, залитых водой. Хранение реагентов в сухом виде осуществляют в закрытых складах навалом или в таре. Фторосодержащие реагенты и полиакриламид хранят в таре. При этом срок хранения полиакриламида до 6 мес.; не допускается его замораживание, ведущее к потере его активности. Силикат натрия хранят в герметически закупоренных или деревянных бочках. На крупных водоочистных комплексах раствор коагулянта концентрацией 15 - 20 % хранят в баках - хранилищах без перемешивания. Количество баков должно быть не менее 4. При числе баков до 10 следует предусматривать один резервный.

При сухом хранении извести предусматривают дробилки и известегасилки, при мокром хранении - резервуары - хранилища и устройства для отбора, транспортировки теста и его гидравлического или механического перемешивания при приготовлении известкового молока.

К помещению для хранения активного угля предъявляют требования пожарной безопасности, относя реагент к категории В. Проектирование складов аммиака и хлора, а также складов для хранения кислот должно производиться согласно «Санитарным правилам проектирования, оборудования и содержания складов для хранения сильнодействующих ядовитых веществ».

На крупных водоочистных комплексах предусматривают песковое хозяйство для хранения, сортировки, промывки и транспортирования материалов, необходимых для периодической догрузки и перегрузки фильтровальных аппаратов. Определение объема емкостей для хранения фильтрующих материалов и подбор оборудования для их промывки и отсева производят из расчета 10 % ежегодного пополнения фильтрующей нагрузки и дополнительного аварийного часа на перегрузку одного фильтра при их общем количестве до 20. Загрузку фильтрующим материалом следует производить с помощью песковых, или водоструйных насосов при скорости движения пульпы 1,2..2 м/с.

Для надежной организации работы водоочистного комплекса в его составе необходимо предусматривать лаборатории, мастерские и другие вспомогательные помещения согласно СНиПу. Диспетчерский пункт цеха водоочистки обычно устраивают совмещенным с пунктом управления насосными станциями I и II подъема.

Основополагающими при решении генплана (см. рис. 7.64) водоочистного комплекса помимо географических, топографических и геологических условий являются его производительности состав водоочистных сооружений. На генплане показывают блок основных водоочистных сооружений, служебный корпус, реагентное хозяйство, башню промывной воды, сооружения для повторного использования воды, сооружения обработки осадка, НС II подъема, хлораторную со складом хлора, резервуары чистой воды, котельную, место песковой площадки.

Компактное взаимное расположение отдельных водоочистных сооружений, вспомогательных помещений и оборудования на генплане комплекса должно предусматривать минимальные капиталовложения в строительство, минимальную протяженность трубопроводов и дорожных покрытий между ними, удобство производства ремонтных работ, надежность и бесперебойность работы комплекса, возможность планомерного расширения при росте водопотребления.

На рациональное решение генплана водоочистного комплекса доминирующее влияние оказывает рельеф местности; так, в целях уменьшения объема земляных работ по выемке грунта и обсыпке отдельных сооружений рекомендуют располагать в повышенных местах сооружения с высокими отметками заложения фундамента, а с малыми - в пониженных. Все основные и вспомогательные сооружения желательнее располагать в виде единого комплекса, образуемого трех-, двух- и одноэтажными зданиями. Для малых водоочистных комплексов компактность расположения водоочистных сооружений и оборудования достигается их размещением на одном участке, а иногда и в одном здании с НС I и II подъема. Однако подобные решения не должны быть в ущерб удобству эксплуатации, монтажа оборудования и планового расширения. При компоновке сооружений большой производительности (более 100 тыс.

м<sup>3</sup>/сут) предусматривают отдельные здания для реагентного хозяйства и входных устройств, сооружений предварительной обработки воды и фильтров и т.п. с разрывами между ними порядка 20 м, соединяемых галереями с основным зданием.

Для двухступенчатой очистки воды при производительности комплекса до 50 тыс.м<sup>3</sup>/сут. все его сооружения возводятся в одну очередь. При подаче до 5 тыс.м<sup>3</sup>/сут. основные сооружения, реагентное хозяйство, служебные помещения и НС II подъема размещают в одном блоке. При производительности 5 - 8 тыс.м<sup>3</sup>/сут. контактные камеры и микрофильтры выносят в отдельные блоки, соединяемые проходной галереей с блоком основных сооружений. При подаче 8 - 12,5 тыс.м<sup>3</sup>/сут возможны аналогичные решения. При производительности 12,5 - 20 тыс.м<sup>3</sup>/сут также предусмотрено отдельное расположение контактной камеры и микрофильтров. При необходимости иметь в составе технологической схемы одновременно и входную камеру и микрофильтры их располагают в два этажа в одном блоке. Те же решения для подачи 20 - 32 тыс.м<sup>3</sup>/сут.

Во всех рассмотренных случаях хлораторная совмещена со складом и находится в отдельно стоящем здании; сооружения оборота промывной воды и сооружения обработки осадка размещены по обе стороны р.ч.в.: промывка фильтров от промывной башни.

При производительности 50 тыс.м<sup>3</sup>/сут. и более служебные помещения и реагентное хозяйство размещают в самостоятельных корпусах, соединяемых галереями с основным корпусом водоочистных сооружений. Сооружения оборота промывной воды и сооружения обработки осадка отстойников (осветлителей) располагают по одну сторону р.ч.в. в непосредственной близости друг от друга. Отвод промывной воды и осадка обеспечивается самотеком. Для комплексов подобной производительности микрофильтры или контактные камеры располагают в блоке входных устройств, отстойников (осветлителей) и фильтров рядом со смесителями и камерами хлопьеобразования.

В составе сооружений повторного использования промывной воды помимо резервуара - усреднителя предусматриваются песколовка и насосы возврата осветленной воды и перекачки осадка.

В составе сооружений обработки осадка осветлителей (отстойников) предусмотрены резервуар приема осадка, осадкоуплотнитель с устройством медленного перемешивания, емкость сгущенного осадка и насосное отделение.

При проектировании и привязке одноступенчатых схем решение генплана носит более лаконичный характер, однако ему присущи все те принципы, о которых говорилось ранее.

Сооружение открытых отстойников и осветлителей вне зданий возможно в климатических регионах, где толщина образующегося на поверхности воды зимой льда не превышает 75 мм. Расположение вне зданий осветлительных и катионитовых фильтров допустимо при условии, что в течении фильтроцикла на поверхности воды образуется слой льда толщиной не более 15 мм. Галереи трубопроводов необходимо утеплить. Открытые сооружения возможно применять при кондиционировании подземных вод с температурой не ниже +5 °С, если средняя температура воздуха не ниже - 5 °С и наиболее холодной пятидневки - не ниже - 17 °С.

На генеральный план водоочистного комплекса наносят все технологические, обслуживающие и подсобные сооружения, перечисленные выше, и, кроме того, понизительную электроподстанцию, материальный склад, песковое хозяйство, котельную, мастерские, проходную. Хлораторную, совмещенную со складом хлора, размещают в наиболее низкой части территории водоочистного комплекса на расстоянии не менее 30 м от зданий. Если сооружения размещены в здании, то на генплане показывается само здание с примыкающими к нему коммуникациями. Территория, где размещены водоочистные сооружения, ограждается с соблюдением требований СНиПа.

Надежность работы водоочистного комплекса обеспечивается дублированием отдельных технологических сооружений и устройством обводных линий, позволяющих отключать то или иное сооружение или блок, пропуская воду в обход. При этом для водоочистных комплексов с подачей до 10 тыс.м<sup>3</sup>/сут. возможно отключение половины технологических сооружений,

а для комплексов большей мощности - до четверти. Кроме того, необходимо, предусматривать обводную линию от НС I подъема непосредственно в резервуары чистой воды.

На генплане должны быть показаны с указанием диаметров трубопроводы исходной и фильтрованной воды; трубопроводы подачи, отвода и оборота промышленной воды; промышленная и хозяйственно бытовая канализация, хозяйственно - противопожарный водопровод, обводной трубопровод, теплосеть, кабели и другие коммуникации.

При решении генплана водоочистного комплекса необходимо предусматривать возможность его расширения на расчетный период. С этой целью на генплане предусматривают площадку, обозначаемую пунктиром, при этом трассировка трубопроводов первой очереди должна непременно учитывать последующее расширение. Стороны здания, в направлении которых будет производиться пристройка при расширении комплекса, не должны загромождаться постройками постоянного типа, подземными сооружениями и коммуникациями. Каналы и трубы обвязки сооружений должны быть рассчитаны с запасом на возможность пропуска воды после реконструкции отдельных водоочистных сооружений или целых блоков.

При проектировании генерального плана водоочистного комплекса необходимо предусматривать минимальную протяженность путей перемещения реагентов; максимально возможную механизацию погрузочно-разгрузочных работ и смены загрузки фильтровальных аппаратов; маневренность эксплуатации как отдельных технологических сооружений, так и целых блоков.

Планировка территории комплекса должна обеспечивать отвод атмосферных осадков от всех технологических сооружений, отдельных Зданий и с площадки последних. На территории комплекса помимо дорог предусматривают устройство тротуаров и озеленение.

При решении компоновки блока основных сооружений (рис. 7.65) преследуют цель логической последовательности передачи воды от сооружения к сооружению при минимальной протяженности коммуникаций, учитывая возможность интенсификации работы отдельных сооружений или расширения комплекса.

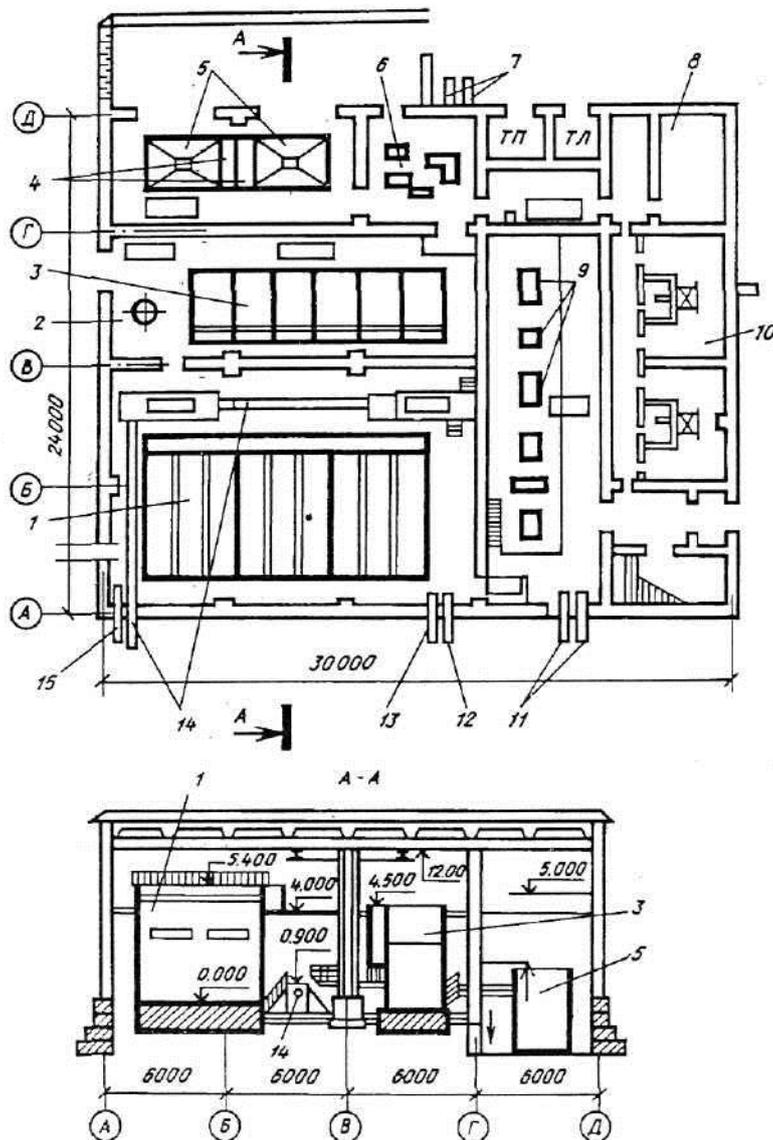
Использование технологии обработки воды в осветлителях со слоем взвешенного осадка на водоочистных комплексах производительности до 50 тыс.м<sup>3</sup>/сут позволяет разместить в одном здании все основные технологические сооружения, реагентное хозяйство, входные устройства (вариант) и НС II подъема. При этом смесители, осветлители и фильтры выделены в отдельный зал. При большой производительности водоочистного комплекса служебные помещения выносят в двухэтажное отдельное здание, входные устройства стыкуют с основными сооружениями или размещают в отдельно стоящем здании реагентного хозяйства. В этом случае состав реагентного цеха включает отделения коагулирования, флокулирования, фторирования и могут быть еще отделения углевания, известкования и др. Для удобства эксплуатации служебный корпус и реагентный цех проходными галереями соединяют с блоком основных сооружений.

При решении компоновки водоочистных комплексов по одноступенчатой схеме с контактными осветлителями при производительности до 50 тыс.м<sup>3</sup>/сут. входные устройства (микрофильтры, контактные камеры) размещают в отдельном здании, а реагентное хозяйство стыкуют с основными сооружениями либо входные устройства сочетают с реагентным хозяйством и располагают в отдельном блоке. В обоих случаях НС II подъема размещают в блоке основных сооружений.

В том случае, когда подача водоочистного комплекса составляет 50 тыс.м<sup>3</sup>/сут. и более, входные устройства размещают по оси здания. основных сооружений, а для реагентного хозяйства, служебных помещений и НС II подъема предусматривают отдельные здания.

Контактные осветлители, как правило, располагают в два ряда и предусматривают остекленные перегородки, отделяющие зеркало воды в них от остальных помещений. При

производительности 100 тыс.м<sup>3</sup>/сут и выше входные устройства и основные сооружения устраивают в два параллельно работающих блока (по очередям строительства), которые размещают в одном здании.



**Рис. 7.65. Пример компоновки водоочистных сооружений**

1 - осветлители со взвешенным осадком; 2 - смеситель; 3 - скорые фильтры; 4 - расходные баки коагулянта; 5 - растворные баки - хранилища коагулянта; 6 - насосы - дозаторы и воздуходувки; 7 - подача чистой воды потребителю; 8 - мастерские; 9 - насосная станция II подъема; 10 - бытовые помещения; II - всасывающие трубопроводы из резервуаров чистой воды; 12 - отвод чистой воды в резервуары; 13 - сброс осадка из осветлителей; 14 - сброс промывной воды от фильтров; 15 - подача исходной воды

### 32.3. ПОВТОРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОМЫВНОЙ ВОДЫ И ОБРАБОТКА ОСАДКА

В целях рационального использования воды и охраны среды обитания на водоочистных комплексах применяют повторное использование воды после промывки фильтровальных сооружений и обработку осадка от сооружений I ступени очистки и реагентного хозяйства для его утилизации.оборот промывной воды особенно эффективен при значительном

удалении водоочистных комплексов от водоисточников или при большой разнице отметок между ними.

Возможны две схемы оборота промывной воды. При двухступенчатой очистке: промывные воды от фильтров, пройдя песколовку, поступают в резервуар - усреднитель, а из него без отстаивания или после него равномерно передаются в головной узел очистных сооружений. При очистке воды только фильтрованием промывные воды через песколовку поступают в отстойники периодического действия; время отстаивания 1 ч, дозы палиакриламида 0,08 - 0,16 мг/л (меньшие дозы при обработке цветных маломутных вод). При отсутствии предварительного хлорирования оборотные промывные воды необходимо обеззараживать хлором дозой 2 - 4 мг/л.

В технологии обработки промывных вод и осадка предусматривают следующие основные сооружения: резервуары, отстойники, сгустители, накопители или площадки замораживания и подсушивания осадка. Допускается механическое обезвоживание и регенерация коагулянта из осадка.

На установках обезжелезивания воды промывные воды после фильтров подвергают отстаиванию в течение не менее 4 ч, а затем осветленную воду используют повторно. Осадок можно использовать для получения охры.

Количество резервуаров промывных вод принимают не менее двух. Объем каждого из них определяют в соответствии с графиком поступления и перекачки промывных вод. Отстойники промывных вод рассчитывают, исходя из тех же соображений. Образующийся осадок передают в сгустители на дополнительное уплотнение или на сооружения обезвоживания осадка.

Сгустители с медленным механическим перемешиванием используют для ускорения уплотнения осадка из сооружений I ступени очистки воды и из реагентного хозяйства, а также осадка из отстойников промывных вод. Габариты радиального отстойника - сгустителя принимают следующие: диаметр - до 18 м, средняя глубина - 3,5 м, уклон дна к грязевому приямку - 8°, скорость движения конца вращающейся формы - 0,015 - 0,03 м/с. - Продолжительность цикла сгущения принимают 5 - 10 ч.

Накопители предусматривают для складирования и обезвоживания осадка с удалением осветленной воды и воды, выделившейся при его уплотнении. Расчетный период передачи осадка в накопитель пригашают не менее пяти лет. В качестве накопителей используют отработанные карьеры, овраги или спланированные площадки глубиной не менее 2 м. Число секций накопителя принимают не менее двух, работающих попеременно.

Площадки замораживания для обезвоживания осадка устраивают в районах с периодом устойчивого мороза не менее 2 мес. в году с последующим его удалением через 1 - 3 года в места складирования.

Образующийся при обработке воды осадок подвергают обезвоживанию в естественных или искусственных условиях. Большинство водоочистных комплексов направляют образующиеся осадки на иловые карты или площадки, где они подвергаются испарению и вымораживанию в естественных условиях. В зависимости от географического положения очистных сооружений и сезонных климатических условий влажность осадка может уменьшиться с 98,5 - 99 до 78 - 80 % за период между наполнением карт. Нагрузка на площадки может быть уменьшена за счет возврата - осветленной части воды на очистные сооружения. Подобная рециркуляционная система не приносит экономических выгод, так как возврат воды приводит к дополнительным затратам. Однако ее функционирование оправдано необходимостью уменьшить загрязнение поверхностных вод.

В большинстве случаев площадки представляют собой земляные емкости на естественном грунтовом основании с системой водосливов отстойной воды и дренажами из труб. На практике одну карту заполняют до предела, после чего в течение 2 - 3 лет уменьшается влажность осадка на 60 - 70 %. При такой влажности осадок погружают на самосвалы и вывозят на заранее выбранную территорию.

Механическое обезвоживание осадка технически может быть применено на очистных комплексах любой производительности. В качестве аппаратов используют фильтр - прессы. Вакуум-фильтры при обезвоживании осадков от очистки маломутных вод сульфатом алюминия не обеспечивают необходимого уменьшения влажности. Для механического обезвоживания требуется предварительная подготовка осадка, которая заключается в разрушении гелеобразной структуры гидроксида алюминия. Хороший эффект дает применение извести. Использование фильтр - прессы считается экономичным для осадков вод средней цветности и мутности при дозах не более 50..70 % от массы сухого осадка.

Кислотная обработка осадка для регенерации сульфата алюминия может также применяться на водоочистных комплексах различной производительности. Кислотную обработку нецелесообразно осуществлять на очистных комплексах, которые обрабатывают высокоцветную воду. В этом случае восстановленный коагулянт будет загрязнен растворенными органическими веществами. Не следует также применять кислотную обработку для осадка от очистки высокомутных вод. Осадок от обработки таких вод имеет низкое содержание остаточного гидроксида алюминия и большой абсолютный объем. Расход 100 % кислоты в среднем составляет 3 кг на 1 кг оксида алюминия. Применение кислотой обработки имеет также ограничение и по химическим показателям исходной воды. Растворенные кислотой токсичные загрязнения из осадка будут переходить в обрабатываемую воду и накапливаться в ней.

Восстановление сульфата алюминия происходит в три этапа: уплотнение осадка до концентрации сульфата алюминия не менее 2 % (20 г/л); добавление серной кислоты до кислотности при pH = 2..3 и пребывание в растворе для увеличения уплотнения; отделение осадка от сульфата алюминия.

Восстановление сульфата алюминия до 90 % возможно в том случае, если фильтр - прессы способны выдержать сильноокислые осадки. Для облегчения транспортировки и хранения в конце цикла на фильтры - прессы подается известковое молоко. Хороший эффект дают добавки искусственных органических и неорганических флокулянтов. Считают, что осадок таким способом можно обезводить до концентрации сухого вещества 40 - 45 %.

После самых эффективных в настоящее время способов обезвоживания остается проблема осадков, так как их влажность в лучшем случае практически составляет 50 %. По мнению российских специалистов, лучшим способом остается размещение осадка по территории при соблюдении следующих условий: вода, проникающая в кек, должна испаряться; после дождя кек не должен превращаться в суспензию; безвредность веществ, содержащихся в осадке, для местности.

## РАЗДЕЛ 8. ВОДОСНАБЖЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПЛОЩАДОК

### 8.1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ. НОРМЫ И РЕЖИМ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

Вода на строительстве расходуется на хозяйственно-питьевые, производственные и противопожарные нужды. Если строительство объекта ведется в жилом поселке, то дополнительно на одного жителя поселка предусматривается расход воды 30 - 50 л/сут.

На хозяйственно-питьевые нужды на строительном объекте расходуется оката 15 - 20 л воды на одного работающего в смену. При устройстве душевых установок для рабочих расход воды увеличивается до 25 - 40 л на 1 чел. в смену. При отсутствии вблизи строящегося объекта коммунально-бытовых предприятий (бань, душевых павильонов, прачечных) и предприятий общественного питания (столовых, буфетов) строительство обеспечивается собственными стационарными или передвижными столовыми, буфетами, душевыми установками и домовыми прачечными. В этом случае норму расхода воды на хозяйственно-питьевые нужды принимают от 40 до 75 л/сут на 1 чел.

Нормы расхода воды на противопожарные нужды в каждом отдельном случае устанавливаются по согласованию с органами пожарного надзора в зависимости от огнеопасности временных и постоянных построек. Обычно принимают норму расход воды от 10 до 20 л/с на один пожар в зависимости от площади застройки (10 - 20 га и более). Для производственных нужд строительства требуется вода определенного качества и количества. К качеству воды предъявляются сравнительно невысокие требования. Однако нельзя, например, применять воду, имеющую реакцию рН ниже 6,5, а также воду, содержащую растительные масла, жиры, в больших количествах гуминовые вещества, которыми богаты воды болотного происхождения. Для снабжения строительных машин и автомобилей может применяться вода, содержащая не более 20 мг/л взвешенных веществ, с общей жесткостью не более 4,5 - 5 мг-экв/л. Вода для питания паровых котлов временных силовых станций не должна иметь жесткость более 3,5 мг-экв/л и содержать более 1 - 2 мг/л растворенного кислорода.

Вода на строительстве расходуется на приготовление строительных растворов для кирпичной и бутовой кладки, для установки блоков и отдельных элементов конструкций. Расходуется вода и для приготовления бетонов, а также для работы различных механизмов (гидропрессов, гидроэлеваторов и т.п.), для поливки грунта при его уплотнении, для охлаждения двигателя, компрессора, для мойки машин и др. подземные источники водоснабжения, причем подземным источникам следует отдавать предпочтение, так как они лишь в редких случаях требуют очистки воды.

При проектировании водопроводов целесообразно устраивать объединенную сеть с подачей воды, количество и качество которой удовлетворяло бы все нужды строительства. В отдельных случаях бывает целесообразно подавать воду на хозяйственно-питьевые нужды строительства от водопроводной сети города.

При строительных работах в определенных случаях потребление воды резко возрастает (особенно во время поливки забетонированных конструкций). Во время же отделочных работ расход воды сокращается.

### 8.2. СХЕМЫ ВРЕМЕННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПЛОЩАДОК

Для возможности составления схем временного водоснабжения строительной площадки необходимо иметь следующие исходные данные:

план района строительства в горизонталях с указанием размеров территории строительной площадки и рабочих поселков, а также с указаний выбранных источников водоснабжения;

генеральный план строительной площадки с нанесением всех основных потребителей воды;

план рабочих поселков с указанием основных улиц, проездов, а также общественных зданий, являющихся главными потребителями воды (к ним, например, относятся бани, прачечные и пр.);

данные о расходах воды по отдельным категориям потребителей.

На основании всех перечисленных материалов намечается схема временного водоснабжения строительной площадки и назначаются места расположения ее основных элементов.

Рассмотрим основные схемы временного водоснабжения строительных площадок.

I схема (рис. 8.1,а). В районе строительства имеется подземный источник водоснабжения достаточной мощности и пригодный по своим качествам для удовлетворения производственных и хозяйственно-питьевых нужд. В этом случае устраивается один общий водозабор, одна насосная станция, одна водонапорная башня и единая хозяйственно - противопожарно - производственная водопроводная сеть. Таким образом, здесь создаются весьма благоприятные условия для устройства временного водопровода.

II схема (рис. 8.1,б). В районе строительства имеются два возможных для использования источника водоснабжения: поверхностный (река) и подземный. Первый используется для удовлетворения

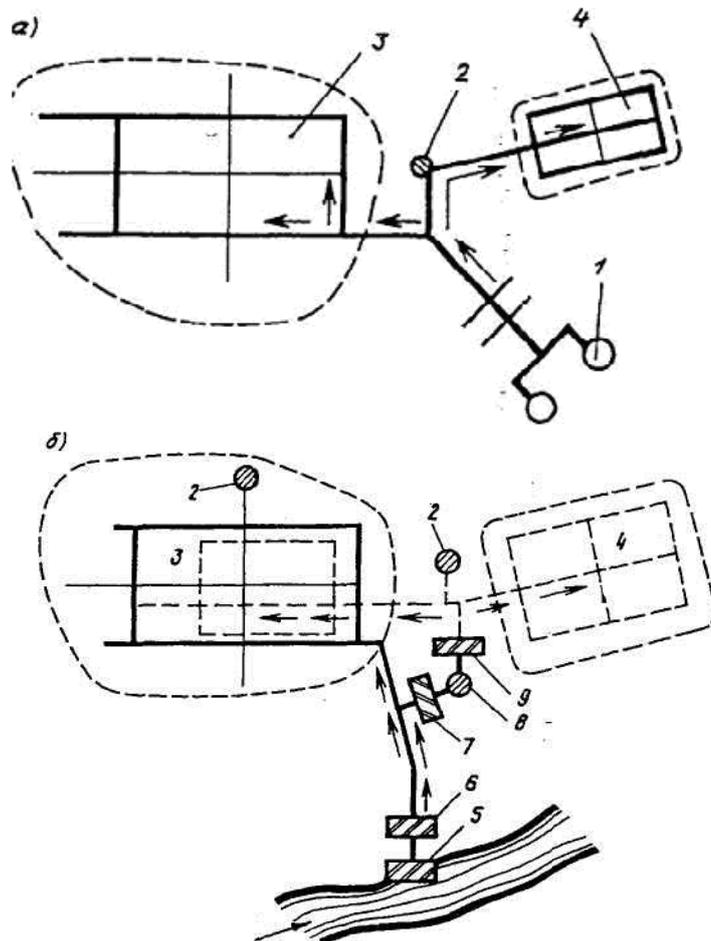
производственных нужд, а второй - для хозяйственно-питьевых и противопожарных целей, причем очистки воды, забираемой из обоих источников, не требуется. В этом случае устраивают две самостоятельные системы с отдельными водоприемниками, насосными станциями, водонапорными башнями и сетями (сетью производственного водопровода и сетью противопожарного и хозяйственно-питьевого водопровода). Для подачи хозяйственно-питьевой воды на строительную площадку, где эта вода требуется для питания рабочих, от поселкового водопровода устраивают ответвление. Недостатком этой схемы является необходимость устройства двух отдельных сетей.

III схема (рис. 8.1,б). В районе строительства имеется один поверхностный источник водоснабжения, вода которого без очистки пригодна для удовлетворения производственных нужд: использование этой воды для хозяйственно-питьевых целей возможно лишь при условии ее очистки. В этом случае устраивают общий водоприемник, общую насосную станцию I подъема, подающую неочищенную воду непосредственно той группе потребителей, которая не требует очистки воды, и на очистные сооружения. Затем для потребителей воды первой группы устраивают следующие сооружения: водовод, водонапорную башню и разводящую сеть; для потребителей воды второй группы предусматривают водоочистный комплекс, сборный резервуар чистой воды, коагуляционную станцию II подъема, водовод, водонапорную башню и разводящую сеть. Для хозяйственно-питьевой воды на строительную площадку, так же как и во II схеме, от поселкового водопровода устраивают ответвление.

Временное водоснабжение по III схеме имеет тот основной недостаток, что оно вызывает излишние затраты вследствие необходимости устройства двух сетей и очистных сооружений. Следует также отметить, что на временной очистной установке малой производительности трудно добиться нужного эффекта очистки воды.

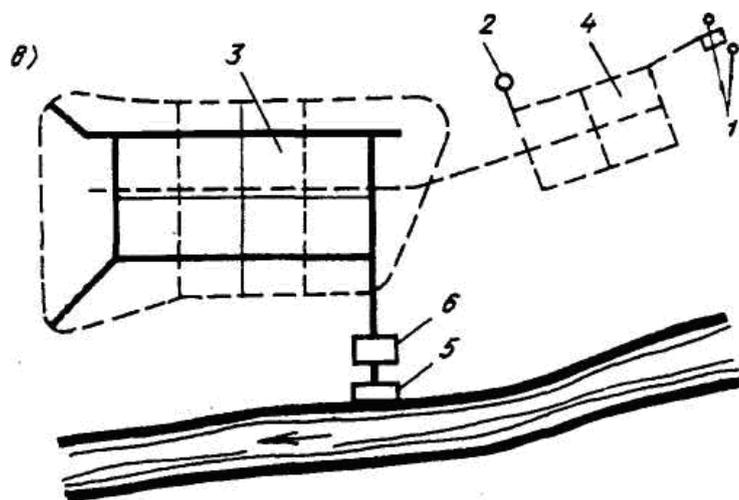
При выборе и разработке схемы временного водоснабжения строительной площадки следует всесторонне изучить вопрос о возможности увязки схемы временного водопровода с будущим постоянным водопроводом. Проектирование временного водопровода нужно производить с таким расчетом, чтобы его элементы могли войти в состав остающейся постоянной системы.

Для тушения пожаров на строительных площадках используются как производственные, так и хозяйственно-питьевые водопроводы. Более целесообразным является совмещение противопожарного водопровода с хозяйственно-питьевым, так как оба они по своему назначению должны быть разветвлены по всей строительной площадке. Что же касается воды, предназначенной для удовлетворения производственных нужд, то она подводится к ограниченному числу водоразборных точек.



**Рис. 8.1.** Схема водоснабжения строительной площадки подземной (а) и поверхностной (б) водой и схема с одновременным использованием двух водоисточников (в)

1 - трубчатый колодец с погружным насосом; 2 - водонапорная башня; 3 - стройплощадка; 4 - жилой поселок; 5 - водозабор; 6, 9 - насосные станции I и II подъема; 7 - водоочистные сооружения; 8 - резервуар



### 8.3. СЕТИ ВРЕМЕННЫХ ВОДОПРОВОДОВ

Сети временных водопроводов по своей конфигурации бывают тупиковые (или разветвленные), кольцевые (или замкнутые) и смешанные. На строительных площадках наибольшее распространение получили тупиковые и смешанные сети.

При трассировке сети водопроводов следует стремиться к тому, чтобы она имела наименьшую протяженность при обязательном условии охвата всех потребителей воды. Трассировка сети на территории рабочего поселка, для которого обычно имеется проект его планировки, не представляет особых трудностей. На территории же строительной площадки вопрос трассировки сети временных водопроводов иногда очень осложняется. Следует выбирать направления отдельных линий сети с таким расчетом, чтобы они впоследствии не были перерезаны какими-нибудь глубокими котлованами, траншеями, устраиваемыми при строительстве различных сооружений.

Сильно осложняет трассировку сетей временных водопроводов наличие на строительных площадках весьма большого числа путей построечного транспорта. Необходимо сокращать до минимума число переходов водопроводных линий под путями (если только это не ведет к резкому удлинению сети).

В тех случаях, когда водопровод несет еще и противопожарные функции, сеть должна трассироваться так, чтобы можно было осуществлять тушение пожара на всех необходимых объектах.

Запроектированная сеть временных водопроводов наносится на план с указанием всех пунктов потребления воды и расхода в каждом пункте. По известному расходу воды в каждом пункте определяют диаметр трубы, м

$$d = (4q/1000nv)^{0,5},$$

где  $q$  - расчетный расход, л/с;  $v$  - скорость движения воды в трубе, м/с (принимают равной 1,5 - 2 м/с для труб больших диаметров и 0,6 - 0,9 м/с - малых).

Сети временных водопроводов обычно сооружают из стальных труб диаметром 25 - 150 мм, реже из чугунных труб диаметром 50 - 200 мм. Особенно целесообразно применять для этих сетей полиэтиленовые и винипластовые трубы, которые выпускают диаметром от 6 до 300 мм.

Основными достоинствами пластмассовых труб являются: стойкость против электрохимической коррозии; диэлектричность, благодаря которой на них не действуют блуждающие токи; незначительная масса (винипластовые трубы в 17 раз легче чугунных и в 13 раз легче стальных, полиэтиленовые трубы в 10 раз легче чугунных и в 8 раз легче стальных, а вследствие небольшой массы пластмассовых труб работа с ними при укладке трубопроводов не представляет затруднений); достаточная механическая прочность; наличие гладкой внутренней поверхности, что обуславливает сравнительно небольшие гидравлические сопротивления; устойчивость против размораживания.

Прокладка сетей временных водопроводов может производиться открытым или закрытым способом. Закрытый способ является более рациональным, так как при этом способе трубы, во - первых, предохраняются от механических повреждений и, во - вторых, не мешают движению транспортных машин и пешеходов.

Способ укладки труб сетей временных водопроводов зависит от принятого срока эксплуатации. При сроке эксплуатации до 6 мес. трубы укладывают на глубину до 30 см или прямо на поверхность земли с защитой их от механических повреждений. При сроке эксплуатации до двух лет глубина заложения труб увеличивается до 50 - 60 см с соответствующим утеплением на зимний период (укладка в короб с утеплителем, засыпка шлаком, обертывание войлоком и толем и пр.). При сроке эксплуатации более двух лет трубы сетей временных водопроводов, так же как и постоянных, укладываются ниже линии промерзания грунта.

В условиях частого перекалывания сетей временных водопроводов находят применение переносные трубопроводы, используемые в сельском хозяйстве для дождевальных установок, а также резиновые шланги и пеньковые рукава на быстроразъемных соединениях. Иногда временные водопроводы укладывают на эстакадах.

Временные сооружения для приема воды из открытых источников следует размещать вблизи от места расположения строительства. Тип временного водоприемника выбирают с учетом профиля берега, колебаний уровня воды и геологических условий. При пологом берегу, небольшом колебании уровня воды и достаточной глубине воды в водоеме можно применять простейший водоприемник, совмещенный с насосной станцией. Напорные линии укладывают на эстакаде, которая соединяет станцию с берегом. При этом длину всасывающих линий сокращают до минимума.

Для кратковременного водоснабжения с приемом воды из реки применяют установку центробежного насоса на помосте или барже. В этом случае применяется гибкое соединение напорного патрубка насоса с напорным водоводом, учитывая перемещения станции при колебании горизонта воды.

При крутом берегу и больших колебаниях уровня воды применяют передвижные водоприемники. Насосы устанавливают в будке, которая с помощью лебедки передвигается на рельсах по мере изменения уровня в реке. Применяют также плавучие станции, которые расчаливают на якорях. Их необходимо защищать от сноса в периоды половодья и ледохода.

#### **8.4. МАЛЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОДЫ В СИСТЕМАХ ВРЕМЕННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

В странах СНГ разработан ряд технологических схем и конструктивных решений для водоочистных установок малой производительности, которые получили распространение для водоснабжения строительных площадок, объектов сельского и лесного хозяйства, транспорта и др. Все они классифицируются на две группы: установки, строящиеся непосредственно на месте использования, и установки заводского изготовления, монтируемые на месте. К числу первых относятся водоочистные комплексы с медленными фильтрами малой производительности. Они сравнительно просты в устройстве и эксплуатации и при (соответствующем качестве исходной воды) обеспечивают надлежащий эффект очистки. Однако эти сооружения требуют значительных площадей застройки, повышенных расходов фильтрующих материалов сравнительно высокой строительной стоимости. Они непригодны для обработки вод, загрязненных органическими веществами. Малогабаритные установки малой производительности (до 1000 м<sup>3</sup>/сут) подразделяют на безреагентные и реагентные с энергетической установкой и без нее, на стационарные и передвижные.

ЦНИИЭП инженерного оборудования. Мосгипротрансом. Ростовским отделением Гипроводхоза были разработаны типовые и индивидуальные проекты малых безреагентных и реагентных водоочистных комплексов, сооружаемых непосредственно на месте. В них в основном использованы традиционные методы и технологические схемы улучшения качества

воды. Подобные решения сопряжены с более высокими эксплуатационными затратами, длительным сроком и низким качеством строительства. Поэтому за последние годы все большее применение получают малые водоочистные установки, полностью или частично изготавливаемые заводским способом в металле.

Из установок безреагентного типа наибольший интерес представляют установки «Плот-фильтр», ОИСИ, АзНИИВП, «Струя» (может работать и в реагентном режиме), «Деферит», «Родник-ЗМ», «ЭОУ-НИИПМ-25М», НИМИ, а из установок реагентного типа - ДонУГИ, «Влага», ВНИИГиМ, ЦНИИ ПС. В этих аппаратах нашли применение новые технологические процессы и новые конструктивные элементы, такие, как осветление воды в тонком слое, в гидроциклонах и акустических фильтрах, фильтры (многослойные, многопоточные) с новыми фильтрующими зернистыми материалами, электрокоагуляторы, электролизеры, электродиализеры, установки бактерицидного облучения и т.п.

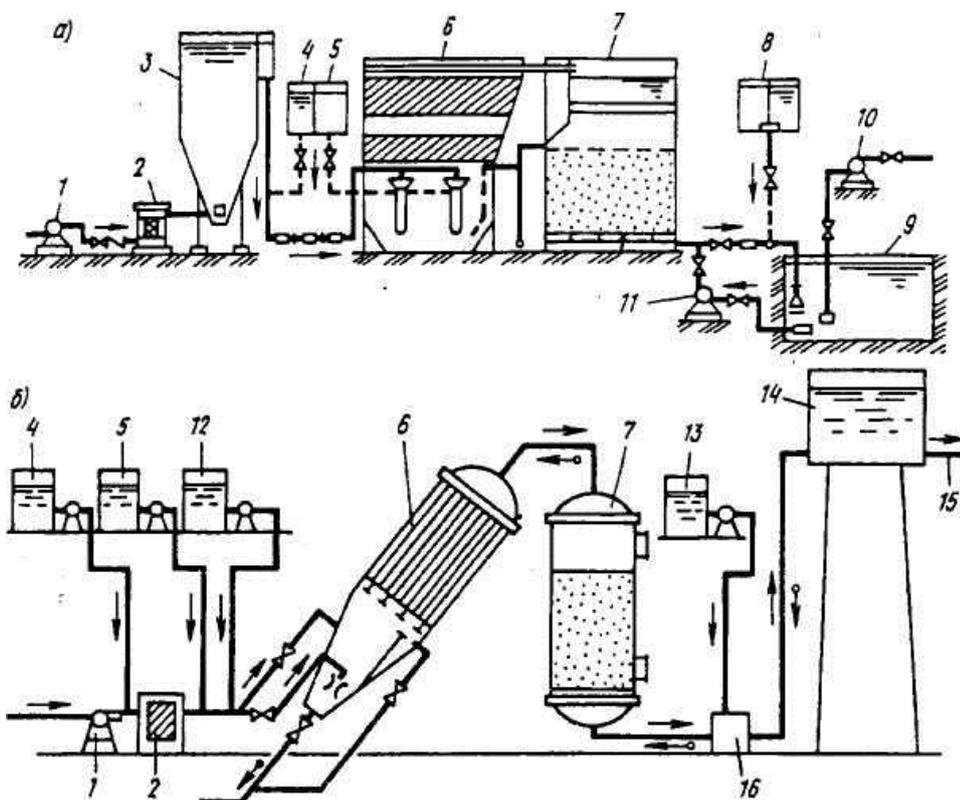
Безнапорные установки типа «Влага» (рис. 8.2,а) технологически аналогичны установкам «Струя» (рис. 8.2,б), но имеют большую производительность: 1,6; 3,2; 5,0 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Они могут быть использованы не только для осветления, обесцвечивания, дезодорации и обеззараживания воды, но и для обезжелезивания, дефторирования и ее умягчения. Установки «Влага» применимы при мутности исходной воды до 1,5 г/л; цветности до 300 градусов; содержании железа до 40 мг/л; сероводорода до 20 мг/л; окисляемости до 30 мг О<sub>2</sub>/л; рН не ниже 5,8; свободного диоксида углерода до 150 мг/л; фтора до 5 мг/л; общей жесткости до 15 мг-экв/л; карбонатной жесткости до 8 мг-экв/л.

Напорная установка "Струя" выпускается производительностью 100; 200; 400 и 800 м<sup>3</sup>/сут для вод мутностью до 5 г/л (ас водозабором осветлителем «Плот» до 15 г/л), любой цветности; с содержанием фтора до 5 мг/л; железа общего до 50 мг/л и общей жесткостью до 20 мг-экв/л.

Технологические схемы обеих установок включают сетчатые фильтры, тонкослойные отстойники, совмещенные с камерами хлопьеобразования гидравлического типа, скорые зернистые фильтры, аппараты обеззараживания воды, надлежащее реагентное хозяйство и насосные установки.

Напорная установка АзНИП ВП «Струя» (рис. 8.3,а) может быть привязана в реагентном и безреагентном варианте. В пси применены новая конструкция камеры хлопьеобразования захламленного типа и скорый фильтр с более активной фильтрующей загрузкой из клиноптилолита.

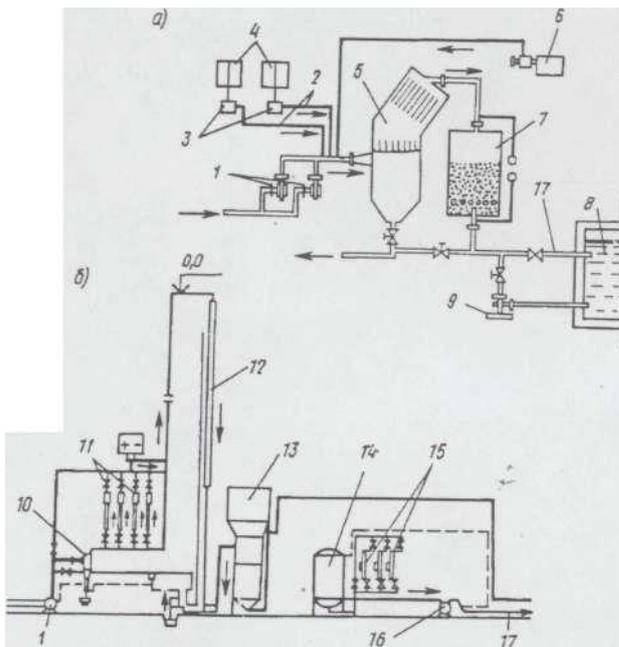
В напорной реагентной установке ВНИИГиМ (рис. 8.3,б) использованы электрокоагуляторы проточного типа и самопромывающийся скорый фильтр с антрацитовой загрузкой. В качестве предочистки применен гидроциклон, а обеззараживание воды достигается на бактерицидной установке ОВ - 1п.



**Рис. 8.2. Схемы установок заводской готовности «Влага» (а) и «Струя» (б)**  
 1 и 10 - насосы подачи исходной и обработанной воды; 2 и 7 - сетчатый и зернистый скорый фильтры; 3 - вертикальный смеситель - деаэратор; 4 и 5 - баки коагулянта и флокулянта; 6 - тонкослойный отстойник, совмещенный с конвективной камерой хлопьеобразования; 8 - аппарат обеззараживания воды; 9 - резервуар чистой воды; 11 - насос подачи промывной воды; 12 - бак известкового раствора; 13 - бак раствора поваренной соли; 14 - водонапорная башня; 15 - отвод воды потребителю; 16 - аппарат «Поток» для получения гипохлорита натрия

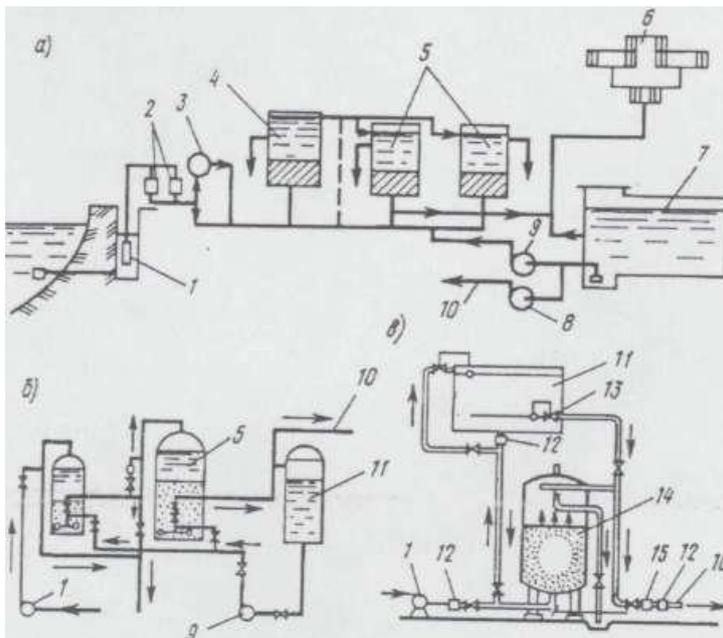
Напорные безреагентные установки БВУ - 1, ОИСИ и БНФ - НИМИ (рис. 8.4,а - в) основаны на использовании двухступенного фильтрования на аппаратах с зернистой загрузкой разной крупности. При необходимости в качестве предочистки предусматривают сетчатые фильтры или гидроциклоны.

Особого внимания заслуживает напорная передвижная установка ВНИИГиМ с собственной электростанцией «Киев - 2» (рис. 8.5) производительностью 0,5 м<sup>3</sup>/ч. Универсальная технологическая схема установки предусматривает не только осветление, обесцвечивание, обеззараживание воды, но и ее дезодорацию и опреснение. Подобные агрегаты получили распространение в водоснабжении животноводческих комплексов, на отгонных пастбищах и пр.



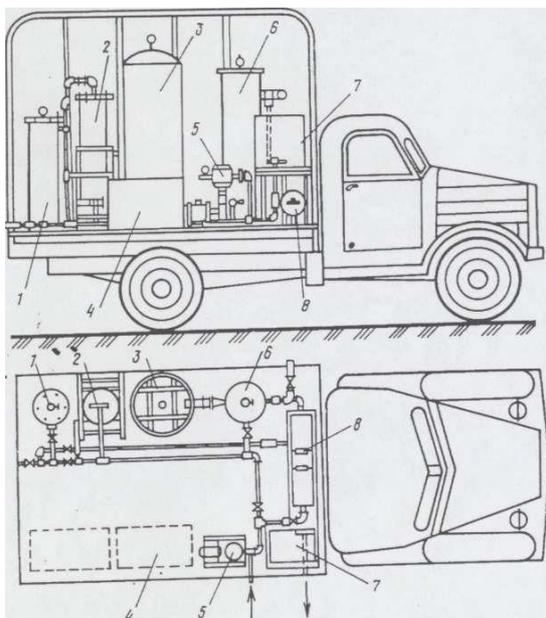
**Рис. 8.3. Схема установки ЛзНИИ ВП - Струя (а) и ВНИИГиМ (б)**

1 - насосы I подъема; 2 - подача реагентов; 3 - насос-дозатор; 4 - реагентное хозяйство; 5 - тонкослойный отстойник; 6 - электролизер для обеззараживания воды; 7 - напорный скорый фильтр; 8 - резервуар чистой воды; 9 - промывной насос; 10 - гидроциклон; // - электрокоагулятор; 12 - воздухоохладитель; 13 - самопромывающийся скорый фильтр; 14 - пневматический бак; 15 - бактерицидная установка; 16 - электронасос; 17 - отвод обработанной воды



**Рис. 8.4. Схема водоочистной установки БВУ - 1 (а), ОИСИ (б), ПНФ - НИМИ - 3 (в)**

1, 8 - насосы I и II подъема; 2 - защитные сетки; 3 - блок гидроциклонов; 4 - префильтр; 5 - скорые фильтры; 6 - установка для обеззараживания воды; 7 - резервуар чистой воды; 9 - промывной насос; 10 - отвод обработанной воды; 11 - бак промывной воды; 12 - клапаны обратные подъемные; 13 - запорные поплавковые клапаны; 14 - фильтр ВИФ - ПИМИ - 3; 15 - регулятор скорости фильтрования



**Рис. 8.5. Передвижная водоочистная установка ВНИИГиМ производитель - 0,5 м<sup>3</sup>/ч**

1.2 и 6 - угольный, ионитовый и осветлительный фильтры; 3 - водовоздушный резервуар; 4 - электростанция Киев-2; 5 - вихревой насос ВС11-1; 7 - электрокоагулятор; 8 - бактерицидная установка ОВ-111

## РАЗДЕЛ 9. СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ

### 9.1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДЫ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ. НОРМЫ И РЕЖИМЫ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

Основными объектами сельскохозяйственного водоснабжения являются жилые поселки с административными, культурно - бытовыми и школьными зданиями, животноводческие фермы и комплексы, птицефабрики, теплицы, предприятия по переработке сельскохозяйственной продукции, полевые станы, водопойные пункты на пастбищах. Вода в сельском хозяйстве расходуется на хозяйственно-питьевые нужды населения, на предупреждение и тушение пожаров на водопой скота, птиц и гигиенические нужды животноводческих ферм, птицефабрик и комплексов; полив растений в парниках и теплицах, зеленых насаждений; приготовление жидких подкормок для пропашных культур; при ремонте и обслуживании машин в мастерских, гаражах и моечных пунктах.

При проектировании водопровода необходимо знать количество и виды потребителей с учетом перспектив развития объекта, удельное водопотребление для каждого вида потребителей и режим потребления воды в течение суток. Удельное хозяйственно-питьевое водопотребление в населенных пунктах, расходы воды на поливку и пожаротушение принимаются по СНиП 2.04.02-84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» (см. п. 2.3.1). Расходы воды на содержание и поение скота, птиц и зверей на животноводческих фермах, фабриках и комплексах (табл. 9.1) пригашаются по ведомственным нормативным документам (см. «Справочник по сельскохозяйственному водоснабжению», Агропромиздат, 1991).

На животноводческих и птицеводческих фермах вода из объединенного хозяйственно - противопожарного водопровода расходуется не только на поение животных и птиц, но и на технологические, гигиенические, хозяйственные и противопожарные нужды; на полив территории в летнее время, на обеспечение водой тракторов, автомашин, различных двигателей и производственных процессов, не относящихся к технологии фермы. При механизированном удалении навоза расход воды на одну головку увеличивают на 4 - 10 л в зависимости от способа удаления.

На пастбищах нормы водопотребления меньше, чем при стойловом содержании животных, так как отсутствует расход воды на приготовление кормов и на уборку

помещений. По Л.Е.Тажобаеву, при определении объема водопотребления необходимо учитывать радиус водопоя и время года (табл. 9.2).

**Таблица 9.1**

Потребители	Удельное водопотребление, л/сут	Потребители	Удельное водопотребление, л/сут
Коровы молочные	100	Ремонтный молодняк	15
Коровы мясные	70	Свиньи на откорме	15
Быки и нетели	60	Куры	1
Телята в возрасте до 6 месяцев	20	Молодняк кур	0,5
Молодняк крупного рогатого скота в возрасте до 2 лет	30	Индийки	1,5
Лошади рабочие, верховые и рысистые	60	Молодняк индеек	0,75
Лошади племенные и кормящие матки	80	Гуси и утки	2
Жеребцы - производители	70	Молодняк гусей и уток	1
Жеребцы до 1,5 лет	45	Норки и соболи	3
Овцы, козы	10	Молодняк норок и соболей	0,15
Молодняк овец	6	Лисы и песцы	7
Хряки, матки взрослые	25	Молодняк лис и песцов	0,3
Свиноматки с поросятами	60	Кролики	3
Поросята - отъемыши	5	Молодняк кроликов	0,3
		Нутрии	7
		Молодняк нутрий	0,5
		Ветеринарная лечебница:	
		на одно крупное животное	100
		на одно мелкое животное	50

Таблица 9.2

Животные	Радиус водопоя, км		Норма водопотребления, л	
	для степных и лесостепных районов	для засушливых степных и пустынных районов	зимне-осенняя	летне-весенняя
Овцы	2,5-4	3 - 6	3 - 5	6 - 7
Крупный рогатый скот	2-4	2 - 6	40 - 50	50 - 60
Лошади	4 - 5	5 - 8	40 - 50	50 - 60
Верблюды	-	-	40 - 50	50 - 60

Норма расхода воды на один полив вручную зеленых насаждений в поселках 3 - 4 л/м<sup>2</sup>, в теплицах и парниках до 6 л/(м<sup>2</sup>сут), в фунтовых зимних теплицах до 15 л/(м<sup>2</sup>сут).

Расход воды на хозяйственные нужды ремонтных мастерских, гаражей, автотракторных парков ориентировочно следует принимать 150 м<sup>3</sup>/сут на одно хозяйство. При эксплуатации машин вода расходуется на охлаждение двигателей, на мойку и уход за ними. Нормы расхода воды машинами зависят от их типа, конструкции и мощности. Так, на заправку водой одного комбайна или трактора расходуется около 1 л/сут воды на 735,5 Вт установленных на них двигателей, а автомашины - 10 л/сут на каждую тонну грузоподъемности. На мойку автомашин грузоподъемностью до 3 т требуется 400 - 500 л воды, тракторов - 300 - 600 л; на один трактор или автомашину, ремонтируемые в мастерских - 1 м<sup>2</sup>/сут. Для ориентировочных подсчетов расхода воды на предприятиях пользуются нормами потребления воды, м<sup>3</sup>, на единицу продукции:

Молочный завод на 1 т молока .....	10 - 15
Сыроваренный или маслодельный завод на 1 т продукции	35 - 40
Консервный завод на 1 т перерабатываемых овощей	10 - 15
Мясокомбинат на 1 т живой массы скота .....	6 - 10
Хлебопекарня на выпечку 1 т хлеба .....	1,7

На промышленных предприятиях помимо производственных нужд необходимо учитывать хозяйственно-питьевые потребности в воде рабочих исходя из нормы 25 и 45 л в одну смену на 1 чел. соответственно в холодных и горячих цехах.

При проектировании систем водоснабжения кроме регулярного обеспечения расхода на хозяйственно-питьевые нужды необходимо учесть и расчетный расход воды на пожаротушение. Число возможных одновременных пожаров на территории населенного пункта устанавливают в зависимости от размеров этого пункта, плотности и характера его застройки. Нормы расхода воды для наружного пожаротушения в поселках указаны в СНиП. Расчетную продолжительность пожара при определении запаса воды, необходимого для его тушения, следует принимать равной 3 ч. Пожарный запас воды должен храниться в резервуарах чистой воды всегда.

Максимальный срок восстановления неприкосновенного противопожарного запаса воды должен быть не более 72 ч.

На внутреннее пожаротушение с помощью пожарных кранов расход воды определяют: в производственных зданиях - из расчета двух пожарных струй с подачей не менее 2,5 л/с; во вспомогательных зданиях - из расчета одной пожарной струи с подачей не менее 2,5 л/с; в зданиях складов - из расчета двух пожарных струй с подачей не менее 2,5 л/с каждая; в птичниках для клеточного содержания птиц, оборудованных сгораемыми клетками, при вместимости здания между двумя противопожарными стенами более 25 тыс. птиц предусматривают противопожарный водопровод с подачей пожарной струи расходом 2,5 л/с.

Расход воды в сельских населенных пунктах, на животноводческих, звере - и птицефермах и промышленных комплексах неравномерен как в течение суток и месяцев, так и в течение года. Для проектирования водопроводных сооружений необходимо знать расчетный расход системы и принятый для нее режим работы. При этом основным условием, определяющим режим работы системы водоснабжения и ее элементов, является режим потребления воды. Режим расходования воды населением определяется рядом факторов бытового характера, связанных с режимом жизни и трудовой деятельности людей. Колебание суточных расходов зависит также и от погоды, режима работы на производстве, чередования праздничных, выходных и рабочих дней, проведения культурных, спортивных и других мероприятий. В течение суток наблюдаются значительные колебания часовых расходов, вызываемые сменой дня и ночи, условиями работы и случайными явлениями.

Из суточного графика колебания часовых расходов воды (рис. 9.1), выраженных в процентах от суточного расхода, для сельских населенных пунктов видно, что водопотребление снижается до минимума ночью и максимально повышается в дневные часы. В течение каждого часа водопотребление также колеблется, но при расчетах водопроводной распределительной сети его принимают постоянным.

Неравномерность часового водопотребления на фермах в основном определяется принятым распорядком дня. Выражается она коэффициентом часовой неравномерности - отношением максимального часового расхода к среднечасовому, т.е.  $K_c = q_{4 \text{ max}}/q_{4 \text{ min}}$  которые представляет собой коэффициент запаса к среднесуточному расходу и не

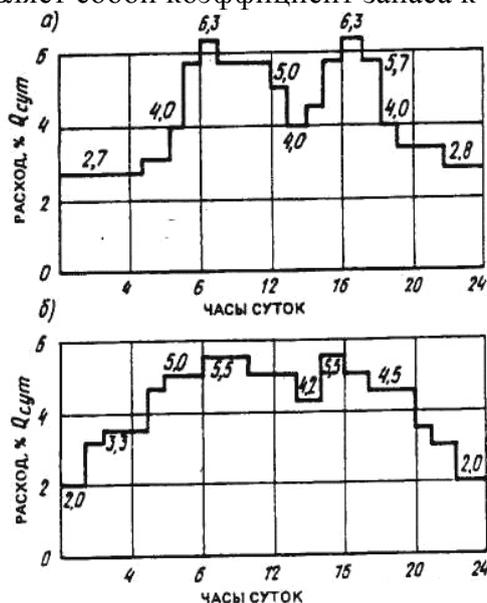


Рис. 9.1. Типовые графики водопотребления в сельском населенном пункте при часовом коэффициенте неравномерности 1,5 (а) и 1,3 (б)

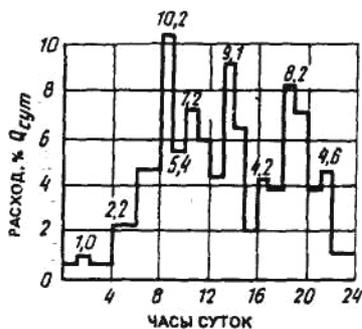


Рис. 9.2. Типовой график водопотребления на ферме крупного рогатого скота при  $K_c = 2,0$

отражает режима водопотребления в течение суток. Примерный расчетный график почасового водопотребления на ферме крупного рогатого скота с автопоением и механизированным доением представлен рис.9.2.

Принятые за основу типовые графики водопотребления в последующем уточняют с учетом местных условий.

## 9.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ

Обычно системы водоснабжения проектируют минимум в две очереди (две стадии) строительства. Первая очередь строительства предусматривается для удовлетворения потребителей водой в течение расчетного периода (5 - 10 лет) без реконструкции и расширения системы водоснабжения, а вторая очередь - для удовлетворения потребителей водой после истечения первого расчетного периода в течение 10 - 20 лет. При этом система водоснабжения частично расширяется, реконструируется и начинает работать на полную пропускную способность.

Для определения размеров водопроводных сооружений, диаметров трубопроводов, подбора насосов, а также установления экономических показателей системы водоснабжения необходимо знать не только режим водопотребления, но и расчетные расходы воды.

Для каждого расчетного периода общее расчетное число потребителей определяется по данным, получаемым от специальных организаций, сельсоветов и т.д. После этого потребителей разделяют на группы, характеризующиеся одинаковыми нормами и режимом водопотребления. Произведение общего числа потребителей в каждой группе и подобранных по таблицам средних суточных норм водопотребления для данной группы дает суммарный суточный расход воды. Полный суточный расход, м<sup>3</sup>/сут, т.е. полное суточное водопотребление, есть сумма суточных расходов групп водопотребителей:

$$Q_{сут.ср.} = (q_1 N_1 + q_2 N_2 + \dots + q_n N_n) / 1000$$

где  $q_1, q_2, \dots, q_n$  - нормы водопотребления по группам, л/сут;  $N_1, N_2, \dots, N_n$  - число потребителей по группам с одинаковыми нормами и режимом водопотребления.

Для надежной работы системы водоснабжения ее рассчитывают по максимальному суточному расходу  $Q_{сут.мах}$ . Отклонение максимального суточного расхода от среднесуточного определяют коэффициентом суточной неравномерности  $K_{сут.мах}$ , который показывает, во сколько раз расчетный  $Q_{сут.мах}$  превышает среднесуточный  $Q_{сут.ср.}$ . Опыт эксплуатации показывает, что иногда система работает на минимальный суточный расход  $Q_{сут.мин}$  поэтому при расчете систем водоснабжения требуется знать эту величину. Аналогично изложенному выше в этом случае вводят коэффициент неравномерности  $K_{сут.мин}$ . Для сельских населенных пунктов коэффициенты суточной неравномерности рекомендуется принимать:  $K_{сут.мах} = 1,5$ ,  $K_{сут.мин} = 1,3$ .

Расчетные суточные расходы  $Q_{сут}$ , м<sup>3</sup>/сут, можно определить по формулам:

$$Q_{сут.мах} = K_{сут.мах} Q_{сут.ср.}$$

$$Q_{сут.мин} = K_{сут.мин} Q_{сут.ср.} \quad (9.2)$$

Средний часовой расход, м<sup>3</sup>/ч, в сутки максимального водопотребления будет:

$$q_{ч.ср} = Q_{сут.мах} / 24 = K_{сут.мах} Q_{сут.ср.} / 24 \quad (9.3)$$

Водозаборы, насосные станции I подъема, очистные сооружения и водоводы рассчитывают на среднечасовой расход воды. Водопроводные сети и водонапорные башни рассчитывают на максимальный часовой расход с учетом колебаний часовых расходов. При расчете указанных сооружений необходимо знать как максимальные, так и минимальные часовые расходы воды, определяемые по формулам:

$$q_{ч.мах} = K_{ч.мах} Q_{сут.мах} / 24$$

$$q_{ч.мин} = K_{ч.мин} \cdot Q_{сут.мин} / 24 \quad (9.4)$$

где  $K_{ч.маx}$  и  $K_{ч.мин}$  - коэффициенты часовой неравномерности.

Следует отметить, что чем меньше объект водоснабжения и чем однороднее состав водопотребителей, тем больше коэффициент часовой неравномерности. В населенных пунктах коэффициенты часовой неравномерности можно определить по формулам:

$$K_{ч.маx} = \alpha_{маx} \beta_{маx}$$

$$K_{ч.мин} = \alpha_{мин} \beta_{мин} \quad (9.5)$$

Таблица 9.3

Число жителей, тыс. чел.	$\beta_{маx}$	$\beta_{мин}$	Число жителей, тыс. чел.	$\beta_{маx}$	$\beta_{мин}$
До 1	2	0,1	4	1,5	0,2
1,5	1,8	0,1	6	1,4	0,25
2,5	1,6	0,1	10	1,3	0,4

Коэффициент  $\alpha$  зависит от местных условий и в среднем принимается:  $\alpha_{маx} = 1,2 - 1,4$ ;  $\alpha_{мин} = 0,4 - 0,6$ . Коэффициент определяют в зависимости от числа жителей (табл. 9.3).

По результатам наблюдений за системами водоснабжения установлено, что коэффициенты часовой неравномерности  $K_{ч.маx}$  имеют следующие числовые значения: для жилой зоны благоустроенных поселков 1,4 - 1,6; для небольших поселков 1,8 - 2; для молочных ферм крупного рогатого скота 1,9; для отдельных коровников 2,2 - 2,5.

Поскольку условно принято, что в течение часа расход воды остается постоянным, то расчетный секундный расход, л/с, в час максимального и минимального водопотребления будет:

$$q_{ч.маx} = Q_{ч.маx} 1000/3600 = Q_{ч.маx} / 3,6; \quad q_{ч.мин} = Q_{ч.мин} / 3,6 \quad (9.6)$$

При проектировании системы обводнения пастбищ и полей, в частности пунктов водопотребления, в первую очередь определяют расчетный расход воды, подаваемой системой обводнения для хозяйственно-питьевых и других нужд. Расчетный расход воды для обводнения и водоснабжения определяется по приведенным выше формулам при использовании установленных норм водопотребления и числа водопотребителей. Для обводнения пастбищ и полей кроме суточных, часовых и секундных расходов необходимо определять годовое водопотребление. Зная индивидуальные нормы водопотребления животных и других потребителей, можно определить как секундные, часовые и суточные расходы, так и годовые:

$$W_{год} = \sum_t (W_1 + W_2), \quad (9.7)$$

где  $m$  - число суток нахождения животных и других потребителей на пастбище и в поле в году;  $W$ , и  $W_t$  - среднесуточное водопотребление соответственно для хозяйственно-питьевых и производственно - технических нужд.

При выполнении технико-экономических расчетов необходимо знать суммарное годовое количество воды, приходящейся на 1 га и расходуемой всеми водопотребителями при выполнении всех полевых операций (согласно рабочему графику). Этот суммарный годовой расход называется годовой полевой нормой производственного водоснабжения полевого и пастбищного участков, зшлятых данных сельскохозяйственной культурой и животными.

### 9.3. СИСТЕМЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Сельскохозяйственное водоснабжение отличается от коммунального и производственного рассредоточенностью водопотребителей и сезонной цикличностью сельскохозяйственного производства. Сельскохозяйственные работы ведутся на обширных! земельных угодьях, в связи с чем населенные пункты и различные производственные объекты рассредоточены по всей территории землепользования. Кроме того, для выполнения многих производственных операций водопотребители вынуждены перемещаться по территории. В результате усложняются системы водоснабжения, увеличиваются расстояния для передачи воды и затрудняется эксплуатация водопроводов.

Производство и обработка сельскохозяйственных продуктов связаны с агроклиматическими факторами, подверженными частым изменениям, и особенностями растениеводства и животноводства. Это приводит к циклическому чередованию сельскохозяйственных работ, что влечет за собой неравномерность водопотребления и, следовательно, неравномерную по сезонам года загрузку систем водоснабжения, увеличение объема регулирующих емкостей, ухудшение технико-экономических показателей систем. Указанные особенности оказывают существенное влияние на выбор схем сельскохозяйственного водоснабжения, типов и конструкций сооружений, гидравлических машин и аппаратов, на их взаимное расположение.

Рассредоточенность сельскохозяйственных объектов обуславливает устройство систем водоснабжения с различной степенью централизации, которые можно разделить на три типа: децентрализованные, централизованные и комбинированные.

Децентрализованная система снабжает водой каждый хозяйственный или производственный центр обособленно вне зависимости от других объектов. На каждом объекте предусматривается локальный водопровод, а для небольших водопотребителей - местные устройства водоснабжения.

Централизованная система снабжает водой все сельскохозяйственные объекты по единому водопроводу. При этом водопроводные сооружения, предназначенные для забора, очистки и транспортирования воды, рассчитываются на подачу воды всем потребителям, находящимся на территории действия системы.

Комбинированная система снабжает водой отдельные группы водопотребителей централизованно с помощью групповых водопроводов; другие объекты могут иметь локальное водоснабжение.

Централизованные системы водоснабжения, подающие воду по трубам в населенные пункты и в различные сельскохозяйственные объекты в пределах совхоза или колхоза, района, области, региона, называют групповыми сельскохозяйственными водопроводами. Системы группового водоснабжения имеют ряд преимуществ перед локальными: при строительстве системы группового водоснабжения можно применять индустриальные методы; при эксплуатации вся система водоснабжения обслуживается одним эксплуатационным управлением; работу отдельных узлов групповых водопроводов можно регулировать автоматически из одного диспетчерского пункта. Групповые водопроводы выгоднее отдельных водопроводов, поскольку такая система водоснабжения значительно удешевляет потребляемую воду.

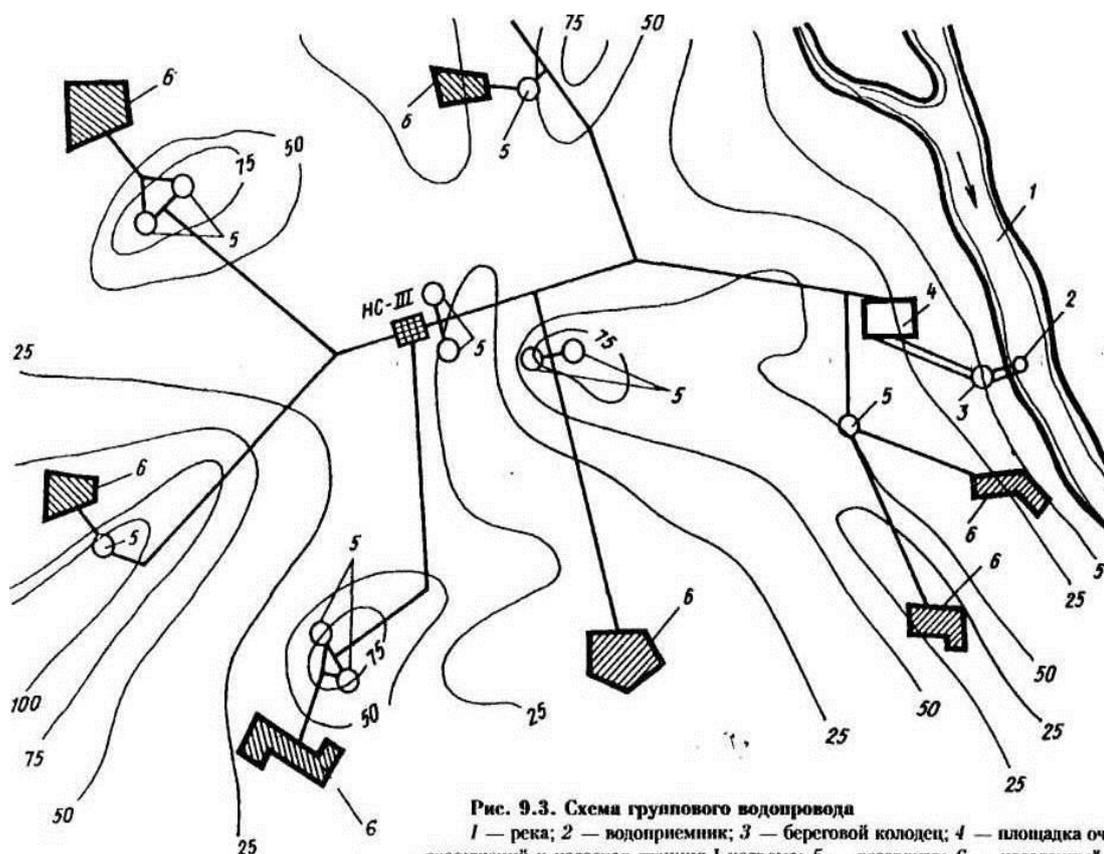


Рис. 9.3. Схема группового водопровода  
 1 — река; 2 — водоприемник; 3 — береговой колодец; 4 — площадка очистных сооружений и насосная станция I подъема; 5 — резервуар; 6 — населенный пункт

В зависимости от района обслуживания групповые сельскохозяйственные водопроводы делят на хозяйственные (колхозные, совхозные), межхозяйственные, областные и т.д. В СНГ строительство групповых сельскохозяйственных водопроводов получило широкое развитие. Современные групповые сельскохозяйственные водопроводы представляют собой сложные инженерные системы, в состав которых входит весь комплекс основных и вспомогательных водопроводных сооружений и узлов, ремонтно-эксплуатационные базы и т.д. Системы групповых сельскохозяйственных водопроводов эксплуатируются с наиболее постоянной нагрузкой и, следовательно, с наиболее высоким коэффициентом использования, так как перемещение водопотребителей из одного центра в другой не изменяет общего баланса водоснабжения.

Групповые водопроводы (рис. 9.3) сооружают: при глубоком залегании пресных подземных вод, когда экономически нецелесообразно бурить трубчатые колодцы для каждого объекта; в районах с дефицитом пресных вод, перебрасывая их из водообеспеченных районов; когда расположение водопотребителей агропромышленных комплексов (АПК) делает целесообразным сооружение для них общих водопроводных сооружений; в районах распространения вод повышенной минерализации, опреснение которых нецелесообразно. Групповые водопроводы отличаются большой протяженностью водоводов, на которых предусматривают запасные резервуары, насосные станции и водонапорные башни. Для подачи воды к удаленным объектам предусматривают прокладку ответвлений. Отдельные поселки имеют двусторонне питание водой, что повышает надежность водообеспечения. На насосных станциях перекачки предусматривают запасные резервуары чистой воды, в которых содержатся 10 - 20 % суточного потребления, противопожарный и аварийный запасы.

Групповые водопроводы обычно подают воду в резервуар поселковой насосной станции или водонапорное сооружение, поэтому при трассировке, выборе объектов водоснабжения и расчете водопроводной сети поселка, АПК или фермы, питающихся от

группового водопровода, возникают проблемы, связанные с местными системами сельскохозяйственного водоснабжения.

Стоимость ремонтных и профилактических работ для групповых водопроводов ниже по сравнению с местными сельскохозяйственными водопроводами. К недостатку групповых водопроводов следует отнести высокие капиталовложения на 1 м<sup>3</sup> подаваемой воды. Они вдвое выше, чем для местных сельскохозяйственных водопроводов. Такое же соотношение и по себестоимости 1 м<sup>3</sup> воды.

В систему сельскохозяйственного водоснабжения включены: водоприемные сооружения, предназначенные для получения воды из природных источников; насосные станции, создающие необходимый напор для передачи воды на очистные сооружения, в аккумулирующие емкости или потребителям; сооружения по улучшению качества воды; резервуары и водонапорные башни, являющиеся запасными и регулируемыми емкостями; водоводы и водораспределительные сети, предназначенные для передачи воды к местам ее распределения и потребления.

Вследствие рассредоточения сельскохозяйственных водопотребителей и пониженной плотности застройки воду приходится транспортировать на большие расстояния, поэтому стоимость коммуникаций по транспорту воды составляет около 70 % всей стоимости сооружений водоснабжения.

В сельскохозяйственном водоснабжении используют три способа передачи воды: по трубам, по открытым каналам и передвижным транспортным средствам. Наиболее распространенным, совершенным и дешевым является способ транспортирования воды по трубам. К его преимуществам следует отнести: отсутствие потерь воды; подачу воды под необходимым напором непосредственно потребителям; отсутствие нагревания или замерзания воды. Передачу воды по каналам применяют при ее транспортировании в большом количестве на значительные расстояния. Перевозку воды транспортными средствами используют для снабжения небольших хозяйств, в основной сезонного действия.

В водопроводах транспортирующие и распределительные функции выполняют:

водоводы - транзитные трубопроводы, передающие воду от насосной станции I или II подъема до распределительной сети объекта;

магистральные трубопроводы - основные, наибольшего диаметра линии распределительной сети, обеспечивающие равномерность распределения воды в централизованной системе водоснабжения;

разводящие трубопроводные сети - разветвленные системы трубопроводов, предназначенные для распределения воды по территории населенного пункта, животноводческого комплекса, фермы и т.п.

Системы сельскохозяйственного водоснабжения обычно выполняются объединенными, т.е. они удовлетворяют хозяйственно-питьевые, производственные и противопожарные нужды.

В зависимости от рельефа местности и высотного расположения водоисточника относительно снабжаемого объекта система сельскохозяйственного водоснабжения может быть с механическим водоподъемом или самотечной. В первом случае отметка уровня воды в источнике находится ниже отметки территории водоснабжаемого объекта; во втором - отметка места расположения водозабора превышает отметку территории водопотребителя, в результате чего создается естественный перепад, используемый в системе водоснабжения для транспортирования воды самотеком и получения требуемого напора в трубопроводах.

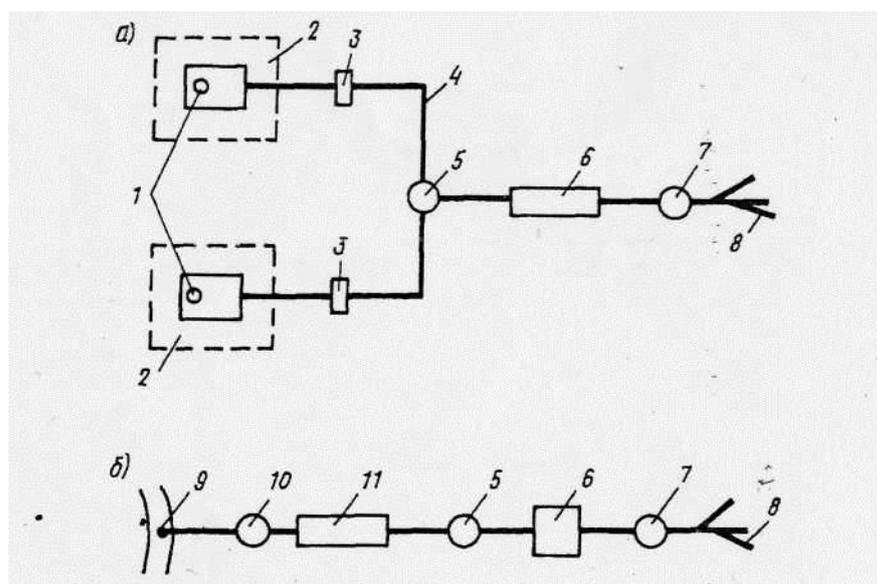
По надежности подачи воды системы водоснабжения подразделяют на три категории. К первой категории относят системы водоснабжения предприятий и крупных населенных пунктов (более 50 тыс.чел.), где не допускаются перерывы в подаче воды, при этом расчетные расходы могут снижаться до 30 % в течение 3 сут. Системы водоснабжения промышленных предприятий и населенных пунктов с числом жителей

менее 50 тыс.чел., а также групповые сельскохозяйственные водопроводы, в которых допускаются перерывы в подаче воды до 5 ч или снижение подачи воды на 30 % в течение месяца, относят ко второй категории, а к третьей - системы водоснабжения мелких промышленных предприятий и населенных пунктов с числом жителей до 500 чел., где допускаются перерывы в подаче воды до 1 сут или снижение подачи воды на 30 % в течение одного месяца.

Последовательность расположения основных водопроводных сооружений показана на общей схеме системы хозяйственно-питьевого водоснабжения сельских населенных пунктов (рис. 9.4,а), питаемой из поверхностного источника. Взаимное расположение отдельных сооружений системы водоснабжения и их состав могут быть различными в зависимости от назначения, местных природных условий, требований водопотребителя или по экономическим соображениям. Это положение иллюстрируется схемой системы водоснабжения сельского населенного пункта, использующей подземную воду (рис. 9.4,б).

При выборе схемы водоснабжения необходимо располагать сведениями об имеющихся природных водоисточниках в районе проектирования, о водопотреблении, знать требования, предъявляемые к качеству воды, иметь данные о напоре, под которым она должна подаваться потребителям, и т.д. В значительной степени схема водоснабжения зависит от выбранного водоисточника (поверхностный или подземный), расстояния, на которое он удален от водопотребителя, его мощности, качества воды и т.п.

Для обеспечения надежности систем сельскохозяйственного водоснабжения I и II категории там, где это целесообразно и возможно, дублируют отдельные сооружения схемы. Например, устраивают не менее двух трубчатых или шахтных колодцев при получении подземных вод; водоприемный колодец поверхностного водозабора устраивают из двух секций, укладывают не менее двух самотечных и двух всасывающих труб, не менее двух ниток водоводов, закольцовывают водораспределительную сеть и т.д.



**Рис. 9.4. Схемы водоснабжения из подземного (а) и поверхностного (б) источников**

1 - трубчатый или шахтный колодец с насосом; 2 - зона санитарной охраны; 3 - установка обеззараживания воды; 4 - водовод; 5 - сборный резервуар; 6 - насосная станция II подъема; 7 - водонапорная башня; 8 - водораспределительная сеть; 9 - водоприемник; 10 - береговой колодец, совмещенный с насосной станцией II подъема; 11 - водоочистные сооружения

#### **9.4. ВОДОСНАБЖЕНИЕ СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ**

Местные водопроводы сельских населенных пунктов при заборе подземных вод редко имеют очистные сооружения. Вода из водоисточника передается либо в водонапорное сооружение, либо непосредственно в водораспределительную сеть. Широко распространенная схема местного сельскохозяйственного водопровода состоит из водозабора, насосов, водовода, водонапорной башни, водораспределительной сети. Промышленность серийно выпускает металлические башни с баками емкостью 25; 50 и 100 м<sup>3</sup> для объектов с суточным водопотреблением до 300 м<sup>3</sup>. В новых сельских поселках, застраиваемых многоэтажными домами, водонапорные башни получают очень высокими и дорогостоящими. В этих условиях целесообразно применять прямоточные (безбашенные) системы водоснабжения, когда вода подается насосами непосредственно в распределительную сеть.

При условии надежного электроснабжения применяют автоматизированные насосные установки с гидроаккумулятором - воздушным котлом, которые исключают водонапорные башни. Промышленность выпускает автоматические установки типа ВУ, которые агрегируются одним или двумя насосами подачей до 20 м<sup>3</sup> /ч, и автоматические установки типа АНУ, агрегируемые тремя насосами с суммарной подачей до 160 м<sup>3</sup>/ч. При использовании подземных вод с повышенной минерализацией или повышенным содержанием фтора, железа, марганца схема усложняется за счет установки кондиционирования воды, резервуаров для хранения чистой воды и насосной станции II подъема. В этом случае в резервуарах помимо регулирующего запаса воды предусматривается противопожарный запас и объем воды на собственные нужды водоочистой установки.

В системах сельскохозяйственного водоснабжения с суточным расходом воды свыше 300 м<sup>3</sup> предусматривают обычно двухступенчатый подъем с хранением противопожарного запаса в резервуаре при насосной станции II подъема (рис. 9.4, в).

При использовании поверхностных вод, требующих обычно очистки, схема сельскохозяйственного водопровода усложняется за счет водозаборного сооружения, водоочистных сооружений, резервуара чистой воды, насосной станции II подъема. В районах с недостатком пресных вод приходится использовать для водоснабжения минерализованные воды. При этом для питьевых нужд воду опресняют, а на хозяйственно - бытовые цели расходуют воду с повышенной минерализацией.

Водопроводные сети поселков в плане подразделяют на кольцевые, тупиковые и комбинированные. Основная магистраль водопроводной сети должна быть связана с главным потребителем кратчайшим расстоянием. В случае аварии на каком - либо участке сети должно быть обеспечено бесперебойное питание всех потребителей.

Тупиковые линии водопроводов допускается применять для подачи воды на хозяйственно-питьевые нужды при диаметре труб не более 100 мм; для подачи воды на производственные нужды, если допускается перерыв в водоснабжении на период ликвидации аварии: для подачи воды на противопожарные цели при длине линии до 200 м. В поселках с числом жителей до 3 тыс.чел. при расходе воды на наружное пожаротушение до 10 л/с и при устройстве противопожарных резервуаров, при наличии водонапорной башни или контррезервуара в конце тупика допускаются тупиковые линии длиной более 200 м.

Выше указывалось, что кольцевые сети более надежны, так как обеспечение потребителей водой двустороннее, но и более дорогие, как в строительстве, так и при эксплуатации.

На практике получили распространение комбинированные сети, которые включают в себя как кольцевые, так и тупиковые участки.

## **9.5. ВОДОСНАБЖЕНИЕ АПК И ФЕРМ**

Водопровод АПК или фермы должен подавать воду для выполнения ряда технологических операций, хозяйственно-питьевых нужд и тушения пожара. Его проектирование основано на суточных и годовых графиках водопотребления для каждого цеха и всего комплекса в целом. Технологические процессы на предприятии осуществляются в определенной последовательности, соответствующей движению сырья, начиная от момента его поступления и кончая выпуском готовой продукции. Суммируя годовые графики водопотребления отдельных технологических линий АПК получают общий суммарный годовой график расхода воды всего предприятия. Обычно на АПК проектируется объединенная система водоснабжения: вода для всех нужд поступает по одному водопроводу. Реже принимают комбинированную систему, при которой в одном водопроводе объединяют хозяйственно-питьевой и производственный, или хозяйственно-питьевой и противопожарный, или производственный и противопожарный водопроводы.

По территории АПК производственная вода может быть подана по одной или двум независимым друг от друга разводящим сетям. При одной сети в трубах циркулирует только обратная вода, а свежая подается для восполнения потерь и для некоторых операций, после которых она не поступает в оборот. При двух отдельных сетях производственного водоснабжения по одной циркулирует обратная вода, а по другой подается свежая. Выбор системы водоснабжения обосновывается местными условиями и технико-экономическим расчетом.

На животноводческих, птице - и зверофермах обычно предусматривают объединенную хозяйственно-питьевую и противопожарную систему водоснабжения. Расчетные расходы водопотребления определяют в соответствии с приведенными в СНиП нормами. Расчетный расход воды на наружное пожаротушение в животноводческих комплексах или на фермах в зависимости от их размеров колеблется от 5 до 20 л/с при продолжительности тушения пожара 3 ч. Расход воды в животноводческих комплексах по производству молока (1300 голов) составляет 380 м<sup>3</sup> /сут, по производству говядины (10 тыс. голов) - 600 и по производству свинины (108 тыс. голов) - 3000 м<sup>3</sup>/сут.

Наиболее распространенная система механизированного водоснабжения животноводческих ферм состоит из водозабора с насосной станцией, разводящей сети и регулирующих сооружений (водонапорные башни и резервуары для хранения противопожарного запаса воды). При необходимости система водоснабжения дополняется сооружениями по очистке и обеззараживанию воды.

На рис. 9.5 показана система водоснабжения животноводческой фермы на 400 маточных коров. Из трубчатого колодца вода забирается погружным электронасосом и подается в водонапорную башню и разводящую сеть животноводческих ферм. Объем бака водонапорной башни для животноводческих ферм должен быть равен 12 - 15 % расчетного расхода воды на ферме. Камеры насосных станций на трубчатых колодцах, напорные и регулирующие сооружения, а также смотровые колодцы на водопроводной сети выполняют из сборных железобетонных конструкций, водопроводную сеть - из асбестоцементных и полиэтиленовых труб.

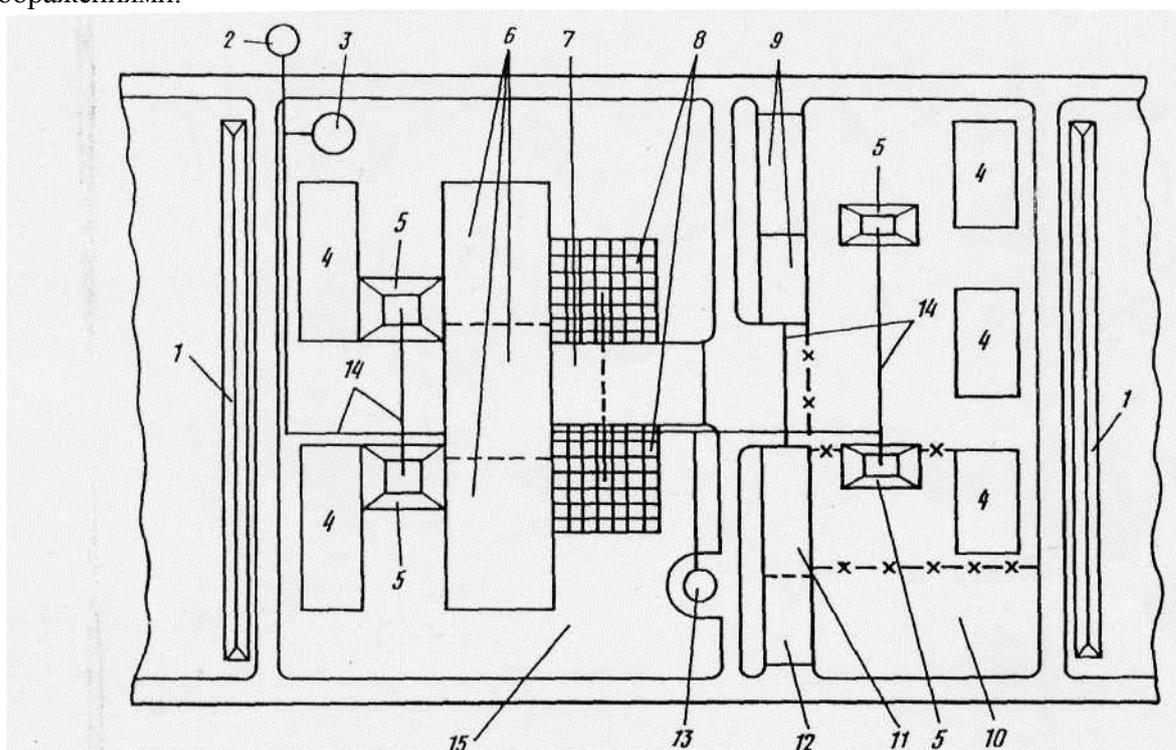
Для водоснабжения животноводческих ферм с расходом воды до 40 м<sup>3</sup> / сут. часто используют близко расположенные от поверхности подземные воды, забираемые шахтными колодцами. В этих случаях для подъема воды применяют автоматические пневматические установки.

## **9.6. ПОЛЕВОЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ**

Полевые работы (пахота, внесение удобрений, сев, уборка урожая и пр.) сопряжены с расходом воды. Люди, животные и машины на полях получают воду из полевых пунктов водоснабжения, которые, как правило, совмещают с полевыми станами. Некоторым водопотребителям, работающим на полях, вода из полевых пунктов водоснабжения доставляется в бочках или автоцистернах. Расход воды для полевого водоснабжения зависит

от характера сельскохозяйственных работ и числа занятых на них водопотребителей. При выпасе продуктивного скота на палевом участке по стерне необходимо учесть и его водопотребление. По всем этим данным определяют число потребителей и строят годовой график водопотребления для данного палевого пункта водоснабжения.

В состав палевого водоснабжения входят водоисточник, водозаборное устройство, водоподъемное оборудование, водоочистная установка, запасной бак, водоразборные устройства. Для устройства полевого водоснабжения сельскохозяйственные угодья разбивают на палевые участки, а затем на палевые клетки. Каждый участок должен иметь свой отдельный полевой пункт (центр) водоснабжения. Размеры полевого участка устанавливают в зависимости от его конфигурации и от вида возделываемых на нем сельскохозяйственных культур с таким расчетом, чтобы длина линии обслуживания не превышала наивыгоднейшей допустимой дальности перевозки воды, определяемой технико-экономическими соображениями.



**Рис. 9.5. Схема водоснабжения животноводческой фермы на 400 коров**

1 - склад грубых кормов; 2 - выгульные дворы; 3 - силосные траншеи; 4 - групповые поилки; 5, 6 - помещения для коров; 7 - доильные помещения; 8 - преддоильные площадки; 9 - помещения для ремонтного молодняка; 10 - хозяйственный двор; 11 - телятник; 12 - родильное отделение; 13 - шахтный или трубчатый колодец; 14 - водонапорная башня; 15 - водопровод

Инженерное решение схемы водоснабжения полевых пунктов связано с размерами участков, устанавливаемыми технико-экономическими расчетами, и характером проводимых работ (пахота, посевы, внесение удобрений, уборка урожая и пр.). При больших размерах полевых участков целесообразно устраивать дополнительные пункты водоснабжения на них, что значительно сократит расходы на перевозку воды потребителям. Практически полевые пункты водоснабжения устраивают в местах расположения постоянных и временных полевых бригад, при этом размещение пунктов диктуется требованиями сельскохозяйственного производства.

Полевой пункт водоснабжения пахотных земель размещают на линии обслуживания, ближе к центру площади палевого участка. Такое размещение рекомендуется при равномерном расходе воды по площади, поскольку в этом

случае воду можно доставлять потребителям по кратчайшему пути. При неравномерном расходовании воды на участке землепользования полевой пункт водоснабжения следует размещать ближе к местам наибольшего водопотребления. Количество воды, необходимое для подачи на каждую линию обслуживания, зависит от площади, обслуживаемой сельскохозяйственными машинами, и механизмами.

Решение схемы водоснабжения полевого стана зависит главным образом от источника водоснабжения. При наличии подземных вод питьевого качества с жесткостью не более 7 мг-экв/л система водоснабжения полевого стана будет состоять из водозабора с водоподъемной установкой, регулирующей емкости, водоразборной колонки. При использовании источников, вода которых требует очистки, обеззараживания и умягчения, в схему водоснабжения включается установка по улучшению качества воды. Обычно для этой цели используют передвижные установки по очистке, обеззараживанию и умягчению воды, которые монтируются на автоприцепах и обслуживают несколько полевых станов. Возможен также подвоз воды на автоприцепах и подъем воды с помощью ветроэнергетических установок.

## 9.7. ПАСТБИЩНОЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ

Для пастбищного водоснабжения следует выбирать рациональную, экономически обоснованную схему, обеспечивающую эффективное использование местных водных ресурсов, устройство водозабора и водоподъема, транспортирование воды и распределение ее по пунктам водоснабжения, т.е. по водопойным пунктам на пастбищах.

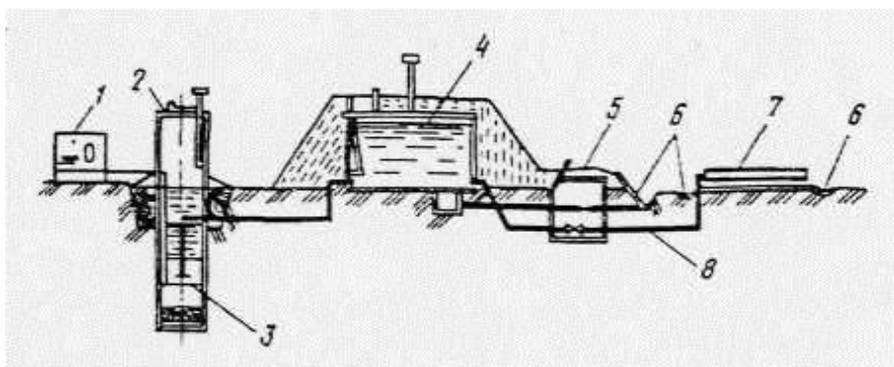
Водоснабжение пастбищ в технологическом отношении имеет ряд особенностей, связанных с особенностью их использования и кормовыми ресурсами. Некоторые трудности возникают при механизации водоподъемов, поскольку пастбища не в полной мере обеспечены надежными источниками энергии, необходимыми для работы насосных установок. Число пунктов водоснабжения и схемы их размещения зависит от площади угодий и радиуса обслуживания, а также от числа водопотребителей и продолжительности их пребывания на пастбищах. Например, в степных районах продолжительность этого периода не превышает 200 сут, а в высокогорных районах - 80 сут; остальное время года животные находятся на других пастбищах.

Обводнение безводных пастбищ имеет первостепенное значение в деле развития животноводства, особенно овцеводства. Для правильной организации водоснабжения территория пастбищ должна быть разбита на выпасные участки и загоны. При этом на каждом выпасном участке необходимо иметь отдельный водопойный пункт, который по возможности должен быть устроен в центре участка в легкодоступном и не заболоченном месте. Радиус водопоя  $R$ , или расстояние от водопойного пункта до границы выпасного участка, можно принять равным  $0,5 l$  (где  $l$  - длина выпасного участка).

Пастбищное водоснабжение представляет собой комплекс сооружений обычного сельского водопровода: водоисточник, водозаборное и водоподъемное устройство, запасные резервуары для воды и водопойную площадку с корытами. Водопойные пункты должны быть устроены на открытом месте с удобным подходом для животных, чтобы меньше вытаптывались пастбища. Кроме того, расстояние от места выпаса до водопойного пункта должно быть таким, чтобы животные не переутомлялись при подходе к водопою во избежание снижения продуктивности.

Расход воды на водопойных пунктах невелик, поскольку обычно они обслуживают до 2000 овец, или 250 голов крупного рогатого скота, либо 250 лошадей. В среднем расход воды составляет 5 - 20 м<sup>3</sup>/сут. Режим водопотребления на водопойных пунктах не стабилен. Например, летом скот выгоняют на водопой в день 2 - 3 раза, т.е. суточная потребность в воде покрывается за два - три приема, зимой, наоборот скот на пастбище потребляет значительно меньше воды.

На рис. 9.6 приведена схема водоснабжения водопойного пункта с забором воды из шахтного колодца с помощью насосной установки, обеспечиваемой электроэнергией от передвижной электростанции или от ветронасосной установки. Насосной установкой вода нагнетается в запасной резервуар, откуда по трубопроводу подается на водопойную площадку, где размещены водопойные корыта. Водопойные корыта могут быть кирпичными, бетонными и из других материалов. Вокруг корыт устраивают мощеную площадку. Длина и ширина водопойного корыта, а также его высотное расположение зависят от числа и размеров животных, прикрепленных к данному водопойному пункту. Конструкция корыт бывает самая разнообразная. Корыта двухстороннего подхода устанавливают на водопойной площадке небольшой длины.



**Рис. 9.6. Схема водоснабжения водопойного пункта**  
 1 - электростанция; 2 - шахтный колодец; 3 - погружной насос; 4 - резервуар; 5, 6 - подающие трубы; 7 - колодец; 8 - водосточная канава; 9 - водопойное корыто

Необходимую (рабочую) длину корыта определяют по формуле

$$L = Nlt/T,$$

где  $N$  - число животных в стаде или гурте;  $l$  - длина участка корыта, занимаемая одним животным при водопое, м;  $t$  - продолжительность водопоя одного животного, мин;  $T$  - допускаемая продолжительность водопоя всего стада, как для овец, так и для рогатого скота, равная 60 мин.

При одностороннем подходе длина участка корыта, занимаемая одним животным, для крупного рогатого скота равна 0,6 - 0,75 м, для овец и коз 0,35 м, при двухстороннем подходе крупного рогатого скота 0,4 - 0,5 м, для овец и коз 0,25 м. Глубина корыта принимается 0,35 - 0,4 м, ширина поверху 0,35 м и понизу 0,25 м. Высота расположения корыта над землей для крупного рогатого скота составляет 0,4 - 0,6 м, а для овец и коз 0,3 - 0,4 м.

Для водопоя скота допускается использовать воду непитьевого качества (минеральный состав воды должен отвечать требованиям, указанным в СНиПе). Для обслуживающего персонала вода должна отвечать требованиям ГОСТ 2874 - 82 «Вода питьевая». Норма водопотребления принимается 30 - 40 л/сут на одного человека. Из этого количества на питье и приготовление пищи расходуется 10 - 15 %, т.е. требуется в день на человека 3 - 6 литров воды питьевого качества. Если учесть, что бригада животноводов, обслуживающих отару, гурт, стадо, состоит из 3 чел., то с учетом коэффициента семейности количество потребляемой воды питьевого качества составит около 100 л/сут. В зависимости от наличия источников с водой питьевого качества решается схема снабжения водой животноводов и членов их семей. В ряде случаев эту воду приходится подвозить от источников питьевой воды, расположенных на расстоянии от стойбища до 40 км. Деминерализация воды, ее очистка и обеззараживание в необходимых случаях производятся с помощью передвижных установок, обеспечивающих группу животноводческих бригад.

На пустынных пастбищах южных районов для подъема воды из шахтных и трубчатых колодцев можно использовать возобновляемые источники энергии (ветер и

солнце). При применении водоподъемных установок с приводом от ветра и солнечных генераторов необходимо предусматривать резервную емкость для воды на период безветрия или пасмурной погоды. Эти источники энергии можно также применять для опреснения воды.

В ряде районов СНГ не представляется возможным для каждого водопойного пункта иметь свои источники водоснабжения. В таких случаях строят пастбищные групповые системы водоснабжения, базирующиеся на надежном источнике воды, расположенном на значительном расстоянии от группы водопойных пунктов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамов Н.Н.** Водоснабжение. - М.: Стройиздат, 1982.
2. **Абрамов Н.Н.** Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды. - М.: Стройиздат, 1972. - 288 с.
3. **Абрамов Н.Н., Поспелова М.М., Сомов М.А.** Расчет водопроводных сетей. - М.: Стройиздат, 1983. - 304 с.
4. **Аюкаев Р.И.** Интенсификация работы водоочистных фильтров и совершенствование метода их расчета. - Петрозаводск: ПГУ, 1985.
5. **Белан А.Е.** Технология водоснабжения. - Киев: Наукова думка, 1985.
6. **Вдовин Ю.И.** Водоснабжение на Севере. - Л.: Стройиздат, 1987. - 296 с.
7. **Вишневский К.П.** Переходные процессы в напорных системах водоподдачи. - М.: Агропромиздат, 1986. - 136 с.
8. **Журба М.Г.** Пенополистирольные фильтры. - М.: Стройиздат, 1992.
9. **Иванов Е.Н.** Противопожарное водоснабжение. - М.: Стройиздат, 1987. - 297 с.
10. **Ильин Ю.А.** Расчет надежности подачи воды. - М.: Стройиздат, 1987. - 316 с.
11. **Карелин Ф.Н.** Обессоливание воды обратным осмосом. - М.: Стройиздат, 1988.
12. **Кострикин Ю.М., Мещерский Н.А., Коровин О.В.** Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления. - М.: Энергоатомиздат, 1990.
13. **Ливчак И.Ф., Воронов Ю.В.** Охрана окружающей среды. - М.: Стройиздат, 1988.
14. **Люттов А.В.** Проектирование и расчет водопроводных сетей в условиях северной климатической зоны. - Красноярск, Изд - во Красноярского ун - та, 1990. - 158 с.
15. **Москвитин Б.А., Мирончик Г.М., Москвитин А.С.** Оборудование водопроводных и канализационных сооружений. - М.: Стройиздат, 1984.
16. **Николадзе Г.И.** Улучшение качества подземных вод. - М.: Стройиздат, 1987.
17. **Николадзе Г.И.** Технология очистки природных вод. - М.: Высшая школа, 1987.
18. **Образовский А.С., Ереснов Н.В., Ереснов В.Н.** Водозаборные сооружения для водоснабжения из поверхностных источников. - М.: Стройиздат, 1976. - 268 с.
19. **Очистка природных и сточных вод.** - М.: Высшая школа, 1994.
20. **Плотников Н.А., Алексеев В.С.** Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод. - М.: Стройиздат, 1990. - 254 с.
21. **Порядин А. Ф.** Устройство и эксплуатация водозаборов. - М.: Стройиздат, 1984.
22. **Пособие по проектированию сооружений для очистки и подготовки воды (к СНиП 2.04.02 - 84).** - М.: НИИ К ВОВ, 1989.
23. **Прозоров И.В., Николадзе Г.И., Минаев А.В.** Гидравлика, водоснабжение и канализация. - М.: Высшая школа, 1990.
24. **Сомов М.А.** Водопроводные системы и сооружения. - М.: Стройиздат, 1988.
25. **Стерман Л.С., Покровский В.Н.** Физические и химические методы обработки воды на ТЭС. - М.: Энергоатомиздат, 1991.
26. **СНиП 2.04.02 - 84.** Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. - М.; Стройиздат 1980. - 120 с.
27. **Тажигаев Л.Е., Усенко В.С., Николадзе Г.И.** и др. Сельскохозяйственное водоснабжение. - М.: Агропромиздат, 1992.
28. **Трегубенко Н.С.** Водоснабжение водоотведение. - М.; Высшая школа, 1989.

29. **Фейзиев Г.К.** Высокоэффективные методы умягчения, опреснения и обессоливания воды. - М.: Энергоатомиздат, 1988.
30. **Шевелев Ф.А., Орлов Г.А.** Водоснабжение больших городов зарубежных стран. - М.: Стройиздат, 1987.
31. **Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф.** Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб. - М.: Стройиздат, 1984. - 116 с.
32. **Яковлев С.В., Иванов Е.Н., Прозоров И.В.** и др. Рациональное использование водных ресурсов. - М.: Стройиздат. 1991.
33. **Энциклопедия.** Инженерное оборудование зданий и сооружений. - М.: Стройиздат, 1994.

