

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ**

*На правах рукописи  
УДК 696.2*

**ПИРНАЗАРОВ ИЛХОМ ИСЛОМОВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ САМОРЕГУЛИРУЮЩИХСЯ  
АККУМУЛЯТОРОВ ТЕПЛОТЫ ДЛЯ СИСТЕМ СОЛНЕЧНОГО  
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

**диссертация**

**на соискание академической степени магистра по специальности**

**5А340403 - Теплогазоснабжение, вентиляция, кондиционирование воз-  
духа и охрана воздушного бассейна**

**Рекомендовано к защите  
Руководитель отдела магистрату-  
ры**

\_\_\_\_\_ доц.М.С.Саидов

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г

**Зав. кафедрой к.т.н., доцент  
Буриев Э.С. \_\_\_\_\_**

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г

**Научный руководитель: к.т.н.,  
проф.Рашидов Ю.К. \_\_\_\_\_**

**ТАШКЕНТ – 2015**

Утверждаю

Зав. кафедрой ПСЭИК  
к.т.н., доц.Буриев Э.С.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

## ЗАДАНИЕ ПО ПОДГОТОВКЕ И НАПИСАНИЮ МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Магистерская диссертация по теме: «Повышение эффективности саморегулирующихся аккумуляторов теплоты для систем солнечного теплоснабжения»

название (с указанием материалов конкретных организаций)

утверждённая приказом ректората института от «28» 11 2013г.

за номером 2/319 по кафедре ПСЭИК

за слушателем Пирназаров Илхом Исломович

научный руководитель проф.Рашидов Ю.К., к.т.н., с.н.с.

Ф.И.О., занимаемая должность, учёная степень, учёное звание

должна быть подготовлена и представлена к предварительной защите

на кафедру 30.05.2015 г.

число, месяц, год

В работе будут использованы: Авторефераты, справочная литература, КМК, статьи журналов, отчёты о научно-исследовательской работе,

Практические, балансовые и др. материалы, стат. данные др. ведомств и т.п. за годы

материалы семинаров, обзорные проспекты, брошюры, каталоги

публикации, труды и т.д. законодательные и нормативные акты, инструкции и т.п.

современного оборудования, руководство по проектированию, монтажу и эксплуатации систем солнечного горячего водоснабжения

В работе предусматривается: Выполнение аналитического обзора научно-аналит. таблицы, группировочные таблицы, графики, схемы, диаграммы, математические модели и т.п.

технической и патентной литературы, проведение анализа основных конструктивных решений тепловых аккумуляторов для систем солнечного теплоснабжения, рассмотрение эффективности стратификационных аккумуляторов теплоты, описание раздачи воды перфорированным водораспределителем постоянного сечения при действии объемных сил, отбора воды перфорированным водозаборным коллектором постоянного сечения при действии объемных сил, расчета водораспределителя саморегулирующегося аккумулятора теплоты, особенности расчета водораспределителя саморегулирующегося аккумулятора теплоты термосифонной системы, описание экспериментальной установки и методика проведения исследований, результаты экспериментальных исследований

В работе предусматривается изложение следующих групп вопросов:

1-я группа Анализ эффективности существующих тепловых аккумуляторов для систем солнечного теплоснабжения. Цель и задачи исследований  
название

2-я группа Исследование саморегулирующегося аккумулятора теплоты  
название

3-я группа Экспериментальные исследования саморегулирующегося аккумулятора теплоты  
название

Задание выдано \_\_\_\_\_  
число, месяц, год

Научный руководитель проф.Рашидов Ю.К...  
подпись, Ф.И.О., дата

Задание принял слушатель Пирназаров Илхом Исломович

График завершения магистерской диссертации в первоначальном варианте

Глава I. Анализ эффективности существующих тепловых аккумуляторов для систем солнечного теплоснабжения. Цель и задачи исследований  
название первой главы диссертации в первоначальном плане и сроки представления

Глава II. Исследование саморегулирующегося аккумулятора теплоты  
название второй главы диссертации в первоначальном плане и сроки представления

Глава III Экспериментальные исследования саморегулирующегося аккумулятора теплоты  
название третьей главы диссертации в первоначальном плане и сроки представления

Предварительная защита диссертация на кафедре 30.05.2015 г.  
срок, дата, год

Задание выдано проф., к.т.н.  
научный руководитель магистерской диссертации

Рашидов Юсуф Каримович  
Ф.И.О.

Подпись, дата

Задание принял Пирназаров Илхом Исломович  
Ф.И.О., слушателя,

подпись дата

# СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
<b>Введение</b> .....	5
<b>Глава I АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ СОЛНЕЧНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ</b> ..	8
1.1. Основные конструктивные решения тепловых аккумуляторов для систем солнечного теплоснабжения .....	8
1.2. Оценка эффективности стратификационных аккумуляторов теплоты .....	22
1.3. Цель и задачи исследования .....	25
<b>Выводы по I главе</b> .....	26
<b>Глава II ИССЛЕДОВАНИЕ САМОРЕГУЛИРУЮЩЕГОСЯ АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОТЫ</b> .....	27
2.1. Раздача воды перфорированным водораспределителем постоянного сечения при действии объемных сил .....	27
2.2. Отбор воды перфорированным водозаборным коллектором постоянного сечения при действии объемных сил .....	40
2.3. Расчет водораспределителя саморегулирующегося аккумулятора теплоты .....	45
2.4. Оценка эффективности температурного расслоения воды в аккумуляторах. Коэффициент стратификации .....	47
2.5. Особенности расчета водораспределителя саморегулирующегося аккумулятора теплоты термосифонной системы .....	53
<b>Выводы по II главе</b> .....	57
<b>Глава III ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ САМОРЕГУЛИРУЮЩЕГОСЯ АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОТЫ</b> ..	59
3.1. Описание экспериментальной установки и методика проведения исследований ..	59
3.2. Результаты экспериментальных исследований .....	62
<b>Выводы по III главе</b> .....	65
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> ..	66
<b>Список использованной литературы</b> ..	68
<b>Приложения</b> .....	76

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** В настоящее время, в связи с ростом цен на традиционные энергоносители, вновь начинает увеличиваться внимание к использованию солнечной энергии. При этом новый интерес к системам солнечного горячего водоснабжения весьма актуален в свете Указа Президента Республики Узбекистан «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии»<sup>1</sup>.

Вовлечение в энергетический баланс Республики Узбекистан нетрадиционных видов энергии, в первую очередь солнечной энергии, представляет значительный научный и практический интерес. Использование экологически чистой солнечной энергии, поступающей в республике Центрально-Азиатского региона практически круглый год: особенно важно для теплоснабжения, как наиболее реальной и подготовленной в техническом отношении области практического использования солнечной энергии, на нужды которого тратится почти 25 % энергии природных топливных ресурсов.

Исследованиям по использованию солнечной энергии большое внимание уделяется в Узбекистане. Использование энергии Солнца сможет обеспечить экономию топливных ресурсов народному хозяйству нашей страны.

К числу устройств, где использование энергии Солнца может быть наиболее эффективным, относятся системы солнечного теплоснабжения, которые вынуждены функционировать в условиях неравномерности поступления солнечной радиации. Для выравнивания графиков выработки и потребления тепловой энергии в системах солнечного теплоснабжения обычно применяются многосекционные тепловые аккумуляторы, снабженные сложной автоматикой, регулирующей распределение теплоносителя по секциям аккумулятора в зависимости от температуры их нагрева в солнечных коллекторах. С другой стороны КПД самих солнечных коллек-

---

<sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан УП-4512 от 1.03.2013 г. «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии».

торов также зависит от температуры теплоносителя, поступающей из тепловых аккумуляторов. Таким образом, тепловые аккумуляторы оказывают существенное влияние на эффективность всей системы солнечного теплоснабжения.

Расширение масштабов использования энергии солнца для целей теплоснабжения сдерживается сравнительно высокими удельными капиталовложениями в сооружение гелиосистем по сравнению с системами, работающими от традиционных источников. Одной из причин этого является относительно высокая стоимость оборудования теплового аккумулирования солнечной энергии и сложность обеспечения его эффективной работы в условиях неравномерного поступления солнечной радиации без применения сложной и дорогостоящей автоматики. Поэтому разработка саморегулирующихся тепловых аккумуляторов для систем солнечного теплоснабжения является актуальной задачей.

**Цель работы** – повышение эффективности саморегулирующихся тепловых аккумуляторов для систем солнечного теплоснабжения.

Исходя из поставленной цели, **задачами исследования** явились:

1. Анализ существующих конструктивных решений тепловых аккумуляторов для систем солнечного теплоснабжения и выявление наиболее перспективных.
2. Разработать конструкции саморегулирующихся стратификационных аккумуляторов теплоты,
3. Исследовать физические явления и установить закономерности теплогидродинамики в новых устройствах, определить их гидравлические и энергетические характеристики.
4. Разработать физико-математические модели работы саморегулирующихся устройств и проверить их адекватность экспериментальным данным.
5. Выявить закономерности процессов саморегулирования в тепловых аккумуляторах для систем солнечного теплоснабжения;

**Объект исследования.** Аккумуляторы теплоты для систем солнечного теплоснабжения.

**Предмет исследования.** Процессы саморегулирования в тепловых аккумуляторах.

**Методы исследования.** Для достижения цели и решения поставленных задач будет использован комплексный метод, включающий аналитические и экспериментальные численные исследования.

**Научная новизна работы** будет заключаться в разработке физико-математической модели саморегулирующегося стратификационного аккумулятора теплоты, составленной с учетом теплогидродинамических эффектов обусловленных неизотермичностью потока в перфорированных водораспределительных и водозаборных коллекторах и действием архимедовых сил; в получении аналитических зависимостей для расчета критического параметра условной щели перфорированных водораспределительных и водозаборных коллекторов, а также физико-математической модели процесса зарядки аккумулятора, учитывающей степень температурного расслоения воды.

**Практическая значимость работы** будет предложены конструкции односекционных саморегулирующихся стратификационных аккумуляторов тепла, повышающих эффективность использования солнечной энергии на 15-20%.

**Основные результаты выполненной работы.** Основные результаты выполненной работы опубликованы и доложены на научных конференциях: Архитектура ва қурилиш муаммолари. Магистрантларнинг XII-XIII-анъанавий анжумани илмий мақолалар тўплами, ТАҚИ, Тошкент, 2014-2015 гг.

**Заключение и краткое обобщенное определение предложений.** В работе разработаны конструкции односекционных саморегулирующихся аккумуляторов теплоты с перфорированными водораспределителями и получены аналитические зависимости для их расчёта.

# **ГЛАВА I. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ СОЛНЕЧНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ**

## **1.1. Основные конструктивные решения тепловых аккумуляторов для систем солнечного теплоснабжения**

В настоящее время развитие систем солнечного теплоснабжения у нас в стране и за рубежом находится на стадии экспериментальной проверки. Для повышения эффективности систем солнечного теплоснабжения проводятся научные исследования по разработке рациональных технических средств теплового преобразования и использования солнечной энергии, отработке и отбору наиболее рациональных способов теплового аккумуляирования, оптимизации основных параметров системы.

Исследованию использования солнечной энергии для целей теплоснабжения посвящены работы зарубежных учёных Даффи Дж. А., Бекмана У.А., Мак-Вейга Д., Зоколя С., Твайделла Дж., Уэйра А. и др.

В России исследования проводились проф.Тарнижевским Б.В., проф. Казанжаном Б.И., доц. Смирновым С.И., доц.Харченко Н.В., Никифоровым В.А. и др.

В Узбекистане достигнуты определенные успехи благодаря работам акад.Умарова Г.Я., акад. Захидова Р.А., проф. Авезова Р.Р., д.т.н. Клычева Ш.И., проф.Рашидова Ю.К., к.т.н. Насонова Е.А., к.т.н. Крюковой Т.Н. и др.

В этих исследованиях тепловому аккумуляированию солнечной энергии уделено особое внимание, так как эффективность работы систем солнечного теплоснабжения во многом определяется эффективностью работы тепловых аккумуляторов.

Значительные возможности энергообеспечения зданий открываются благодаря внедрению солнечных коллекторов для систем горячего водоснабжения (ГВС) и отопления. Правильно рассчитанная солнечная система при эффективном аккумулировании может покрыть до 50-60% энергетических затрат, расходуемых обычно на горячее водоснабжение. При этом ориентация расположения солнечного коллектора и угол наклона по отношению к движению Солнца играют немаловажную роль в теплосъеме коллектора и должны учитываться при проектировании.

Известны различные способы получения тепловой энергии за счет аккумуляции солнечной энергии. Это, в первую очередь, водотрубные, солнечные коллекторы различной конструкции, расположенные на кровле или на земле возле здания. Это и аккумулирующие тепло водотрубные системы, расположенные под кровельным покрытием, системы – использующие в качестве теплоносителя воздух и др. Все эти системы, вместе с отличительными преимуществами, имеют и один существенный недостаток – высокую стоимость и, как следствие, длительные сроки окупаемости. Кроме того, следует учитывать и распределенную весовую нагрузку от коллектора, заставляющую усиливать кровлю здания.

Рекомендуемые и единственно пригодные в настоящее время для широкого использования плоские коллекторы типа «горячий ящик», как правило, устанавливаются неподвижно. Реальные условия применения и расчетов таких солнечных систем часто заключаются в том, что ориентация коллекторов привязывается к ориентации здания, на котором они устанавливаются и, следовательно, для решения задачи оптимизации необходимо найти зависимость величин прихода радиации от всех влияющих параметров и затем по заданным условиям найти оптимальный угол наклона коллектора.

Величина плотности прямой и диффузной, солнечной радиации зависит от широты местности, прозрачности атмосферы, характеристик земной поверхности, а также от времени суток и времени года. По этой причине величина годового прихода солнечной радиации на  $1 \text{ м}^2$  земной по-

верхности существенно варьируется для разных регионов Узбекистана и имеет статистический характер распределения. Однако вполне очевидной определяющей тенденцией при этом является увеличение плотности солнечной радиации и количества солнечных дней в направлении с севера на юг с соответствующим ростом годового прихода солнечной радиации на 1 м<sup>2</sup> земной поверхности.

Приведенная в [6] методика позволяет проводить вычисления с большей точностью при решении задач моделирования пространственных характеристик солнечных систем.

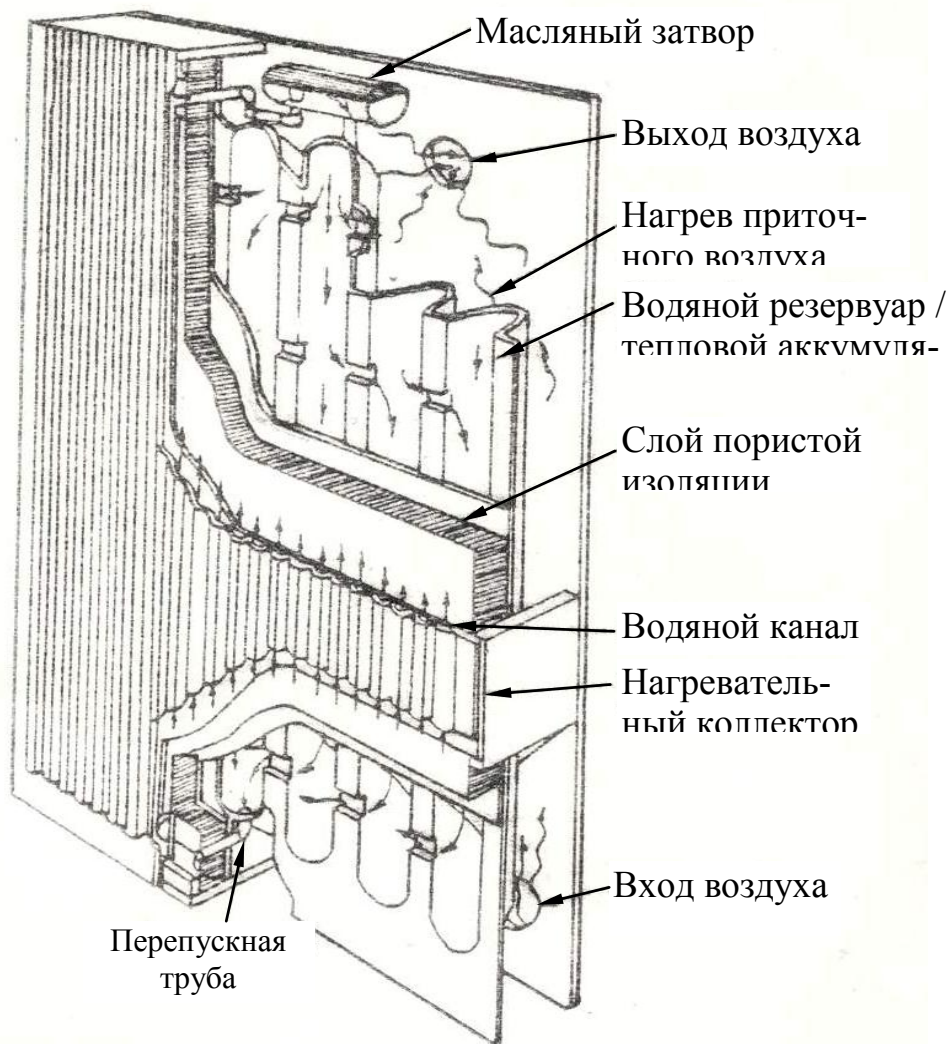
В статье [4] приводится техническая характеристика солнечной панели, разработанной в Массачусетском технологическом институте (США), которая находится в стадии промышленных испытаний. Панель может служить частью крыши или стены (наклон крыши не менее 30°С, стены - выходящие на юг). Она имеет размеры 1,22 x 2,44 x 0,254 м<sup>3</sup> и весит 270 кг. Панель включает в себя коллектор солнечной энергии, тепловой аккумулятор, система регулирования, теплообменник и трубопроводы (рис.1.1.).

На обращенной к Солнцу передней стороне панели располагается поглощающая трубчатая поверхность с прозрачным для излучения покрытием, а на задней стороне водяной тепловой аккумулятор, использующийся и как теплообменник, отдающий запасенное тепло потребителю.

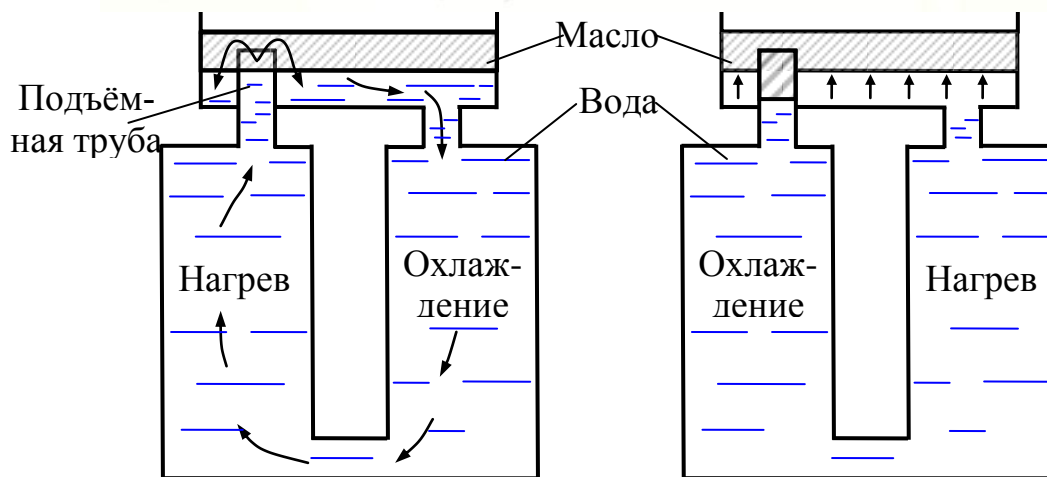
Коллектор солнечной энергии и тепловой аккумулятор теплоизолированы. Отличительной особенностью панели является масляный гидравлический затвор, который обеспечивает одностороннее (диодное) действие коллектора. Затвор представляет собой слой масла, плавающего на поверхности воды. При интенсивном солнечном излучении водяной объем коллектора расширяется, и нагретая вода выдавливается под слой масла и поступает в аккумулятор (рис.1.1,б). При охлаждении коллектора его водяной объем уменьшается и в подъемную трубу проникает масло, которое

в данном случае действует как клапан, отсоединяющий коллектор и аккумулятор друг от друга.

а)



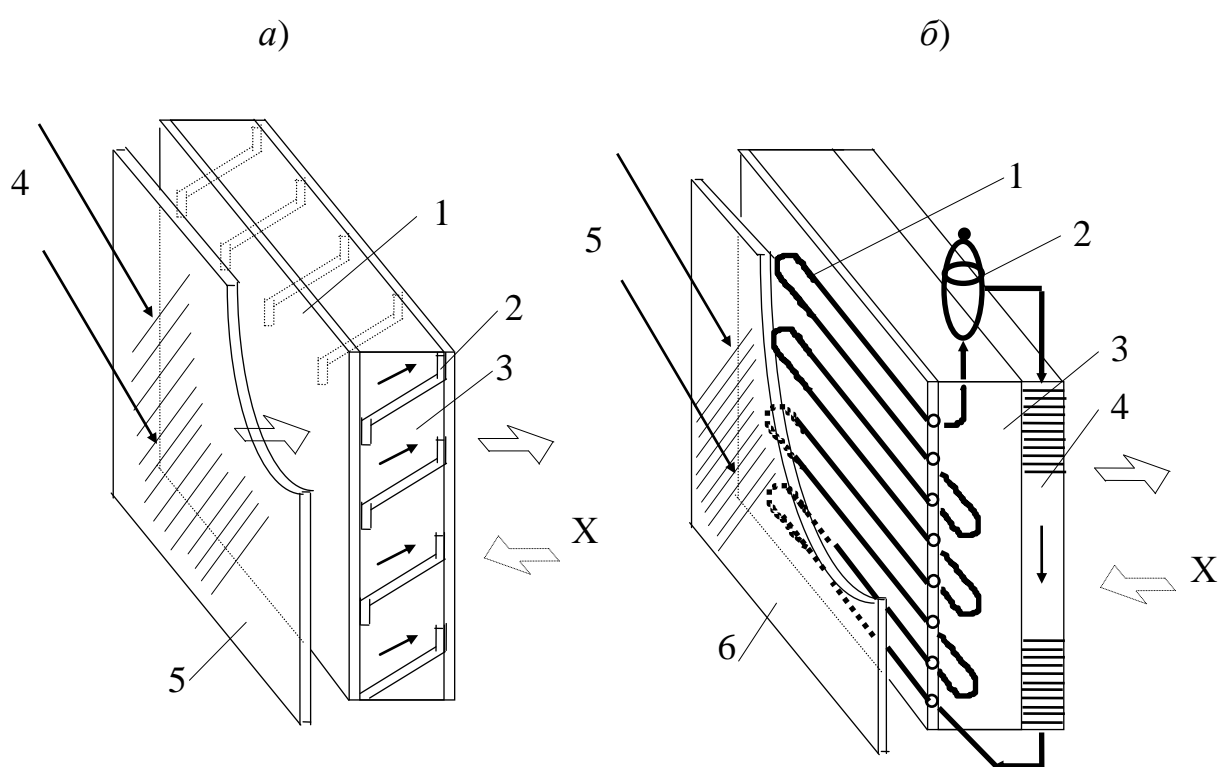
б)



**Рис.1.1. Диодная панель солнечной энергии**

*а* – общий вид; *б* – схема циркуляции теплоносителя

Аналогичные по принципу действия термические диоды на основе использования тепловых труб и термосифона (рис.1.2), обеспечивающие передачу теплового потока через конструкцию наружной стены преимущественно в одном направлении, описаны в книге японских авторов С.Танака и Р.Суда. Сравнивая термический и электрический диод, являющийся неотъемлемым элементом компьютеров и электронных приборов, авторы проводят аналогию между переменным электрическим током и переменным в различные периоды времени (днём и ночью, зимой и летом) направлением теплового потока через наружную стену.



**Рис.1.2. Конструкции стен с преимущественным направлением потока тепла**

*а)* - с использованием тепловой трубы: 1- тепловоспринимающая панель (алюминий, селективно- поглощающая пленка); 2- тепловая труба; 3- теплоизоляционный материал; 4- поток излучения; 5- стекло;

*б)* - с использованием термосифона: 1- тепловоспринимающая панель; 2- устройство предотвращающее опрокидывание циркуляции; 3- теплоизоляционный материал; 4- теплоаккумулирующая среда (вода); 5- поток излучения; 6- стекло.

Конструкция стены с использованием тепловой трубы (рис 1.2, *а*) работает по следующей схеме: между двумя тепловоспринимающими

алюминиевыми панелями 1 с высокой теплопроводностью помещена тепловая труба 2, в промежутке расположен теплоизоляционный материал (пеноуретан). Когда в левой панели повышается температура, то в тепловой трубе вскипает и испаряется теплоноситель (вода или фреон); в процессе конденсации, происходящей в верхней низкотемпературной части трубы, он отдает тепло и путем естественной конденсации возвращается в исходное положение. Таким образом, тепло передается по трубе в направлении слева направо. В обратном направлении процесс теплопередачи происходить не может.

Конструкция стены с использованием термосифона (рис. 1.2, б) работает аналогично диодной панели солнечной энергии (см. рис.1.1). В ней также использовано устройство 2, предотвращающее опрокидывание циркуляции.

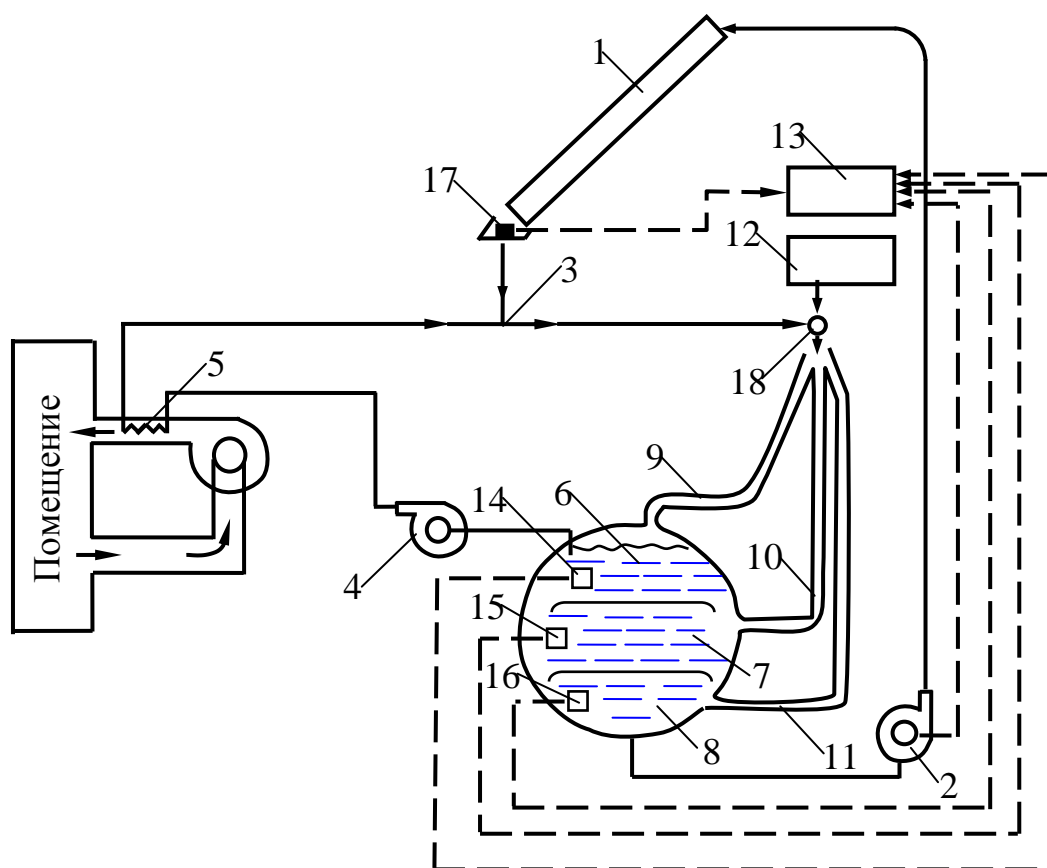
Диодными свойствами могут обладать не только коллектор с масляным затвором, наружные стены с тепловыми трубами и термосифоном, но и тепловой аккумулятор с температурной стратификацией воды по высоте, выполненный в виде одно-, двух- или трехсекционного бака. При этом стратификация, кроме диодности, обеспечивает также повышение эффективности аккумулирования тепла [6], [7].

Наилучшими теплотехническими характеристиками обладает трехсекционный бак-аккумулятор. Однако он занимает много места и должен снабжаться сложной системой автоматического слежения за температурой, распределяемого по секциям бака, теплоносителя.

Несколько упрощенная и компактная конструкция трехсекционного бака-аккумулятора предложена в [15]. Для этого рекомендуется разделить бак горизонтальными перегородками на сообщающиеся между собой отсеки и использовать один распределительный кран 18, снабженный исполнительным механизмом 12 и вычислительным устройством 13, для раздачи теплоносителя по отсекам в зависимости от температуры (рис.1.3.).

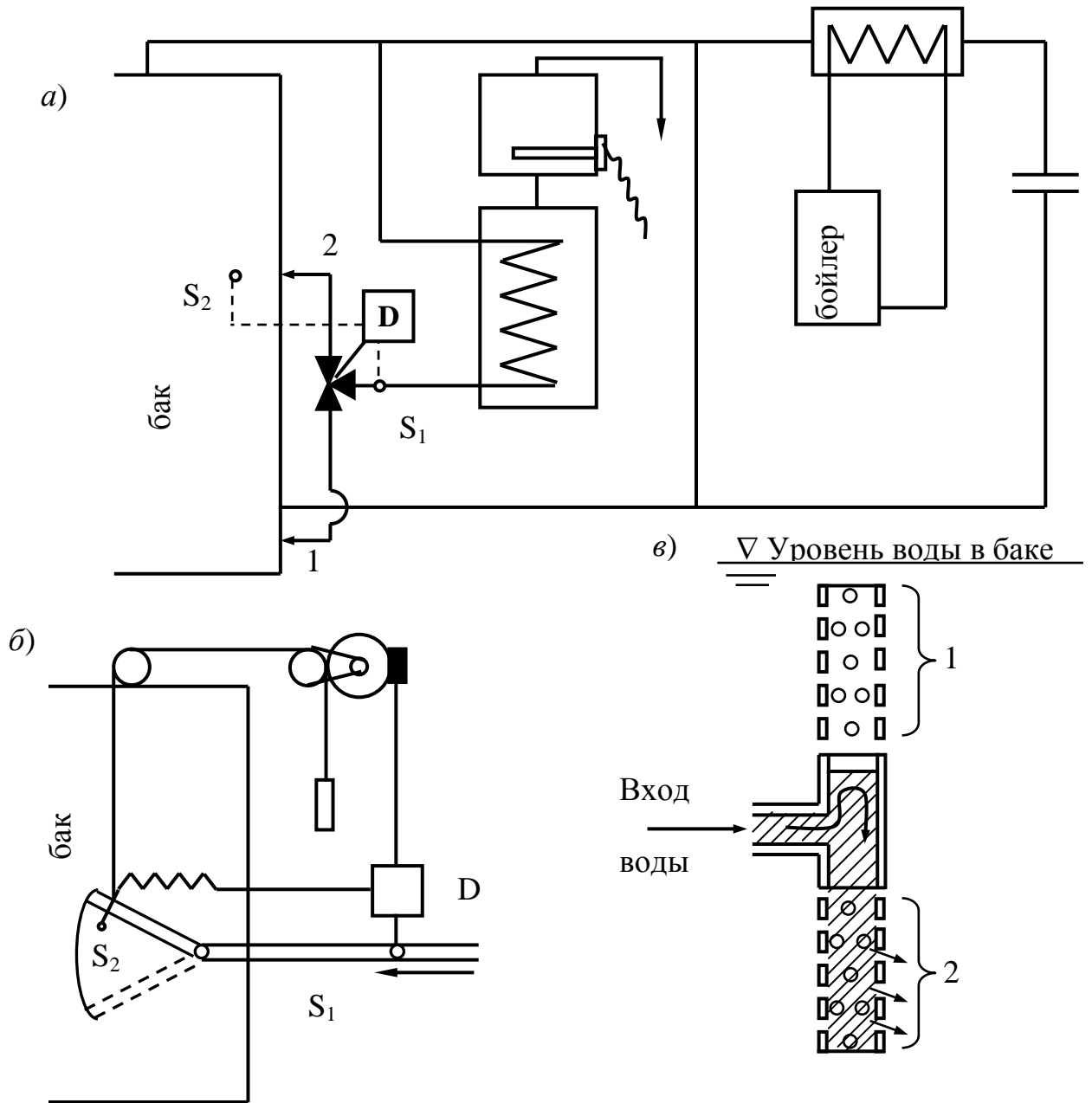
С.Зоколей [18] подчеркивает необходимость поддержания температурной стратификации в односекционных аккумуляторных баках. Для это-

го он рекомендует систему, в которой используется трехходовой клапан, регулируемый дифференциальным термостатом, с помощью которого холодная вода сбрасывается в нижнюю часть аккумуляторного бака, а горячая вода - в верхнюю (рис.1.4, а ). В работе предлагается также использовать подвижную трубу - рычаг шарнирным соединением (рис.1.4, б), регулируемую с помощью дифференциального термостата, которая всегда будет отбрасывать теплоноситель на тот уровень в аккумуляторе, где температура слоя воды соответствует температуре входящего теплоносителя. Эту же систему, как отмечает автор, можно применять на выходе теплоносителя, поступающего в аккумуляторный бак из коллектора.



**Рис. 1.3. Солнечная установка для обогрева помещений:**

1-солнечный коллектор; 2, 4-насосы; 3, 9, 10, 11-распределительные трубопроводы; 6, 7, 8-отсеки аккумулятора с различной температурой; 12-исполнительный механизм; 13-вычислительное устройство; 14, 15, 16, 17-датчики температуры; 18-распределительный кран.



**Рис. 1.4. Устройства для ввода теплоносителя в аккумулятор, способствующие сохранению стратификации**

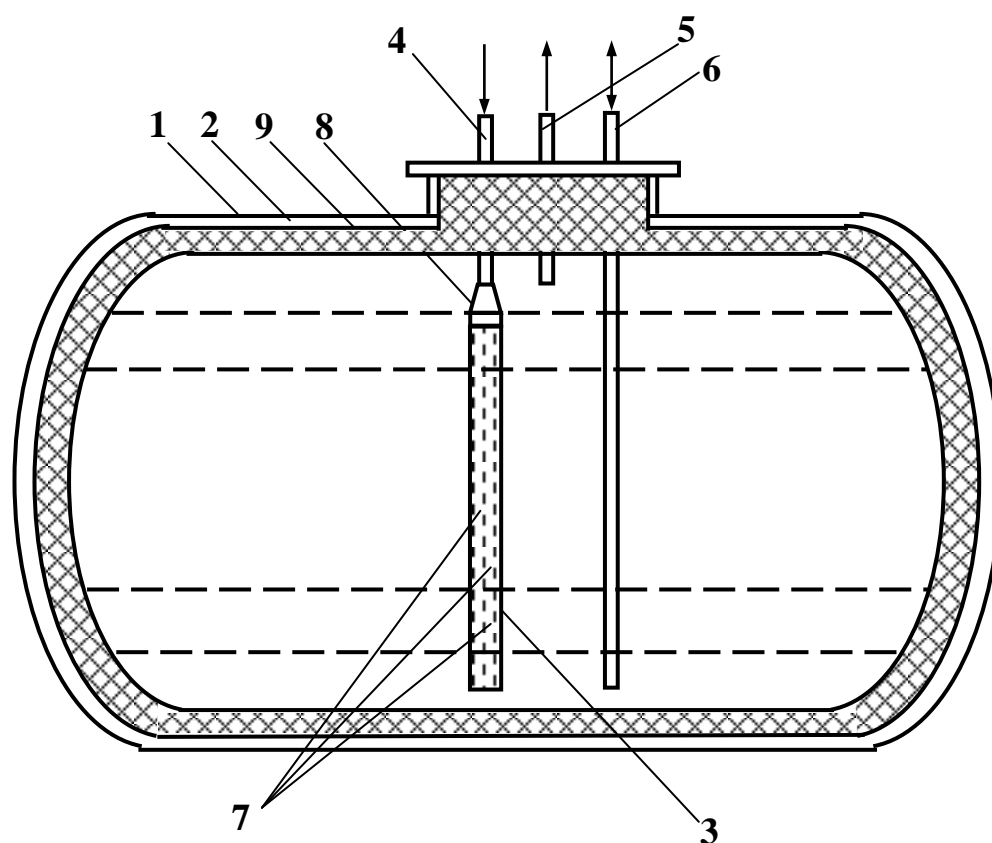
а) – трехходовой клапан, регулируемый с помощью термостата; б) – подвижная труба – рычаг с шарнирным соединением; в) – Т-образная перфорированная труба; 1-зона раздачи нагретой воды; 2- зона раздачи охлажденной воды; D – дифференциальный термостат; S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> – температурные датчики.

Более простое конструктивное решение данной задачи приведено в работе [19], в которой предлагают использовать для расслоения воды в аккумуляторном баке водораспределитель в виде Т-образной перфорированной трубы (рис.1.4, в), раздающей нагретую воду через верхнюю секцию 1, а охлажденную - через нижнюю секцию 2 за счет разности плотностей аккумулирующей среды и поступающего теплоносителя. Специальные эксперименты, проведенные авторами с аккумуляторным баком емкостью 2,27 м и диаметром 1,16 м, подтвердили преимущество данного решения над известными способами распределения жидкости.

D.Saldern [20 ] предложил конструкцию одностенного стального аккумулятора, в котором реализован аналогичный принцип расслоения воды (рис.1.5). Аккумулятор выполнен в виде бочкообразного резервуара с пробкой в верхней части. Внутренняя поверхность резервуара покрыта теплоизоляционным материалом и водонепроницаемой пленкой. Подвод и отвод горячей воды осуществляется через два трубопровода, проходящих в пробке резервуара. Подводящий трубопровод состоит из короткой верхней части 4 и нижней трубки 3 большого диаметра со шлицевыми продольными отверстиями. Так как величина отверстий различна, вода из трубки 3 выходит ламинарным потоком в соответствующие температурные слои. Соединение частей осуществляется через дросселирующий элемент, выполненный из губчатого материала. Подвод и отвод холодной воды происходит через трубопровод 6, опущенный до дна резервуара.

В аккумуляторе, по утверждению автора, происходит естественное тепловое расслоение воды.

Недостатком данной конструкции является то, что она не обеспечивает диодности аккумулятора, так как равномерная перфорация подводящего трубопровода по длине способствует нарушению стратификации при поступлении недостаточно нагретого теплоносителя. Кроме того, в аккумуляторе не организовано расслоение воды циркулирующей по контуру разрядки.



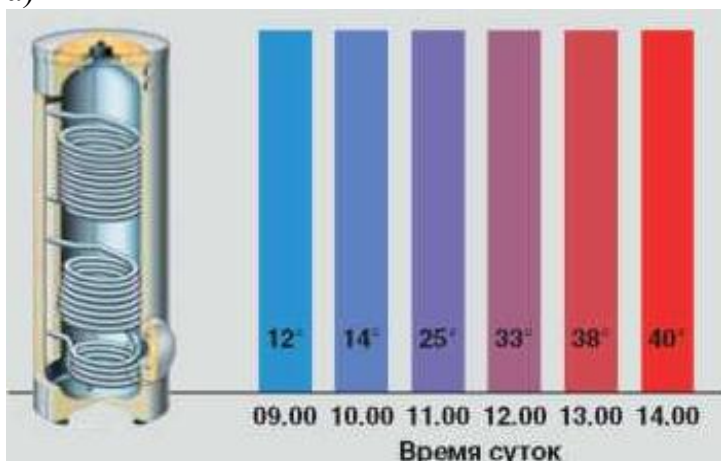
**Рис. 1.5. Одностенный стальной аккумулятор**

1-корпус; 2-теплоизоляция; 3,4-нижняя и верхняя части подводящего трубопровода; 5-трубопровод отвода горячей воды; 6-трубопровод подачи и отвода холодной воды; 7-шлицевые продольные отверстия; 8-дросселирующий элемент; 9-водопроницаемая пленка.

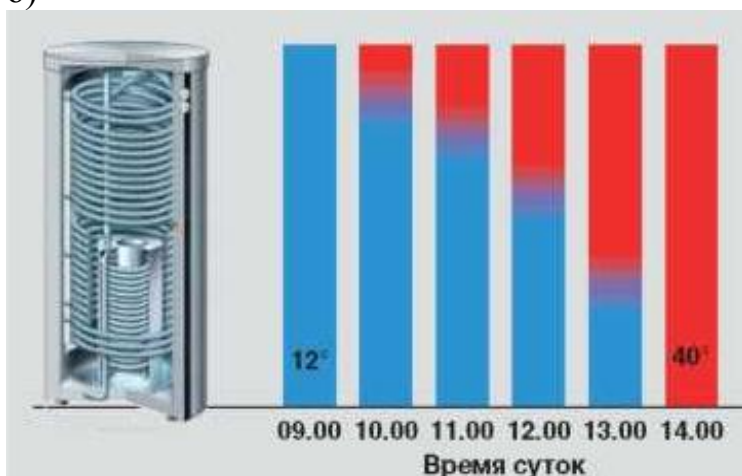
Немецкие компании «Будерус» (Buderus) [4] и Виссманн (Viessmann) [5] разработали различные варианты систем солнечного горячего водоснабжения с автоматической поддержкой температуры нагрева горячей воды в солнечных коллекторах. Для этого применяется послойная зарядка аккумуляторного бака.

При использовании принципа послойной зарядки вода, нагретая в солнечном коллекторе, распределяется по слоям, каждый из которых имеет определенную температуру. При этом смешение с более холодными слоями не происходит (рис.1.6).

а)



б)



В обычном бивалентном емкостном водонагревателе коллектор постоянно нагревает весь объем водонагревателя. При достижении заданной температуры нагретым оказывается весь объем.

При послойной зарядке заданная температура в верхней части емкостного водонагревателя достигается раньше. Весь объем достигает заданной температуры за тот же период времени, что и в водонагревателе без использования послойной зарядки.

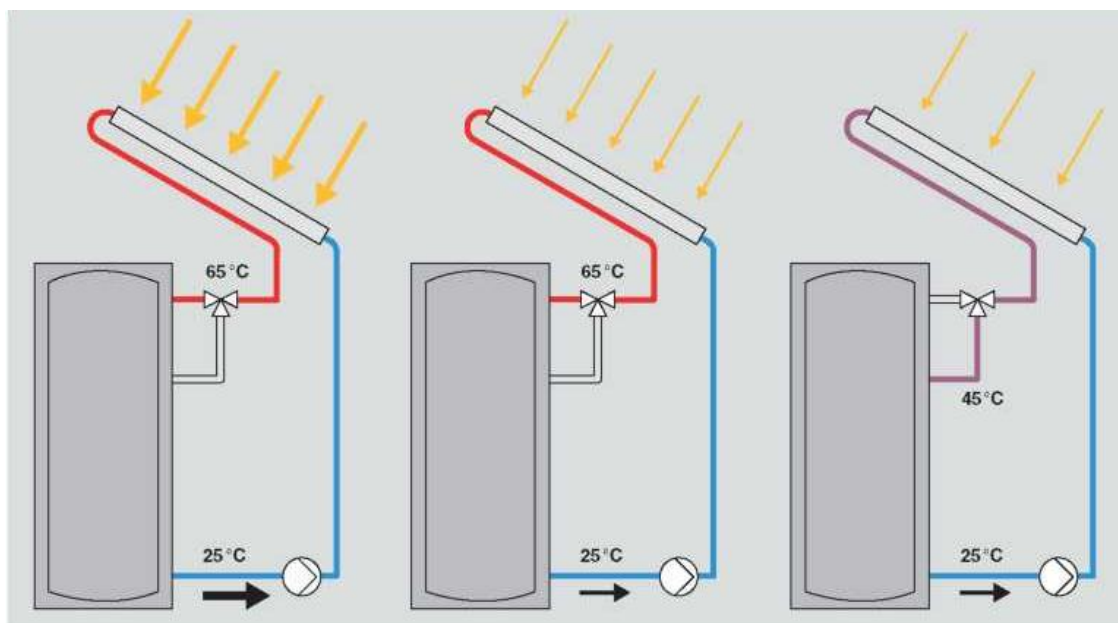
**Рис.1.6. Обычная (а) и послойная (б) зарядка аккумуляторного бака.**

При зарядке емкостного водонагревателя со встроенным теплообменником без использования послойного принципа одновременно нагревается весь объем жидкости. Для достижения требуемой температуры коллектор должен работать продолжительное время. Если потребность в теплоте возникает до достижения требуемой температуры воды, то необходим дополнительный нагрев с помощью теплогенератора.

Используя принцип послойной зарядки, можно снизить расход теплоты на дополнительный нагрев, для чего вода, нагретая в солнечном коллекторе, подается в слой с соответствующей температурой, при этом необходимо избежать перемешивания слоев. Таким образом можно раньше

обеспечить подачу теплоты потребителю, не используя дополнительный догрев.

В зависимости от интенсивности излучения, гелиоконтур работает с большим или меньшим расходом теплоносителя (рис.1.7). Так выполняется послойная зарядка емкостного водонагревателя. Если интенсивность солнечного излучения недостаточна, то выполняется зарядка более низких слоев.



**Рис.1.7. Режимы регулирования расхода теплоносителя.**

Для послойной зарядки гелиоконтур работает с большим значением разности температур, то есть объемный расход теплоносителя снижается по сравнению с обычной зарядкой водонагревателя. При этом средняя температура коллектора увеличивается и, как следствие, коэффициент полезного действия коллектора уменьшается. Поэтому вакуумированные трубчатые коллекторы благодаря их небольшим тепловым потерям более подходят для послойной зарядки, чем плоские коллекторы - это, в частности, касается солнечных систем для поддержки отопления

Объемный расход теплоносителя в гелиоконтуре отрегулирован для послойного наполнения таким образом, чтобы на выходе из коллектора (в подающем трубопроводе) постоянно поддерживалась заданная тем-

пература, то есть рабочая температура плюс разность температур теплообменника. Если солнечного излучения для этого недостаточно, то выполняется зарядка более низких слоев или заряжается другой емкостный водонагреватель. Таким образом, в зависимости от интенсивности солнечного излучения и уже достигнутого уровня температуры регулируется расход теплоносителя в гелиоконтуре.

Для обеспечения стратификации в аккумуляторном баке «Buderus» (Buderus) [4] разработала термосифонные бойлеры (рис.1.8.).

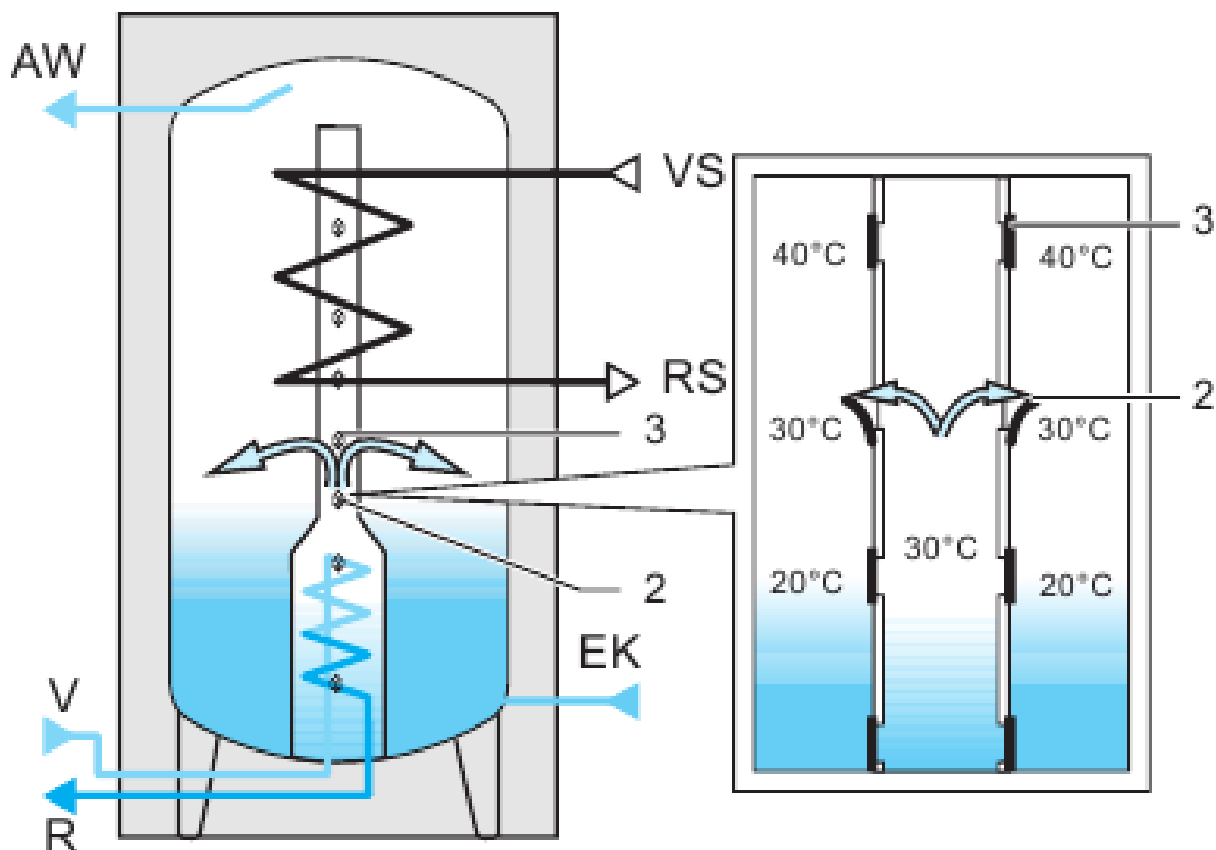
Основные характеристики и особенности термосифонных бойлеров:

- запатентованная теплопроводящая труба для послойного заполнения бойлера начиная с зоны с наивысшей температурой;
- гравитационные силиконовые заслонки, открывающиеся благодаря подъемной силе, для обеспечения техники послойного заполнения бака;
- высокая скорость приготовления горячей воды солнечной установкой и редкое применение дополнительного нагрева от котла отопления;
- покрытие из термостойкой эмали «Buderus» и магниевый анод-протектор для защиты от коррозии;
- съемная теплозащитная облицовка из мягкопенного полиуретана, без фторо-хлоро-углеводородосодержащих веществ; толщина по бокам 100 мм, сверху 150 мм.

Устройство и функционирование. Компания «Buderus» предлагает разнообразные по размерам и конструктивному исполнению бойлеры для горячего водоснабжения с послойным заполнением. Все модификации базируются на принципе термосифона.

Теплообменник гелиоконтур нагревает относительно небольшое количество питьевой воды почти до температуры прямого трубопровода гелиоконтур. Нагретая вода поднимается по теплопроводной трубе

непосредственно в зону готовности, в которой во время нормальной инсоляции уже через короткий промежуток времени достигается заданная температура горячей воды. Вследствие этого реже требуется дополнительный нагрев от традиционного котла.



**Рис.1.8. Термосифонный бойлер компании «Будерус» (Buderus) [4]:**

1- разделительная прослойка воды между температурными слоями; 2- открытая гравитационная заслонка в теплопроводной трубе; 3- закрытая гравитационная заслонка; AW- выход горячей воды; EK- вход холодной воды; R - обратный трубопровод гелиоконтурa; V- прямой трубопровод гелиоконтурa

В зависимости от интенсивности солнечного нагрева вода поднимается вверх лишь до тех пор, пока не достигнет слоя в баке с такой же температурой. После этого открываются гравитационные заслонки 2, благодаря подъемной силе. Таким образом бойлер нагревается послой-

но сверху вниз.

## **1.2. Оценка эффективности стратификационных аккумуляторов теплоты**

Исследованию вопросов, связанных с явлением стратификации воды в аккумуляторных баках применительно к системам солнечного теплоснабжения, посвящены работы многих зарубежных гелиотехников.

В работах [56], [57], [58], [59] рассмотрено влияние стратификации на эффективность работы гелиосистемы теплоснабжения путем моделирования режимов работы многосекционного бака-аккумулятора на ЭВМ. Выявлено, что характеристики установок, полученные при использовании моделей без учета стратификации, могут существенно отличаться друг от друга. Эти различия становятся более явными при переходе от односекционного бака с полным перемешиванием воды к двух- или трех секционному баку.

В статье [56] показано, что использование при моделировании нагрева воды более трех секций не вносит существенных изменений в характеристики установки по сравнению с характеристиками трех секционного бака. Поэтому при анализе преимуществ стратификации обычно сравнивают односекционный бак с полным перемешиванием воды с трех секционным [58], [59].

Эффект от расслоения воды при кратковременном и долгосрочном тепловом аккумулировании может быть определен из динамики работы гелиосистемы в целом. В связи с этим он зависит от вида тепловой нагрузки, покрываемой системой.

Последнее оценивали в работах [58], [59], [60]. В [58] показано, что при отоплении применение стратификации позволяет повысить долю использования солнечной энергии на 2...12 % . Аналогичный анализ [59], проведенный для систем горячего водоснабжения, отопления и кондицио-

нирования воздуха, выявил повышение эффективности гелиосистем при использовании расслоения воды в аккумуляторе на 5...15%.

В работе [60], на основе обобщения результатов испытаний экспериментальных гелиодомов с системами солнечного отопления и охлаждения, показано, что применение стратификации при кратковременном и долгосрочном тепловом аккумулировании приводит к увеличению использования солнечного тепла на 15%.

Для оптимального конструирования стратификационных аккумуляторов тепла и правильного проектирования системы аккумулирования необходимо знать условия, при которых происходит устойчивое расслоение, и оценить ее степень.

По этим вопросам известны работы [61], [62], [63], [64] и другие.

В статье [61] приведены результаты экспериментальных исследований процесса стратификации в цилиндрическом резервуаре при подаче и отборе теплоносителя через патрубки, расположенные соответственно в верхней и нижней части бака.

В качестве параметра, определяющего границы существования стратификации, используются модифицированное число Ричардсона  $Ri$ ; отмечается, что при величине этого параметра больше 0,244 наблюдается устойчивое расслоение воды.

Степень стратификации воды в баке, в рассматриваемой работе, оценивали величиной температурного градиента в граничной области, связь которого с модифицированным числом Ричардсона было установлено экспериментально. Выявлено также влияние стратификации на темп зарядки аккумулятора. Показано, что для полной зарядки идеально стратифицированного бака достаточен однократный, а для полностью перемешиваемого бака - пятикратный обмен теплоносителя всего объема. Реальный процесс зарядки аккумулятора с частичным перемешиванием воды в работе не исследован.

Влияние стратификации на темп зарядки водяного аккумулятора рассмотрено также в работе [62], в которой приведены расчетные кривые

для проектирования системы аккумулирования, полученные для идеально расслоенного и перемешиваемого бака.

В работе [63] для учета способа теплового аккумулирования вводятся понятия энергетического и эксергетического КПД (т.е. КПД, учитывающего уровень температуры) аккумулятора.

Недостатком рассмотренных способов оценки стратификации является то, что, вследствие их зависимости от температуры, они не могут однозначно характеризовать стратификационные свойства аккумулятора и служить критерием сравнения различных конструкций аккумуляторов между собой по эффективности расслоения воды.

Целый ряд работ посвящен вопросам расчета скоростных и температурных полей в аккумуляторных баках [64], [65], [66], [67], [68], [69].

В работе [64] развита аналитическая двумерная модель движения жидкости за счет свободной и вынужденной конвекции в тепловых аккумуляторах. При этом рассматривались два типа циркуляции потоков воды, а геометрическая конфигурация включала в себя как горизонтальный, так и вертикальный вход воды в бак. Исследовалось влияние числа Рейнольдса  $Re$  на входе и подъемной силы на процессы расслоения жидкости в баке.

При численном расчете значения чисел  $Re$  и Грасгофа достигали соответственно 200 и 40000. Показано, что несмотря на сложность гидродинамики в баке-аккумуляторе, эффект подъемных сил в рассмотренном диапазоне чисел  $Re$  и  $Gr$ , приводит к термическому расслоению жидкости, а температурные поля могут быть с достаточной точностью рассчитаны с позиций одномерной модели.

Наиболее полное теоретическое исследование тепловых процессов в аккумуляторах на основе одномерного переноса ( $\alpha$ -модель) приведено в работах [65], [66], [67], [68]. Это модель [66] предполагает поступление жидкости через патрубок в верхней части бака с равномерным распределением по сечению и удаление через патрубок в нижней части. Дифференциальное уравнение, описывающее конвективный перенос теп-

ловой энергии, связанный с движением жидкости, и перенос тепловой энергии в результате теплопроводности, решается в общем случае численным методом, а при простых граничных условиях - аналитически.

Недостатком одномерной  $\alpha$  - модели является то, что она не учитывает гидродинамику в баке-аккумуляторе. В связи с этим  $\alpha$  - модель не определяет условий, при которых возможен процесс устойчивого расслоения воды (кстати, сама модель справедлива только при идеальной стратификации), а также влияние на него конструктивных особенностей водораспределителей и водозаборных устройств аккумулятора.

В работе [69] для жидкостного солнечного аккумулятора прямоугольной формы и бесконечной длины решена двумерная нестационарная задача естественной конвекции. Результаты численных расчётов температурных полей подтвердили вывод работы [70] о присутствии вертикального градиента в центре прямоугольной полости, т.е. наличие температурной стратификации внутри аккумулятора. Вопросы устойчивости температурной стратификации и влияние на неё конструктивных особенностей аккумулятора в работе не рассмотрено.

### 1.3. Цель и задачи исследования

**Цель работы** – разработка и исследование саморегулирующихся тепловых аккумуляторов для систем солнечного теплоснабжения.

Исходя из поставленной цели, **задачами исследования** явились:

1. Анализ существующих конструктивных решений тепловых аккумуляторов для систем солнечного теплоснабжения и выявление наиболее перспективных.
2. Разработать конструкции саморегулирующихся стратификационных аккумуляторов теплоты,
3. Исследовать физические явления и установить закономерности теплогидродинамики в новых устройствах, определить их гидравлические и энергетические характеристики.

4. Разработать физико-математические модели работы саморегулирующихся устройств и проверить их адекватность экспериментальным данным.
5. Выявить закономерности процессов саморегулирования в тепловых аккумуляторах для систем солнечного теплоснабжения;

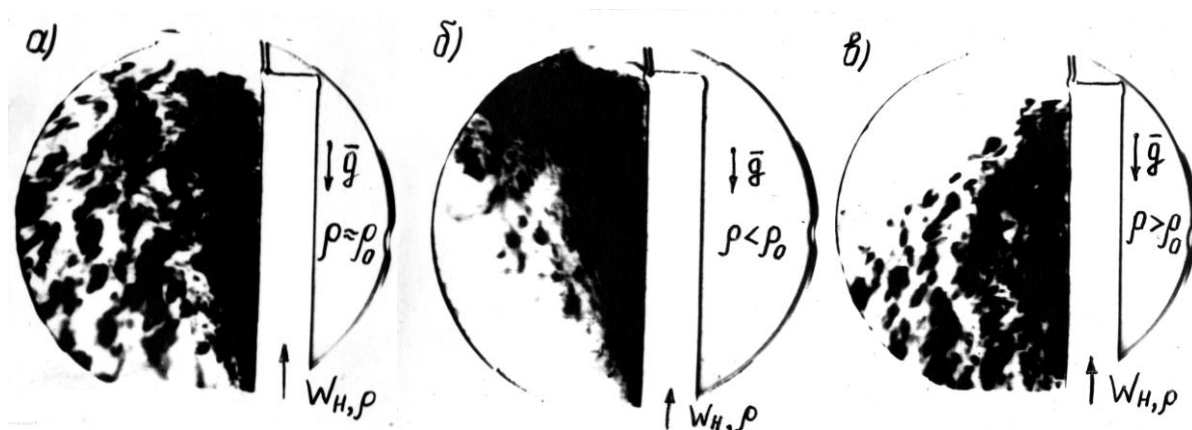
### **Выводы по I главе**

1. В системах солнечного теплоснабжения с неравномерным приходом солнечной радиации тепловое аккумулярование способствует повышению их энергетической эффективности. Среди различных способов аккумулярования солнечной энергии в системах теплоснабжения наибольшее применения получили водяные аккумуляторы теплоты, которые отличаются простотой, надёжностью и экономичностью.
2. Для повышение эффективности аккумулярования солнечной энергии в водяных аккумуляторах теплоты широко применяется явление температурного расслоения, т.е. стратификация. Термосифонные бойлеры позволяют обеспечить высокоэффективное аккумулярование солнечной энергии как в системах горячего водоснабжения, так и в отопительных системах. В таких аккумуляторах для температурного расслоения используются эффекты естественного саморегулирования за счёт разности плотностей горячей и холодной воды. Конструктивные решения известных тепловых аккумуляторов имеют значительные резервы по их упрощению и совершенствованию.
3. На основе анализа литературных источников сформулирована цель и задачи по повышению эффективности саморегулирующихся тепловых аккумуляторов.

## ГЛАВА II. ИССЛЕДОВАНИЕ САМОРЕГУЛИРУЮЩЕГОСЯ АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОТЫ

### 2.1. Раздача воды перфорированным водораспределителем постоянного сечения при действии объемных сил

Рассмотрим процесс раздачи воды водораспределителем постоянного сечения с равномерной перфорацией по длине при действии объемных сил. Факторами, существенно влияющими на характер истечения воды, являются при этом соотношение и взаимное направление архимедовых сил и сил инерции. Экспериментальные наблюдения, проведенные нами с помощью оптического прибора ИАБ-451, над вертикально расположенным водораспределителем постоянного сечения с очень узкой щелью показали следующее (рис.2.1).



**Рис.2.1.Теневое изображение истечения воздуха из узкой продольной щели вертикально расположенного водораспределителя**

*a* – архимедовы силы не соизмеримы с силами инерции; *б* – архимедовы силы соизмеримы с силами инерции и совпадают с ними по направлению; *в* – то же при не совпадении направлений

При незначительной разнице температур истекающего из водораспределителя и окружающего воздуха, архимедовы силы не оказывают

ощутимого влияния на процесс раздачи (рис.2.1, а), который протекает в соответствии с вышерассмотренной физической моделью.

С возрастанием архимедовых сил картина меняется. По длине щели резко возрастает неравномерность раздачи. Причем, если векторы архимедовых сил и векторы скорости воздуха, внутри воздухораспределителя совпадают по направлению, то наблюдается уменьшение скорости истечения воздуха в начале воздухораспределителя (рис.2.1, б), а если противоположны – то в конце (рис.2.1, в).

Составим математическое описание процесса раздачи воды водораспределителем постоянного сечения с равномерной перфорацией по длине при действии объемных сил. Примем начало координат у заглушенного конца водораспределителя (рис. 2.2, а) и направим ось абсцисс вертикально вниз, навстречу потоку воды [22].

Заменим перфорированные отверстия условной щелью постоянной ширины  $\delta$  и проведем в водораспределителе два поперечных сечения на расстояниях  $x$  и  $x+dx$  от заглушенного конца (рис.2.2,б).

Очевидно, уменьшение расхода воды внутри водораспределителя от сечения  $x+dx$  к сечению  $x$  равно расходу воды, вытекающей через условную щель между этими сечениями.

Обозначив скорость в сечении  $x$  через  $W_x$ , а в сечении  $x+dx$  через  $W_x + dx$  и нормальную скорость истечения из щели в сечении  $x$  через  $v_x$  можем написать

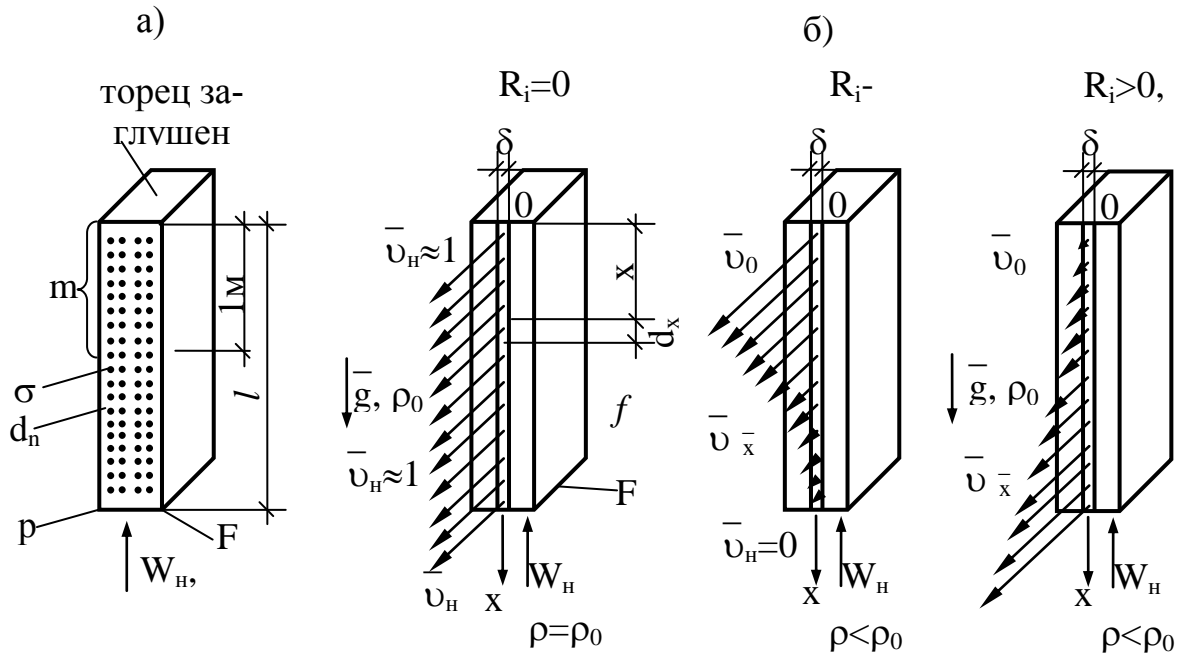
$$FdW_x = v_x \delta dx. \quad (2.1)$$

Переходя, к производной получаем

$$W_x' = \frac{\delta}{F} v_x. \quad (2.2)$$

Нормальная скорость воды в щели

$$v_x = \mu \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_x - p_0)} = \mu \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p_x}. \quad (2.3)$$



**Рис. 2.2.** Схема водораспределителя постоянного сечения с равномерной перфорацией (а) и с условной щелью постоянной ширины (б).

Составим применительно к сечениям  $x+dx$  и  $x$  уравнение Бернулли:

$$\Delta\rho gx + \Delta\rho g dx + \Delta p_x + d\Delta p_x + \frac{\rho W_x^2}{2} + d\left(\frac{\rho W_x^2}{2}\right) = \Delta\rho gx + \Delta p_x + \frac{\rho W_x^2}{2} + \frac{\lambda}{d_3} \frac{\rho W_x^2}{2} dx.$$

Сократив в левой и правой частях уравнения одинаковые члены и переходя к производным, получаем

$$\Delta p_x' + \rho W_x' W_x - \frac{\lambda}{d_3} \frac{\rho W_x^2}{2} = -\Delta\rho g. \quad (2.4)$$

Выразим  $\Delta p_x'$  через скорость  $W_x$ . Из уравнения (2.3) следует

$$\Delta p_x = \frac{\rho v_x^2}{2\mu^2}$$

Согласно выражению (2.2)  $v_x = \frac{F}{\delta} W_x'$  и потому

$$\Delta p_x = \frac{\rho F^2}{2\mu^2 \delta^2} W_x'^2$$

Беря производную, получаем

$$\Delta p'_x = \frac{\rho F^2}{\mu^2 \delta^2} W'_x W''_x$$

Подставляя в уравнение (2.4) величину  $\Delta p'_x$  и умножая на  $\mu^2 \delta^2 / \rho F^2$ , будем иметь

$$W''_x W'_x + \frac{\mu^2 \delta^2}{F^2} W'_x W_x - 0,5 \frac{\mu^2 \delta^2}{F^2} \frac{\lambda}{d_3} W_x^2 = -\frac{\mu^2 \delta^2}{F^2} \cdot \frac{\Delta \rho g}{\rho} \quad (2.5)$$

Введем обозначения:

$$\bar{W}_{\bar{x}} = W_x / W_H, \quad \bar{x} = x / l$$

Тогда

$$W_x = W_H \bar{W}_{\bar{x}}; \quad x = l \bar{x};$$

$$W'_x = \frac{dW_x}{dx} = \frac{W_H}{l} \cdot \frac{d\bar{W}_{\bar{x}}}{d\bar{x}} = \frac{W_H}{l} \bar{W}'_{\bar{x}};$$

$$W''_x = \frac{dW'_x}{dx} = \frac{W_H}{l^2} \cdot \frac{d\bar{W}'_{\bar{x}}}{d\bar{x}} = \frac{W_H}{l^2} \bar{W}''_{\bar{x}}$$

Подставляя найденные значения  $W_x, W'_x$  и  $W''_x$  в (2.5) и сокращая на  $W_H / l^3$  получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\bar{W}''_{\bar{x}} \bar{W}'_{\bar{x}} + p \bar{W}'_{\bar{x}} \bar{W}_{\bar{x}} + q \bar{W}_{\bar{x}}^2 = p Ri \quad (2.6)$$

где  $p = \mu^2 \bar{f}^2$ ;  $q = -0,5 \mu^2 \bar{f}^2 \lambda \bar{l}$ ;  $Ri = \frac{-gl}{W_H^2} \frac{\Delta \rho}{\rho}$ ;

$$\bar{f} = \frac{f}{F} = \frac{\delta l}{F}; \quad \bar{l} = \frac{l}{d_3}$$

Граничные условия

$$\text{при} \quad \left. \begin{array}{l} \bar{x} = 0 \\ \bar{x} = 1 \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} \bar{W}_0 = 0 \\ \bar{W}_H = 1 \end{array} \right\} \quad (2.7)$$

В дальнейшем величину  $\mu\bar{f}$  будем называть параметром условной щели, а  $\lambda\bar{l}$  - параметром канала водораспределителя. Безразмерный комплекс  $Ri$  является модифицированным числом Ричардсона, которое характеризует соотношение архимедовых сил и сил инерции в начале водораспределителя. В частности  $Ri=0,5$  означает равенство этих сил ( $-gl\Delta\rho = 0,5\rho W_H^2$ ). Если архимедовы силы направлены вверх ( $\Delta\rho>0$ ), то  $Ri < 0$ , в противном случае, когда ( $\Delta\rho<0$ ) –  $Ri > 0$ .

Уравнение (2.6) и условия (2.7) дают полную математическую формулировку рассматриваемой краевой задачи.

Допустим, что она решена, т.е. найдена относительная скорость воды внутри водораспределителя

$$\bar{W}_{\bar{x}} = \varphi(p, q, Ri, \bar{x}). \quad (2.8)$$

В таком случае относительная средняя скорость истечения воды из щели составит

$$\bar{v}_{\bar{x}} = \frac{v_x}{v_{cp}} = \frac{F\bar{W}'_x}{\delta v_{cp}} = \frac{FW_H}{\delta l v_{cp}} \bar{W}'_x = \bar{W}'_x. \quad (2.9)$$

Заметим, что при равномерной раздаче  $\bar{v}_{\bar{x}}=1$ . В стратификационном аккумуляторе водораспределитель осуществляет неравномерную раздачу, что обуславливается действием архимедовых сил и характеризуется максимальной скоростью истечения в одном крайнем сечении, где разность  $\Delta\rho \approx 0$ , и минимальный - в противоположном. Учитывая, что для исключения подсоса воды в распределитель  $\bar{v}_{\bar{x}} \geq 0$ , условия на которые он должен быть рассчитан, следующие (рис. 2.3, б):

$$Ri = 0,5 \quad \bar{v}_{\bar{x}} \geq 1; \quad (2.10)$$

$$Ri < 0,5 \quad \bar{v}_H = 0; \quad (2.11)$$

$$Ri > 0,5 \quad \bar{v}_0 = 0. \quad (2.12)$$

Определяющей величиной при расчете водораспределителя является параметр условной щели  $\mu f^{\bar{}}$ . Согласно [19], условие (2.10) выполняется при  $\mu f^{\bar{}} < 1$ . Параметр условной щели при котором выполняется условие (2.11) или (2.12) назовем критическим, обозначив через  $\mu f^{\bar{}}_{kp}$ .

Установим зависимость  $\mu f^{\bar{}}_{kp}$  от  $Ri$ .

Рассмотрим водораспределитель малой длины с гладкими стенками. При расчете такого водораспределителя можно пренебречь потерями давления на трение, т.е. принять  $\lambda \bar{l} = 0$ . Тогда (2.6) примет вид

$$\bar{W}_x'' \bar{W}_x' + p \bar{W}_x' \bar{W}_x = p Ri. \quad (2.13)$$

Интегрирование (2.13)

$$\bar{W}_x'^2 + p \bar{W}_x^2 = 2p Ri \bar{x} + 2C_1, \quad (2.14)$$

и замена переменной

$$\bar{W}_x = \frac{1}{\sqrt{p}} \psi \sin y(\bar{x}), \quad (2.15)$$

дает

$$y' + \frac{\psi'}{\psi} \operatorname{tgy} = \pm \sqrt{p}, \quad (2.16)$$

где

$$\psi = \sqrt{2p Ri \bar{x} + 2C_1}. \quad (2.17)$$

Учитывая, что для малых значений аргумента

$$\operatorname{tgy} \approx y, \quad (2.18)$$

имеем

$$y' + \frac{\psi'}{\psi} y = \pm \sqrt{p}. \quad (2.19)$$

Общее решение линейного уравнения (2.19)

$$y = \pm \frac{2}{3} \sqrt{p} \left( \bar{x} + \frac{C_1}{pRi} \right) + \frac{C_2}{\sqrt{pRi\bar{x} + C_1}}, \quad (2.20)$$

откуда с учетом (2.17) и (2.15) получаем

$$\bar{W}_{\bar{x}} = \sqrt{2Ri\bar{x} + \frac{2C_1}{p}} \sin \left[ \pm \frac{2}{3} \sqrt{p} \left( \bar{x} + \frac{C_1}{pRi} \right) + \frac{C_2}{\sqrt{pRi\bar{x} + C_1}} \right]. \quad (2.21)$$

Подставляя (2.11), (2.12) и (2.7) соответственно в (2.14) и (2.21), а также учитывая  $\mu f^{\bar{kp}} > 0$ , находим

$$\mu f^{\bar{kp}} = \begin{cases} \frac{1,5\pi Ri}{1 - (1 - 2Ri)^{3/2}} & Ri \leq 0,5 \\ 1,5 \text{Arc sin} \frac{1}{\sqrt{2Ri}} & Ri \geq 0,5 \end{cases} \quad (2.22)$$

Формула (2.22)-приближенная и погрешности при ее использовании, согласно (2.18), возрастают с увеличением переменной  $y$  ( $\bar{x}$ ).

Подставляя (2.22) в (2.21), с учетом (2.7), (2.11), (2.12) и (2.14), находим приближенную формулу для определения относительной скорости воды внутри водораспределителя при  $\mu f^{\bar{kp}}$

$$\bar{W}_{\bar{x}}^{kp} = \begin{cases} \sin 1,57\bar{x} & Ri < 0,5 \\ \bar{x}^{3/2} & Ri > 0,5 \end{cases} \quad (2.23)$$

Откуда с учетом (2.9) получим следующую зависимость для относительной скорости и стечения воды из условий щели:

$$\bar{v}_{\bar{x}}^{kp} = \begin{cases} 1,57 \cos 1,57 \bar{x} & Ri < 0,5 \\ 1,5 \sqrt{\bar{x}} & Ri > 0,5 \end{cases} \quad (2.24)$$

Полное сопротивление водораспределителя равно избыточному полному давлению в начале водораспределителя [102]:

$$\Delta p = \Delta p_H + \frac{\rho W_H^2}{2}$$

Согласно выражению (2.3),  $\Delta p_H = \rho v_H^2 / 2 \mu^2$ ,

поэтому

$$\Delta p = \left( \frac{v_H^2}{\mu^2 W_H^2} + 1 \right) \frac{\rho W_H^2}{2}$$

или

$$\Delta p = \zeta_n \frac{\rho W_H^2}{2}, \quad (2.25)$$

где

$$\zeta_n = \frac{v_H^2}{\mu^2 W_H^2} + 1 = \frac{v_H^2 F^2}{\mu^2 f^2 v_{cp}^2} + 1 = \frac{\bar{v}_H^2}{\mu^2 \bar{f}^2} + 1 \quad (2.26)$$

Для  $\mu \bar{f}^{kp}$ , подставляя (2.24) в (2.26), с учетом (2.25), находим

$$\text{При } Ri < 0,5 \quad \Delta p^{kp} = \frac{\rho W_H^2}{2}; \quad (2.27)$$

$$\text{При } Ri > 0,5 \quad \Delta p^{kp} = \left[ \frac{2,25}{(\mu \bar{f}^{kp})^2} + 1 \right] \frac{\rho W_H^2}{2}. \quad (2.28)$$

Зависимость (2.22) была получена нами при допущении, что водораспределитель имеет малую длину и гладкие стенки. Рассмотрим теперь более общий случай, когда  $\lambda \bar{l} \neq 0$  [23].

Учитывая трудность точного решения исходного дифференциального уравнения (2.6), удовлетворяющего краевым условиям (2.7), применим

метод коллокации (метод совпадения), который позволяет найти приближенное решение данной задачи в аналитической форме:

$$\bar{W}_n(\bar{x}) = \bar{x} + \sum_{i=1}^n c_i \bar{x}^i (1 - \bar{x}), \quad (2.29)$$

где  $n$  - число точек коллокации, выбираемое согласно требуемой точности вычислений;

$C_i$  - постоянные коэффициенты.

Допустим, что коэффициенты  $C_i$  в формуле (2.29) определены.

Тогда, согласно (2.9) относительная скорость истечения воды из условной щели

$$\bar{v}_n(\bar{x}) = \bar{W}_n'(\bar{x}) = 1 + \sum_{i=1}^n C_i \bar{x}^{i-1} [i - (i+1)\bar{x}]. \quad (2.30)$$

Подставляя (2.30) в (2.12), находим соотношения справедливые для критического значения условной щели  $\mu \bar{f}^{KP}$ .

$$\text{при } Ri < 0,5 \quad \sum C_i = 1 \quad (2.31)$$

$$\text{при } Ri > 0,5 \quad C_1 = -1 \quad (2.32)$$

Таким образом, зная коэффициенты  $C_i$  можно по условиям (2.31) и (2.32), определить  $\mu \bar{f}^{KP}$ .

Перейдем теперь к определению коэффициентов  $C_i$ . Система базисных функций, стоящая в правой части формулы (2.29), является координатной системой [24]. Следовательно, для нахождения коэффициентов  $C_i$  можно получить систему алгебраических уравнений, которая будет иметь единственное решение.

Выберем на отрезке  $[0,1]$  систему узлов, состоящую из четырех равноудаленных друг от друга точек коллокации, т.е. примем  $n=4$ ,  $\bar{x}_1 = 0,2$ ,  $\bar{x}_2 = 0,4$ ,  $\bar{x}_3 = 0,6$ ,  $\bar{x}_4 = 0,8$ , и потребуем, чтобы выполнялись равенства

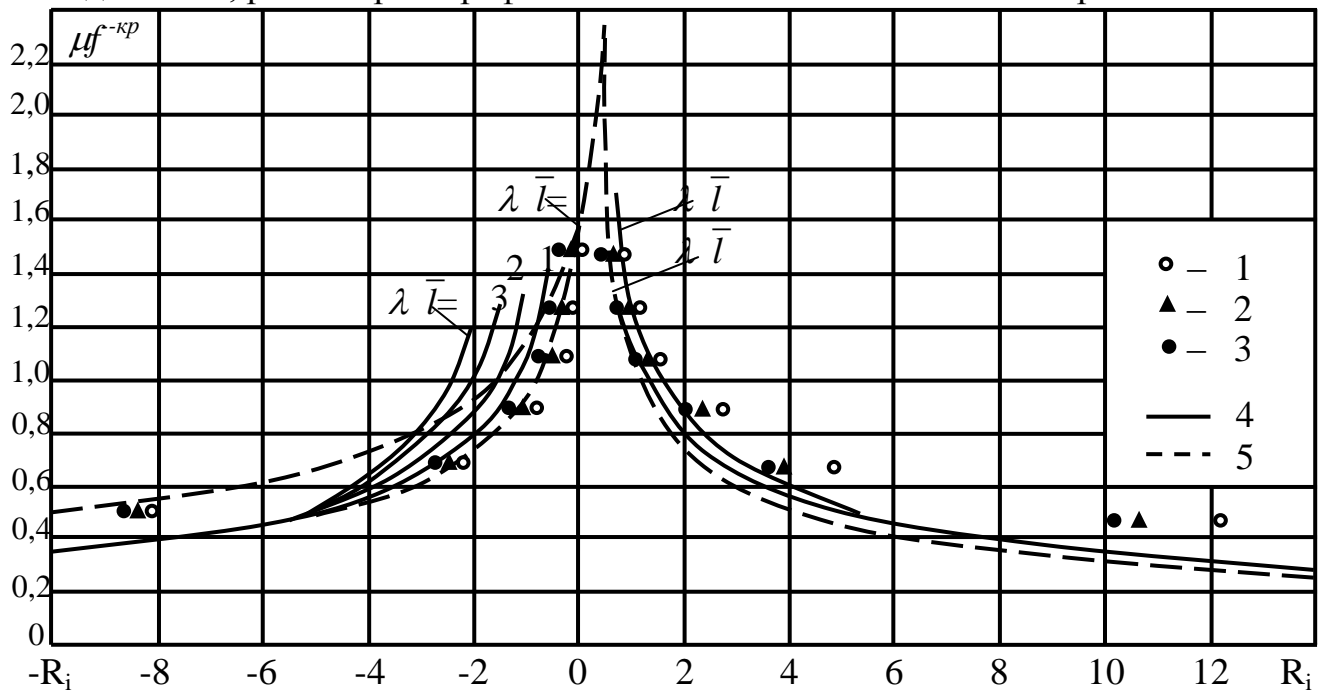




$Ri > 0$  результаты расчетов для  $\lambda \bar{l} = 0$  находятся в хорошем согласии между собой, при  $Ri < 0$  - они имеют расхождения, не превышающие 25%.

Из приведенного графика следует также, что влияние параметра водораспределителя  $\lambda \bar{l}$  на  $\mu f^{KP}$  уменьшается с возрастанием абсолютного значения числа Ричардсона. При  $|Ri| \geq 5$  потерями давления на трение можно пренебречь, т.е. рассчитывать его как водораспределитель малой длины с гладкими стенками ( $\lambda \bar{l} = 0$ ). Если  $|Ri| < 5$ , то длину и шероховатость стенок водораспределителя следует учитывать при расчете величины  $\mu f^{KP}$ , используя данный график.

Для оценки степени влияния параметра  $\lambda \bar{l}$  на сопротивление водораспределителя, рассмотрим график зависимости относительной скорости



**Рис. 2.3.** Зависимость критического значения параметра условий щели водораспределителя от числа Ричардсона  $Ri$ .

1, 2, 3 – эксперимент при  $\lambda \bar{l} = 0,28; 0,30; 0,36$ ; 4 – расчет на ЭЦВМ; 5 – расчет по формуле (2.25)

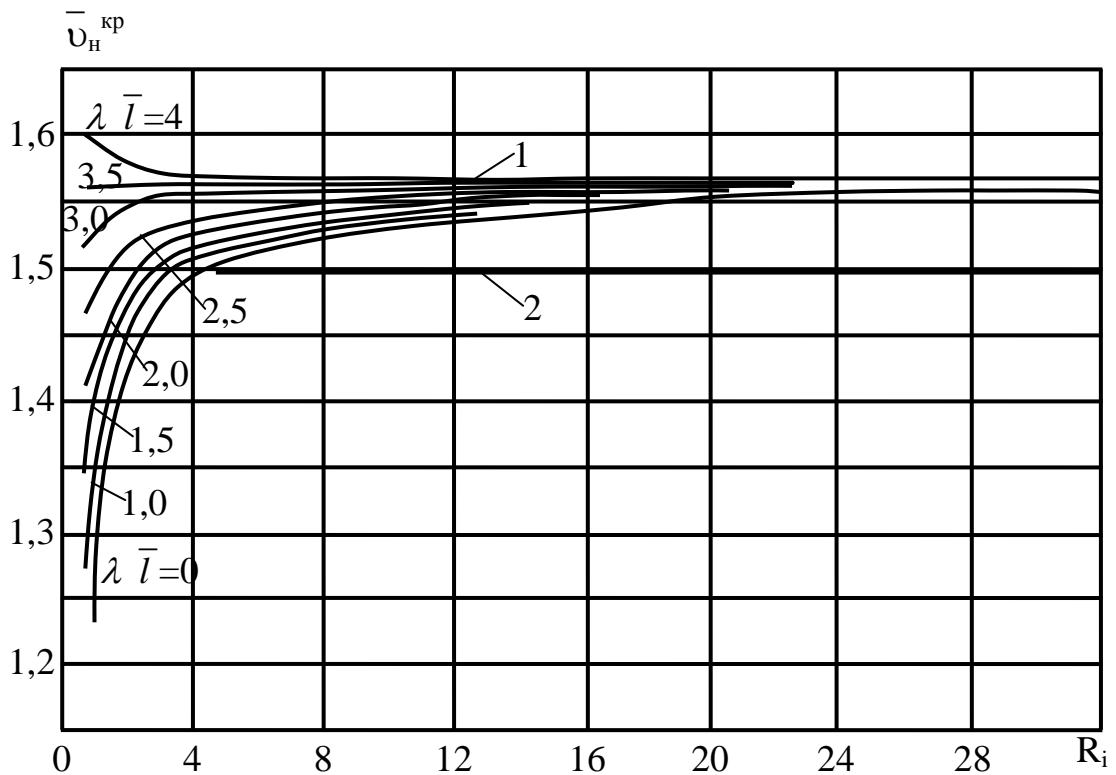


Рис. 2.4. Зависимость относительной скорости истечения воды в начале водораспределителя от числа Ричардсона для критического параметра условной щели. 1 – расчет на ЭЦВМ; 2 – расчет по формуле (2.24)

истечения воды в начале водораспределителя  $\bar{v}_H^{KP}$  от  $\lambda \bar{l}$  и числа Ричардсона (рис. 2.5). Из графика видно, что с возрастанием  $Ri$   $\bar{v}_H^{KP} \rightarrow 1,57$  не зависимо от  $\lambda \bar{l}$ , причем уже при  $Ri=5$  максимальное отклонение относительной скорости истечения от данной величины, соответствующее  $\lambda \bar{l} = 0$  ( $\bar{v}_H^{KP} = 1,52$ ), не превышает 3,2%. Это, согласно выражениям (2.25) и (2.26), приводит к ошибке при определении сопротивления водораспределителя не более 5,7% .

Следовательно, при  $Ri \geq 5$  влиянием параметра  $\lambda \bar{l}$  на сопротивление водораспределителя можно пренебречь. В этом случае сопротивление водораспределителя следует определять по следующей зависимости:

$$\Delta p^{KP} = \left[ \frac{2,47}{(\mu \bar{f}^{KP})^2} + 1 \right] \frac{\rho W_H^2}{2}. \quad (2.37)$$

В рассматриваемом диапазоне чисел Ричардсона применение формул (2.24) и (2.28) дает ошибку, не превышающую 4,5% при определении  $\bar{V}_H^{KP}$  и 8,0% для  $\Delta p^{kp}$ . В связи с этим они также могут быть использованы при расчетах водораспределителя.

Если  $Ri < 5$ , то при расчете сопротивления водораспределителя следует учитывать длину и шероховатость его стенок, определяя  $\bar{V}_H^{KP}$  по приведенному графику. В этом случае потери давления необходимо определить по зависимостям (2.25) и (2.26).

## **2.2. Отбор воды перфорированным водозаборным коллектором постоянного сечения при действии объемных сил**

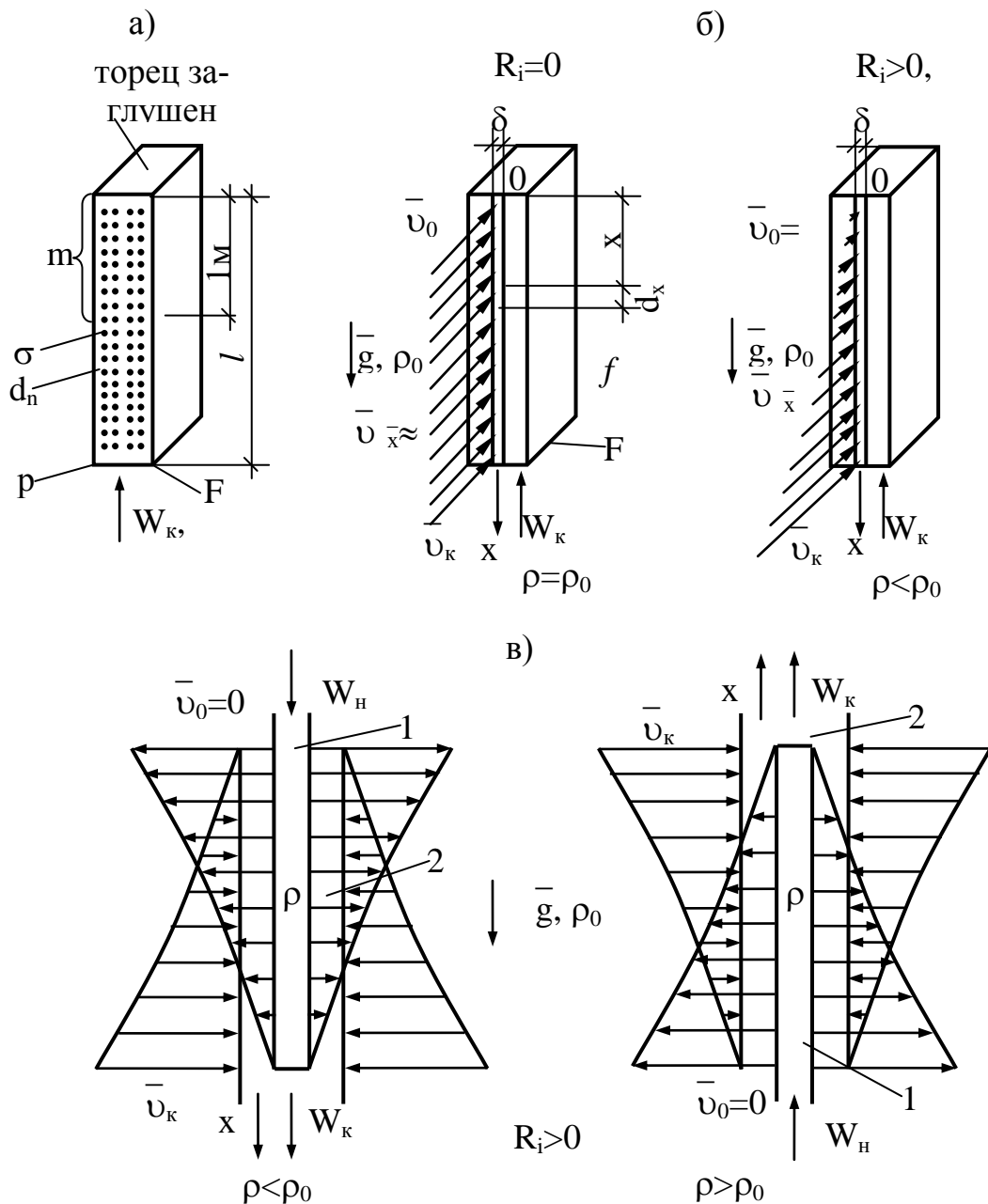
Рассмотрим отбор воды водозаборным коллектором постоянного сечения с равномерной перфорацией по длине при действии объемных сил (рис. 2.5, а). Заменяв перфорированные отверстия условной щелью постоянной ширины (рис. 2.5,б) запишем уравнение количества движения в проекциях на ось коллектора, применительно к объему, ограниченному сечениями  $x$  и  $x+dx$  и его стенками

$$p_x F - (p_x + dp_x) F - \tau_x P dx = \rho F W_x^2 + d(\rho F W_x^2) - \rho F W_x^2,$$

или

$$p_x' + 2\rho W_x W_x' + \tau_x P / F = 0, \quad (2.38)$$

Преобразуем уравнение (2.38), воспользовавшись следующими соотношениями:



**Рис. 2.5. Расчетная схема водозаборного коллектора постоянного сечения с равномерной перфорацией (а) и с условной щелью постоянной ширины (б) в режиме совместной работы с соосно расположенным водораспределителем (в).**

1 – водораспределитель; 2 – водозаборный коллектор.

$$p_x = p_0 + \Delta\rho g x - \rho v_x^2 / 2\mu^2 ; p'_x = \Delta\rho g - \frac{\rho F^2}{\mu^2 \delta^2} W_x W_x'' ,$$

$$\tau_x = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{\rho W_x^2}{2} ; \bar{W}_x = \frac{W_x}{W_K} ; \bar{x} = \frac{x}{l} .$$

В результате получим следующее дифференциальное уравнение

$$\bar{W}_x'' \bar{W}_x' - 2p \bar{W}_x' \bar{W}_x + q \bar{W}_x^2 = p Ri \quad (2.39)$$

где

$$p = \mu^2 \bar{f}^2 ; q = -0,5 \mu^2 \bar{f}^2 \lambda \bar{l} ; Ri = \frac{-gl \Delta\rho}{W_H^2 \rho} ; \Delta\rho = \rho_o - \rho ;$$

$$\bar{f} = \frac{f}{F} = \frac{\delta l}{F} ; \delta = m\sigma ; d_3 = 4F / P ; \bar{l} = \frac{l}{d_3}$$

Граничные условия

$$\text{при } \left. \begin{array}{ll} \bar{x} = 0 & \bar{W}_0 = 0 \\ \bar{x} = 1 & \bar{W}_k = 1 \end{array} \right\} \quad (2.40)$$

Уравнение (2.39) и условия (2.40) дают полную математическую формулировку рассматриваемой краевой задачи.

Допустим, что она решена, т.е. найдена относительная скорость воды внутри коллектора

$$\bar{W}_x = \varphi(p, q, Ri, \bar{x}). \quad (2.41)$$

В таком случае относительная скорость всасывания воды в условную щель

$$\bar{v}_x = \frac{v_x}{v_{cp}} = \frac{F \bar{W}_x'}{\delta v_{cp}} = \frac{F W_k}{\delta l v_{cp}} \bar{W}_x' = \bar{W}_x' . \quad (2.42)$$

В стратификационном аккумуляторе водозаборный коллектор осуществляет неравномерный (селективный) отбор воды, что обуславливается действием архимедовых сил и характеризуется максимальной скоростью всасывания в открытом конце, и минимальной - в заглушенном. Учитывая это обстоятельство, условие на которое он должен быть рассчитан, следующее (рис.2.5, б и в):

$$Ri=0 \quad \bar{V}_{\bar{x}} \approx 1; \quad (2.43)$$

$$Ri>0 \quad \bar{V}_o = 0. \quad (2.44)$$

Определяющей величиной при расчете водозаборного коллектора является параметр условной щели  $\mu\bar{f}$ . Согласно [102], условие (2.43) выполняется при  $\mu\bar{f} \leq 1$ . Параметр условной щели, при котором выполняется условие (2.44) назовем критическим, обозначив через  $\mu\bar{f}^{kp}$ . Установим зависимость  $\mu\bar{f}^{kp}$  от  $Ri$ , для чего несколько упростим задачу. Предположим, что коллектор имеет малую длину и гладкие стенки, т.е.  $\lambda=0$ . Тогда (2.39) примет вид

$$\bar{W}_{\bar{x}}'' \bar{W}_{\bar{x}}' - 2p\bar{W}_{\bar{x}}' \bar{W}_{\bar{x}} = pRi. \quad (2.45)$$

Для случая  $Ri=0$  решение дифференциального уравнения (2.45) с учетом (2.40) имеет вид

$$\bar{W}_{\bar{x}} = \frac{sh\sqrt{2p\bar{x}}}{sh\sqrt{2p}} = \frac{sh\sqrt{2\mu\bar{f}\bar{x}}}{sh\sqrt{2\mu\bar{f}}}. \quad (2.46)$$

Откуда относительная скорость истечения

$$\bar{V}_{\bar{x}} = \bar{W}_{\bar{x}}' = \sqrt{2\mu\bar{f}} \frac{ch\sqrt{2\mu\bar{f}\bar{x}}}{sh\sqrt{2\mu\bar{f}}}. \quad (2.47)$$

Подставив в (2.47) условие (2.44), найдем (для  $\bar{V}_o = 0,01$ )

$$\mu \bar{f}^{kp} = 5,15$$

Для  $Ri \neq 0$  интегрирование (2.45)

$$\bar{W}_{\bar{x}}'^2 - 2p\bar{W}_{\bar{x}}^2 = 2pRi\bar{x} + 2C_1, \quad (2.48)$$

и замена переменной  $\bar{W}_{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{2p}} \psi sh y(\bar{x}),$  (2.49)

даёт  $y' + \frac{\psi'}{\psi} thy = \pm \sqrt{2p},$  (2.50)

где  $\psi = \sqrt{2pRi\bar{x} + 2C_1}.$  (2.51)

Учитывая, что для малых значений аргумента  $th y \approx y$ , имеем

$$y' + \frac{\psi'}{\psi} y = \pm \sqrt{2p}. \quad (2.52)$$

Общее решение линейного уравнения (2.52)

$$y = \pm \frac{\sqrt{8p}}{3} \left( \bar{x} + \frac{C_1}{pRi} \right) + \frac{C_2}{\sqrt{pRi\bar{x} + C_1}}, \quad (2.53)$$

откуда с учетом (2.51) и (2.49) получаем

$$\bar{W}_{\bar{x}} = \sqrt{Ri\bar{x} + \frac{C_1}{p}} sh \left[ \pm \frac{\sqrt{8p}}{3} \left( \bar{x} + \frac{C_1}{pRi} \right) + \frac{C_2}{\sqrt{pRi\bar{x} + C_1}} \right]. \quad (2.54)$$

Подставляя (2.44) и (2.40) соответственно в (2.48) и (2.54), а также учитывая  $\mu \bar{f}^{kp} > 0$ , находим

$$\mu \bar{f}^{kp} = \frac{3}{\sqrt{8}} Arsh \frac{1}{\sqrt{Ri}}. \quad (2.55)$$

Формулу (2.55) можно использовать для расчета водозаборного коллектора стратификационного аккумулятора.

Учитывая, что при соосном расположении водораспределителя внутри водозаборного коллектора (см. рис. 2.5, в), последний одновременно должен удовлетворять требованиям, предъявляемым и к водораспределителю, сравним числовые значения  $\mu \bar{f}^{kp}$ , получаемые по формулам (2.55) и (2.22).

Как следует из рис.2.5, где представлены теоретические кривые, построенные по расчетам на ПЭВМ и аналитическим зависимостям (2.55) и (2.22), при  $| Ri | \geq 1,5$  результаты расчетов удовлетворительно согласуются. Следовательно, расчет коллектора из условий работы в режиме раздачи одновременно обеспечивает оптимальность его работы в режиме селективного отбора теплоносителя. Поэтому степень перфорации водораспределителя и водозаборного коллектора должна быть одинаковой.

### 2.3. Расчет водораспределителя стратификационного аккумулятора тепла

Для равномерно перфорированного по длине водораспределителя постоянного сечения можно предложить следующий метод расчета.

Исходными данными являются:  $l, G, t, t_0, d_n, \mu, K$ .

Расчет начинают с вычисления  $d_3, F, W_n$ . Затем находят  $Ri$  и  $Re$ .

Определяют коэффициент сопротивления трения в зависимости от числа Рейнольдса по формуле А.Д. Альтшуля :

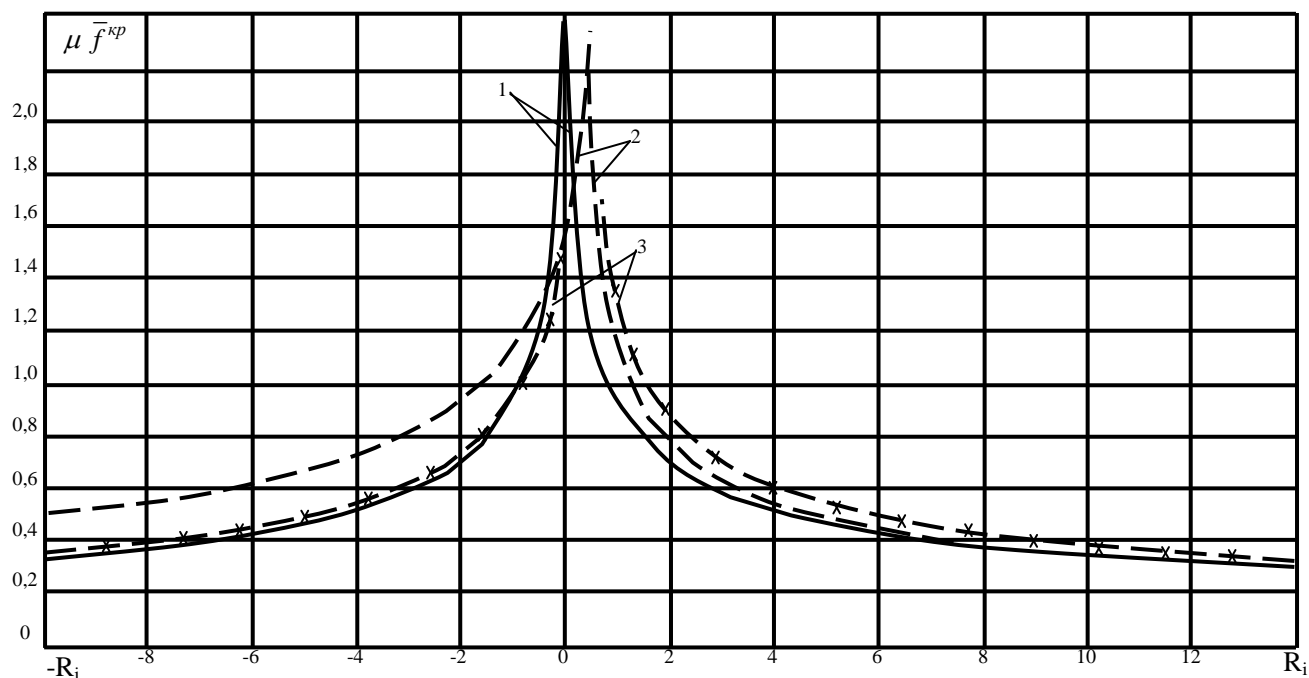
$$\lambda = 0,11 \sqrt[4]{68 / Re + K / d_3},$$

и вычисляют параметр водораспределителя

$$\lambda \bar{l} = \lambda l / d_3.$$

Устанавливают, какой из трех случаев имеет место:

$$\lambda \bar{l} \leq 0,2; \lambda \bar{l} > 0,2 \text{ и } | Ri | \geq 5; \lambda \bar{l} > 0,2 \text{ и } | Ri | < 5.$$



**Рис. 2.6. Зависимость критического значения параметра условной щели водозаборного коллектора (1) и водораспределителя (2, 3) от числа Ричардсона.**

1 – расчет по формуле (2.59); 2 – расчет по формуле (2.25); 3 – расчет на ЭВМ.

В первом и во втором случаях потерями давления на трение пренебрегают и находят  $\mu f^{\bar{k}p}$  по формуле (2.22), в третьем случае, когда необходимо учесть длину и шероховатость стенок водораспределителя,  $\mu f^{\bar{k}p}$  определяют по графикам рис. 2.4.

Затем подсчитывают площадь условной щели

$$f = \frac{(\mu f^{\bar{k}p}) F}{\mu}.$$

Определяют количество перфорированных отверстий

$$m = 4f / \pi d_n^2.$$

Находят сопротивление водораспределителя по формулам (2.27) для  $Ri < 0,5$ ; (2.37) для  $Ri > 5$ ; (2.25), (2.26) и графику на рис. 2.6 для  $1 < Ri < 5$ .

В расчетах необходимо так задаться  $d_{\text{э}}$ , чтобы  $|Ri| \geq 1,5$ , иначе не будет соблюдено условие  $\mu \bar{f}^{kp} \leq 1$ , вытекающее из (2.10).

## 2.4. Оценка эффективности температурного расслоения воды в аккумуляторах. Коэффициент стратификации

Как уже отмечалось (см. гл. 1), в настоящее время отсутствует надежный критерий оценки стратификационных свойств водяных аккумуляторов, который позволил бы производить сравнение между собой различные конструкции по степени совершенства процессов зарядки и разрядки. Это обстоятельство затрудняет проектирование систем аккумулярования.

Для нахождения соответствующих зависимостей, рассмотрим процесс зарядки аккумулятора при постоянной входной температуре [27], т.е. когда  $t_1 = const$  (рис. 2.7,а).

Теплопроизводительность солнечного коллектора за бесконечно малый промежуток времени

$$dQ = Gc_p(t_1 - t_2)d\tau, \quad (2.56)$$

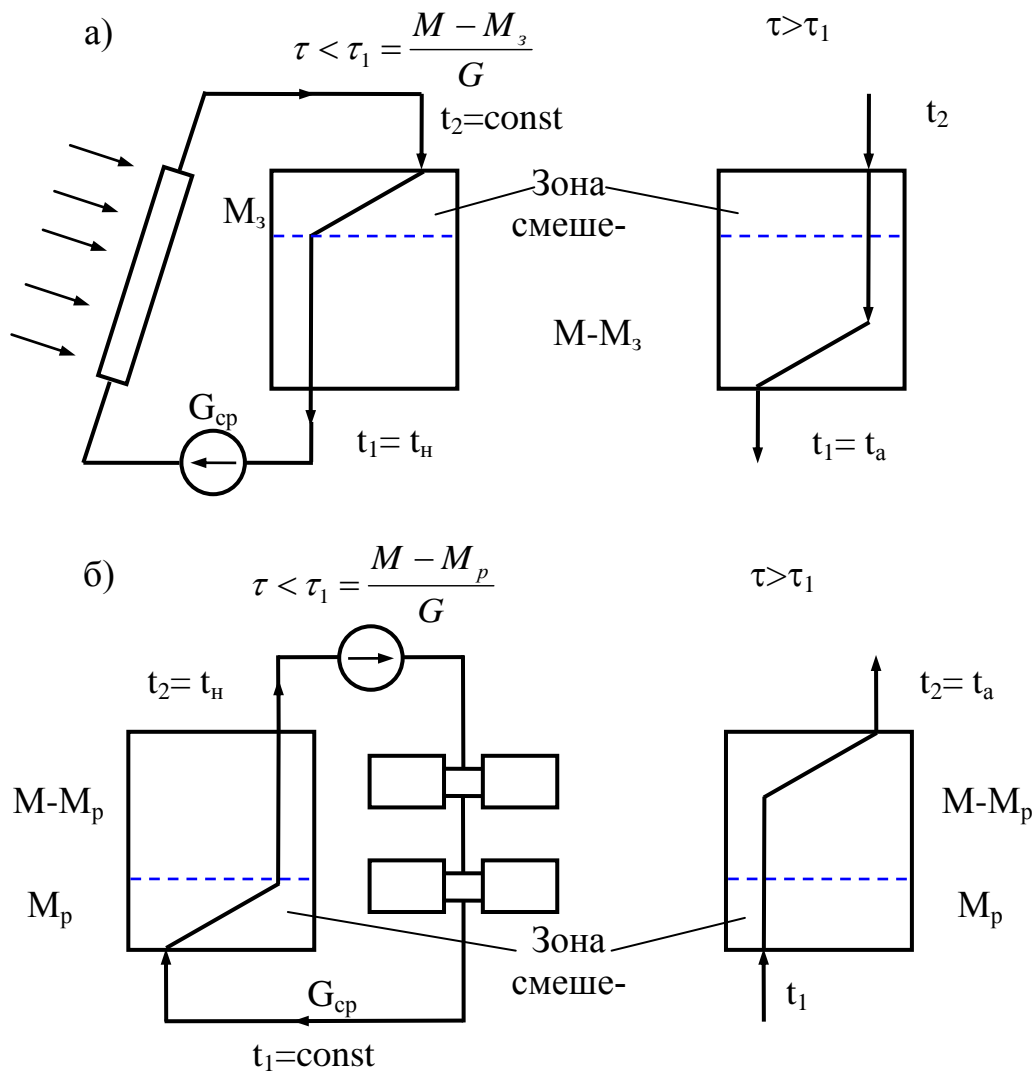
с другой стороны, превращение тепла в аккумуляторе за тот же промежуток времени

$$dQ = Mc_p dt_a. \quad (2.57)$$

Приравнивая выражения (2.56) и (2.57), находим:

$$d\tau = \frac{M}{G} \cdot \frac{dt_a}{t_1 - t_2}. \quad (2.58)$$

Непрерывным условием для решения дифференциального уравнения (2.58) является смысловое равенство переменных в числителе и знаменателе записанной дроби. Для правой части уравнения (2.58) это требование не соблюдается, так как в числителе под знаком дифференциалов стоит текущее значение средней температуры аккумулятора, а в знаменателе - текущее значение температуры воды на выходе из него.



**Рис. 2.7. Процесс зарядки (а) и разрядки (б) аккумулятора с частичным перемешиванием греющего и нагреваемого теплоносителей.**

Установить связь между этими переменными представляется возможным только для случая идеального перемешивания воды в баке, когда

$t_a = t_2$ . Но этого условия оказывается достаточно для списания процесса в целом.

В самом деле, при идеальном расслоении  $t_2 = t_H = \text{const}$ .

Интегрируя уравнение (2.56), находим

$$Q = Gc_p(t_1 - t_2)\tau. \quad (2.59)$$

Для случая идеального перемешивания, подставляя  $dt_2$  вместо  $dt_a$  в (2.58), а затем интегрируя, получаем

$$Q = Mc_p(t_1 - t_H) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G}{M}\tau\right) \right]. \quad (2.60)$$

Реальный процесс аккумуляции с частичным перемешиванием горячей воды характеризуется двумя стадиями зарядки. В первой стадии, при значениях  $\tau$  от  $\tau = 0$  до  $\tau = \tau_1$ , несмотря на полное перемешивание горячей воды в верхней части бака массой  $M_{CM}$  (зона смешивания), температура на выходе аккумулятора постоянна и равна начальной (см. рис. 4.13, а), т.е. процесс зарядки протекает аналогично случаю с идеальным расслоением и описывается уравнением (2.59). Продолжительность этой стадии численно равна времени отбора не смешиваемой части воды из аккумулятора

$$\tau_1 = \frac{M - M_{CM}}{G}. \quad (2.61)$$

Начиная с момента времени  $\tau > \tau_1$  происходит обратное явление, при котором перемешивание в верхней части бака уже не оказывает влияния на градиент температуры по высоте, но тем не менее на выходе из аккумулятора температура непрерывно изменяется. Эта стадия зарядки протекает аналогично случаю с идеальным перемешиванием, с той лишь разницей, что в ней участвует не вся масса аккумулирующей среды  $M$ , а толь-

ко ее часть ( $M_{CM}$ ). Поэтому обозначив через  $\beta_3$  долю  $M_{CM}$  от  $M$  и подставив в (2.60), находим зависимость, описывающую данный процесс

$$Q = \beta_3 M c_p (t_1 - t_H) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G}{\beta_3 M} \tau\right) \right]. \quad (2.62)$$

Введем обозначения:

$$\bar{\tau} = G\tau / M; \bar{Q} = Q / Q^{\max} = Q / M c_p (t_1 - t_H),$$

где  $Q^{\max}$  - максимальное количество тепла, которое может быть саккумулировано в баке при повышении температуры с  $t_H$  до  $t_1$ .

Тогда  $\tau = M\bar{\tau} / G; Q = M c_p (t_1 - t_H) \cdot \bar{Q}$ .

Подставляя найденные значения  $\tau$  и  $Q$  соответственно в (2.59), (2.61) и (2.62), получим

$$\bar{Q} = \begin{cases} \bar{\tau} & \bar{\tau} \leq (1 - \beta_3) \\ 1 - \beta_3 \exp\left(\frac{1 - \beta_3 - \bar{\tau}}{\beta_3}\right) & \bar{\tau} \geq (1 - \beta_3) \end{cases}. \quad (2.63)$$

Формула (2.63) описывает реальный процесс зарядки аккумулятора при любой степени расслоения. Как видно из рис. 2.8, где показаны расчетные кривые при различных значениях  $\beta_3$ , для полной зарядки идеально стратификационного аккумулятора ( $\beta_3=0$ ) достаточен однократный обмен теплоносителя в его объеме, а для идеально перемешиваемого - пятикратный (зарядка до 99%).

Рассмотрев аналогичным образом процесс разрядки аккумулятора при постоянной входной температуре воды  $t_1$ , возвращающейся из контура потребителя (см. рис. 2.9, б), можно показать, что для него также справедливы полученная зависимость (2.63) и вытекающие из нее выводы, касающиеся темпа разрядки при различной степени температурного рассло-

ения воды. При этом доля перемешавшейся в нижней части бака воды от общей ее массы будет определяться коэффициентом смещения при разрядке  $\beta_p$ .

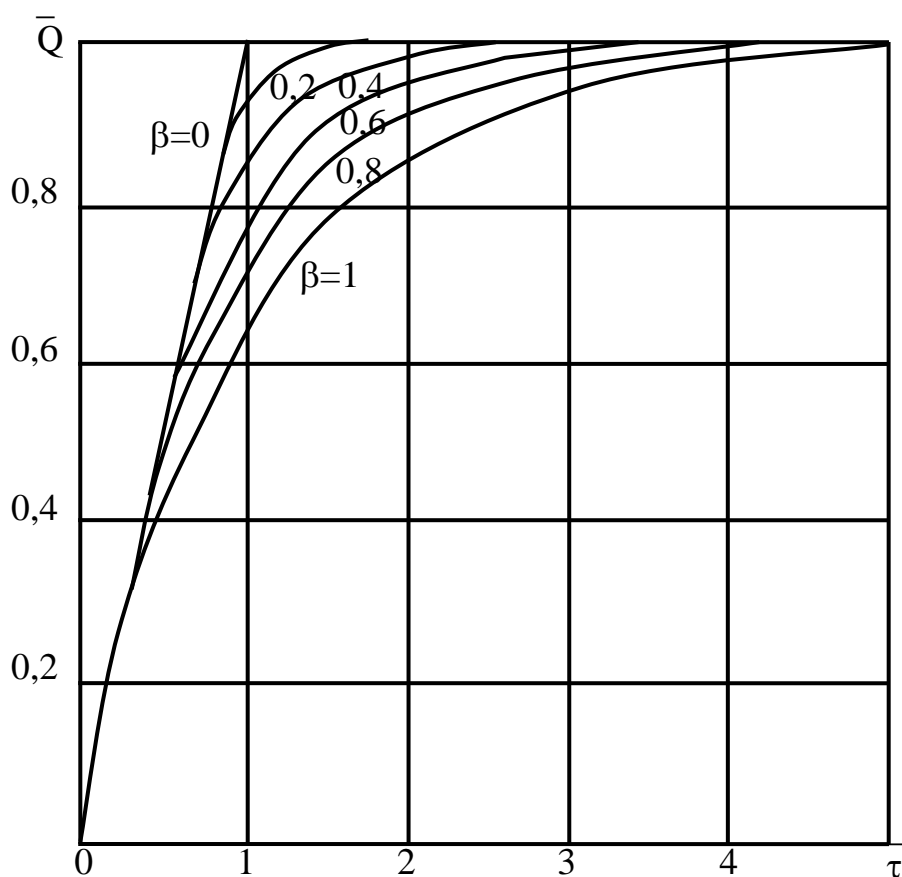


Рис. 2.8. Зависимость темпа зарядки (разрядки) аккумулятора от коэффициента смещения.

При последовательном протекании обоих процессов, степень совершенства температурного расслоения воды в аккумуляторе за цикл зарядка-разрядка определяется наибольшей из величин  $\beta_3$  и  $\beta_p$ , которую для простоты назовем коэффициентом смещения  $\beta_{CM}$ . Вследствие этого общее отклонение реального процесса от идеального можно охарактеризовать коэффициентом стратификации

$$K_c = 1 - \beta_{CM} = 1 - \frac{M_{CM}}{M} = 1 - \frac{Q_{CM}}{Q_{max}} = \frac{Q_c}{Q_{max}}, \quad (2.64)$$

где  $Q_C = Q^{\max} - Q_{CM}$ .

Согласно уравнению (2.64),  $K_c$  представляет собой отношение фактически накопленного и переданного потребителю без потерь температурного потенциала тепла  $Q_C$  к максимально возможному  $Q^{\max}$ , когда зарядка и разрядка аккумулятора происходит при идеальном температурном расслоении аккумулирующей среды. Коэффициент стратификации однозначно характеризует степень совершенства температурного расслоения воды в аккумуляторе независимо от градиента температур по его высоте, что позволяет производить сравнение между собой различные конструкции стратификационных аккумуляторов. При этом достаточно иметь экспериментальные данные по кратности обмена теплоносителя  $\bar{\tau}$  в объеме аккумулятора, необходимой для его полной (до 99%) зарядки (разрядки), которая, как следует из выражений (2.63) и (2.64), связана  $K_c$  и  $\beta_{CM}$  зависимостями

$$\bar{\tau} = K_C - (1 - K_C) \ln \frac{0,0065}{1 - K_C}; \quad (2.65)$$

$$\bar{\tau} = 1 - \beta_{CM} \left( 1 + \ln \frac{0,0065}{\beta_{CM}} \right). \quad (2.66)$$

Решить (2.65) и (2.66) относительно  $K_c$  и  $\beta_{CM}$  не представляется возможным. Однако для их определения можно воспользоваться следующими приближенными зависимостями

$$K_c = 1,357 - 0,38\bar{\tau} + 0,02173\bar{\tau}^2. \quad (2.67)$$

$$\beta_{CM} = -0,357 + 0,38\bar{\tau} - 0,02173\bar{\tau}^2, \quad (2.68)$$

которые при расчетах дают незначительные расхождения с формулами (2.65) и (2.66).



Согласно [1], действие архимедовых сил, обеспечивающих селективную раздачу воды водораспределителем малой длины и гладкими стенками (рисунок, б), становится решающим при критическом значении параметра условной щели

$$\mu \bar{f}^{kp} = \begin{cases} 1,5\pi Ri \left[ 1 - (1 - 2Ri)^{1,5} \right]^{-1} & Ri \leq 0,5 \\ 1,5 \text{Arc sin}(2Ri)^{-0,5} & Ri \geq 0,5 \end{cases} \quad (2.69)$$

$$\text{где } Ri = \frac{-gl}{W_i^2} \frac{\Delta\rho}{\rho}; \quad \Delta\rho = \rho_0 - \rho; \quad (2.70)$$

$$\bar{f} = \frac{f}{F} = \frac{\delta}{F}; \quad \delta = m\sigma \quad (2.71)$$

В термосифонном гелиоконтуре архимедовы силы направлены вверх ( $\Delta\rho > 0$ ), и модифицированное число Ричардсона  $Ri < 0$ , поэтому для расчета водораспределителя справедливо верхнее выражение в формуле (2.69).

Установим зависимость  $Ri$  от режимных и геометрических параметров термосифонного гелиоконтур.

Модифицированное число Ричардсона представляет собой соотношений архимедовых сил и сил инерции в начале водораспределителя

$$Ri = \frac{-gl\Delta\rho}{2} \cdot \frac{2}{\rho W_H^2} = \frac{-gl\Delta\rho}{2 \frac{\rho W_H^2}{2}} \quad (2.72)$$

Согласно [2] сопротивлений водораспределителя при  $Ri < 0$  равно динамическому давлению

$$\Delta p = \frac{\rho W_H^2}{2} \quad (2.73)$$

С другой стороны, потери давления в водораспределителе можно выразить в долях от циркуляционного давления в гелиоконтуре

$$\Delta p = a\Delta p_e \quad (2.74)$$

$$\text{где } a = 1 - \frac{\Delta p_\Gamma}{\Delta p_e}; \quad (2.75)$$

$$\Delta p_e = g \sum_1^N h_i (\rho_{i+1} - \rho_i); \quad (2.76)$$

или с учетом теоремы о среднем значении [3]

$$\Delta p_e = gh(\rho_0 - \rho); \quad (2.77)$$

здесь  $h$ - расстояние по вертикали между центрами нагрева и охлаждения воды, м, которые при линейном изменении плотности теплоносителя в гелиоконтуре располагаются в середине солнечного коллектора и аккумуляторного бака (рисунок, а).

Выразив в (2.72) динамическое давление через сопротивление водораспределителя с учетом (2.74) и (2.77), получим

$$Ri = -\frac{l}{2ah}. \quad (2.78)$$

Подставляя (2.78) в (2.69) для случая  $Ri < 0$ , находим

$$\mu \bar{f}^{KP} = -\frac{0,75\pi l}{ah \left[ \left( 1 + \frac{l}{ah} \right)^{3/2} - 1 \right]}. \quad (2.79)$$

Из (2.79) следует формула для определения суммарной площади перфорированных отверстий водораспределителя, которая равна площади условной щели,

$$f = \frac{0,75\pi l F}{\mu ah \left[ \left( 1 + \frac{l}{ah} \right)^{3/2} - 1 \right]}, \quad (2.80)$$

или для водораспределителя круглого сечения

$$f = \frac{0,19\pi^2 l D^2}{\mu ah \left[ \left( 1 + \frac{l}{ah} \right)^{3/2} - 1 \right]}, \quad (2.81)$$

Из полученных выражений видно, что для нахождения  $f$  необходимо знать площадь сечения (диаметр  $D$ ) водораспределителя, которая также зависит от режимных параметров термосифонного гелиоконтура.

Для установления данной зависимости воспользуемся формулами (2.73) и (2.74), а также соотношением

$$G = 3600 \rho F W_n, \quad (2.82)$$

совместное решение, которых относительно искомой площади сечения водораспределителя  $F$  дает

$$F = \frac{G}{3600 \sqrt{2 \rho a \Delta p_e}}, \quad (2.83)$$

или, выражая площадь через диаметр, находим

$$D = \frac{1}{30} \sqrt{\frac{G}{\pi \sqrt{2 \rho a \Delta p_e}}}, \quad (2.84)$$

где  $G$ - часовой расход воды в гелиоконтуре, кг/ч.

Полученные зависимости позволяют предложить следующую методику расчета водораспределителя стратификационного аккумулятора теплоты термосифонной системы.

Обычно заданы следующие величины:  $\Delta p_e, \Delta p_\Gamma, \Delta p$  и  $G$ , которые определяются в результате теплового и гидравлического расчетов термосифонного гелиоконтура, а также  $l$  и  $h$ .

Искомыми величинами являются: суммарная площадь перфорированных отверстий водораспределителя  $f$  и количество перфорированных отверстий на 1 м длины водораспределителя  $m$ .

Расчет ведется в следующей последовательности:

- 1) по формулам (2.75) и (2.84) вычисляют  $a$  и  $D$ ;
- 2) из условия  $D_\phi \geq D$  принимают по существующему сортаменту труб фактический диаметр водораспределителя;
- 3) определяют фактическую долю потерь давления в водораспределителе

$$a_\phi = G^2 / 1620000 \pi^2 \rho D_\phi^4 \Delta p_e;$$

- 4) подставляя полученные значения  $D_\phi$  и  $a_\delta$  в (2.81), находят  $f$ ;
- 5) задавшись из конструктивных соображений диаметром перфорированного отверстия  $d$ , подсчитывают площадь перфорированного отверстия  $\sigma$ ,
- 6) определяют количество перфорированных отверстий на 1 м длины водораспределителя  $m=f/\sigma l$ ;
- 7) принимая число отверстий в каждом ряду перфорированных отверстий, находят длину шага между их рядами.

По вышеописанной методике рассчитан водораспределитель стратификационных аккумуляторов теплоты емкостью 2 и 3 м<sup>3</sup>, примененных в типовых проектах автономных солнечных установок горячего водоснабжения производительностью 2,5 ; 4,0 и 6,0 м<sup>3</sup> в сутки. В качестве водораспределителей в аккумуляторах использованы стальные оцинкованные трубы  $\varnothing$  50 мм и длиной 1,2 м, имеющие 172 перфорированных отверстия  $\varnothing$  6 мм, расположенных в 43 ряда с шагом 24 мм.

### **Выводы по II главе**

1. Выполнены теоретические исследования раздачи воды перфорированным водораспределителем постоянного сечения при действии объемных сил. Разработана и решена физико-математическая модель процесса.
2. отбора воды перфорированным водозаборным коллектором постоянного сечения при действии объемных сил.
3. Предложена методика расчета водораспределителя саморегулирующегося аккумулятора теплоты.
4. Выполнена оценка эффективности температурного расслоения воды в аккумуляторах. Предложен коэффициент стратификации, позволяющий сравнивать различные конструкции тепловых аккумуляторов по эффективности температурного расслоения.

5. Рассмотрена особенность расчета водораспределителя саморегулирующегося аккумулятора теплоты термосифонной системы.

## ГЛАВА III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ САМО-РЕГУЛИРУЮЩЕГОСЯ АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОТЫ

### 3.1. Описание экспериментальной установки и методика проведения исследований

Эксперименты по проверке теоретических решений были проведены в лаборатории аэродинамики топочных процессов САФ ВНИИПромгаза на универсальном аэродинамическом стенде.

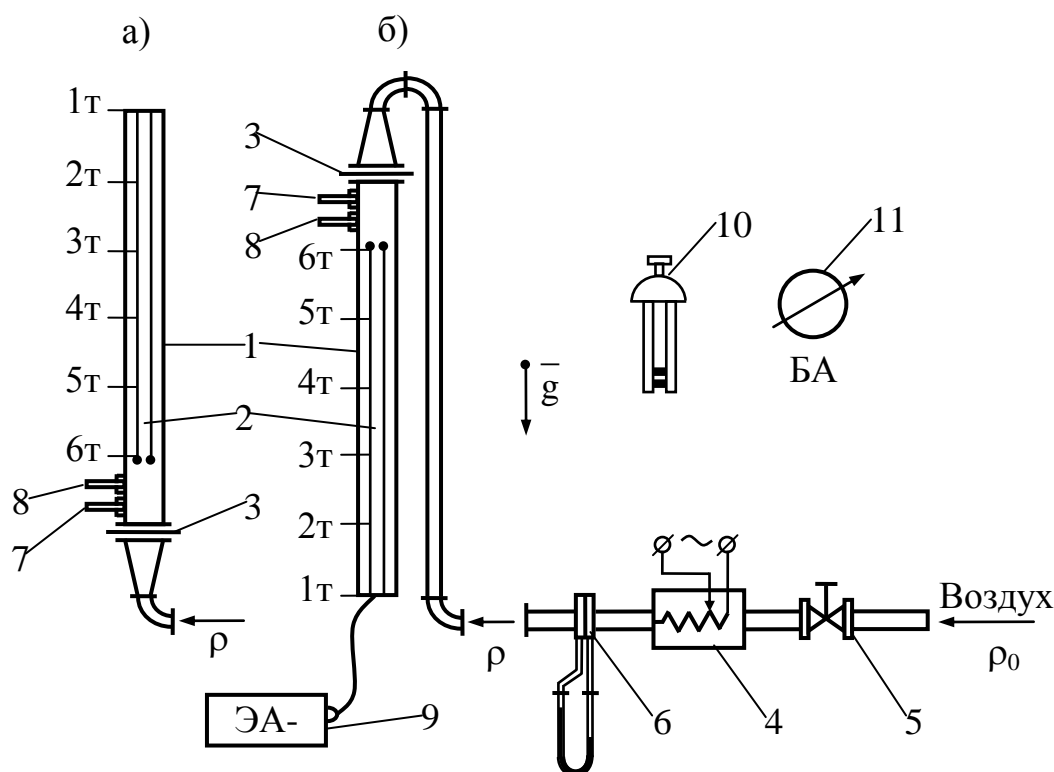
Опытный образец воздухораспределителя имел длину  $l = 1,5$  м и диаметр  $d = 200$  мм. По его длине была устроена щель шириной  $\delta = 50$  мм, снабженная заслонкой, имеющей семь фиксированных положений. Шероховатости внутренней поверхности воздухораспределителя изменялась путем ее покрытия шлифовальными шкурками с различной зернистостью абразивного материала.

Для испытаний воздухораспределитель выставлялся вертикально и соединялся прямым воздуховодом (того же диаметра) через диффузор с распределительной сетью воздуховодов аэродинамического стенда (рис. 2.6). Подогретый воздух подавался в воздухораспределитель снизу-вверх, при исследовании режима  $Ri < 0$ , или сверху-вниз, при исследовании режима  $Ri > 0$ .

Аэродинамический стенд состоял из воздуходувки, сети воздуховодов, мерительных участков, запорно-регулирующей арматуры и контрольно-измерительных приборов. Принципиальная схема части стенда приведена на рис. 3.1.

Поток воздуха, количество которого регулировалось задвижкой 5, из воздуходувки поступал в электрическую печь 4, где подогревался до требуемой температуры ( $50-85^{\circ}\text{C}$ ). Далее нагретый воздух подавался в воздухораспределитель 1 и истекал из его продольной щели 2 в помещение. После диффузора, на прямолинейном мерительном участке воздуховода, рас-

полагалась металлическая сетка 3, на которой для выравнивания воздушного потока была приложена марля, сложенная в два слоя.



**Рис.3.1. Принципиальная схема аэродинамического стенда для исследования распределителя в режимах  $R_i < 0$  (а) и  $R_i > 0$  (б).**

1 – испытуемый распределитель; 2 – продольная щель, снабженная заслонкой; 3 – спрямляющая сетка; 4 – электронагреватель; 5 – задвижка; 6 – нормальная дроссельная диафрагма с манометром; 7 – «сухие» термометры; 8 – «мокрые» термометры; 9 – термоанемометр; 10 – психрометр; 11 – барометр.

Скорость истечения воздуха замеряли по высоте воздураспределителя в шести точках (см. рис.3.1.) полупроводниковым термоанемометром 9 марки ЭА-2М, изготовленным Уральским ПромстройНИИпроектом. Датчик прибора передвигался с помощью координатника.

Параметры нагретого воздуха определяли по показаниям сухих 7 и мокрых 8 ртутных термометров с ценой делений  $0,1^\circ\text{C}$ , расположенных до воздураспределителя, а параметры воздуха в помещении - психрометром

Асмана и метеорологическим барометром-анероидом БАММ-1. Расход воздуха определяли по показаниям  $U$ -образного манометра, заправленного дистиллированной водой и подключенного к нормальной дроссельной диафрагме 6.

Отсчет показаний контрольно-измерительных приборов производили многократно, по достижению установившегося теплового состояния стенда, через каждые одну-две минуты. Из 4 ÷ 5 зарегистрированных показаний приборов принимали средние арифметические значения.

Для уменьшения влияния теплотерь воздухоораспределитель и соединительные воздуховоды были тщательно теплоизолированы ватой и паралоном толщиной 30 мм.

Суть опытов заключалась в экспериментальном определении числа  $Ri$  и поля скоростей по длине щели при разных значениях  $\mu f^{KP}$  и  $\lambda l$ .

Для этого, зафиксировав заслонку воздухоораспределителя в одном из семи положений, соответствующих  $\mu f^{KP}$  от 0,3 до 1,5 с шагом 0,2, включали воздухоудувку. Изменяя расход и температуру подогреваемого воздуха задвижкой 5 и регулятором электронагревательной печи 4, устанавливали такой режим его истечения из щели, при котором скорость  $v_H = 0$  ( $Ri < 0$ ) или  $v_K = 0$  ( $Ri > 0$ ). В этом режиме снимали показания со всех контрольно-измерительных приборов.

Аналогично проводились опыты при остальных положениях заслонки, которые затем повторяли при покрытии внутренней поверхности шлифовальными шкурками с различной зернистостью абразивного материала.

**Всего было проведено 42 опыта.**

Обработка экспериментальных данных состояла из двух этапов: первичной обработки опытных материалов и окончательной обработки.

В процессе первичной обработки определяли величины  $\rho, \rho_0, W_H, v_{cp}, v_n$ . Методика первичной обработки подробно изложена в

работах О.Я. Кокорина [25], А.В. Нестеренко [26], В.Н. Талиева [32], И.Е. Идельчика [40] и здесь не приводится.

В процессе окончательной обработки определяли значения числа Ричардсона и относительной скорости истечения воздуха, по которым затем строили зависимости критического параметра условной щели  $\mu\bar{f}^{KP}$  от  $Ri$ , и  $\bar{V}n$  от  $\bar{x}$ .

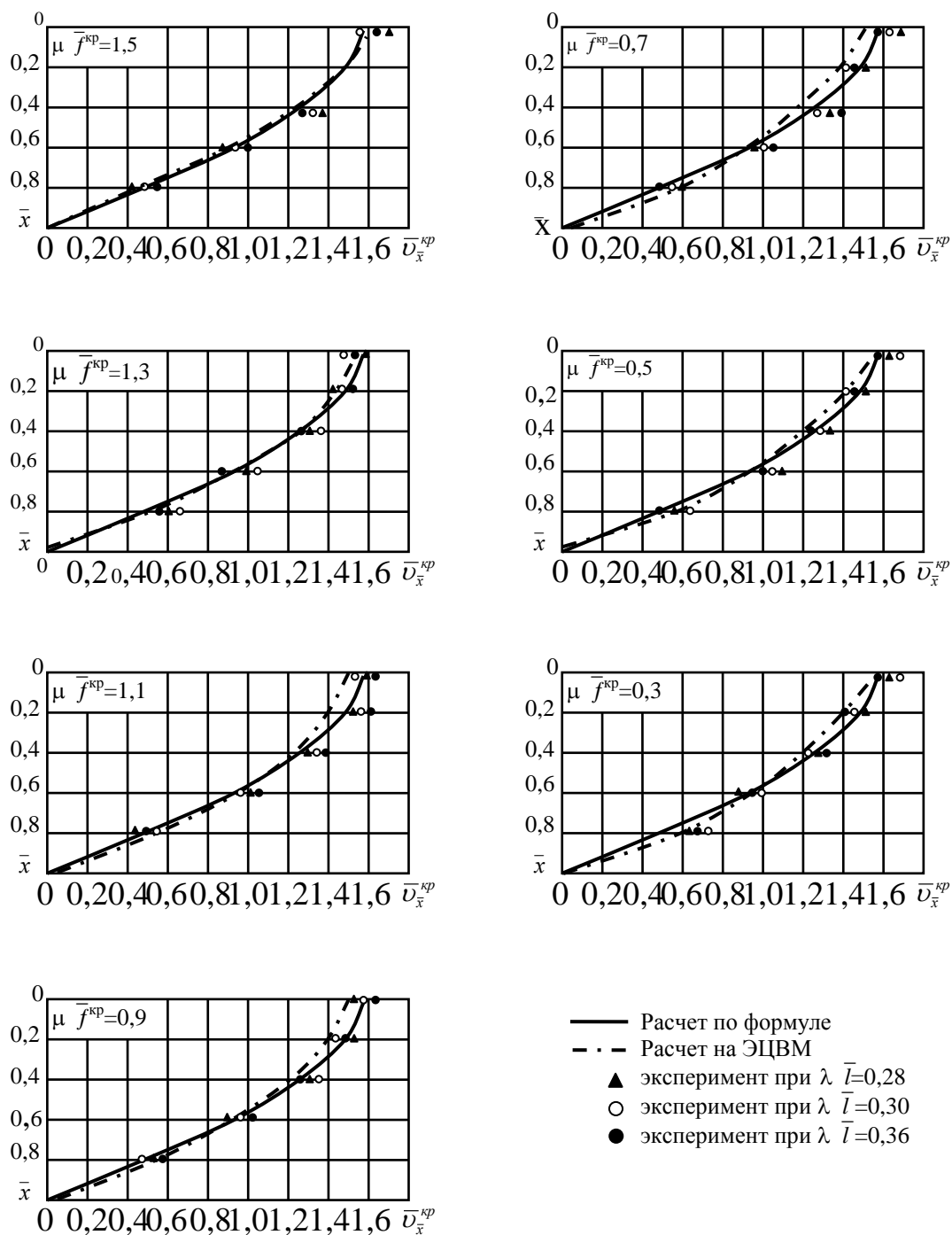
Таким образом, можно заключить, что выведенные аналитические зависимости подтвердились опытными данными и могут быть использованы при расчете водораспределителя стратификационного аккумулятора тепла.

### 3.2. Результаты экспериментальных исследований

Как следует из рис.2.3., где представлены экспериментальные данные, а также теоретические кривые, построенные по формуле (2.22) и расчетам на ПЭВМ, результаты теоретического анализа и эксперимента в основном удовлетворительно согласуются. Некоторое расхождение опытных данных по сравнению с результатами расчетов, наблюдаемое при больших числах Ричардсона, объясняется, по-видимому, ошибками эксперимента, которые существенно возрастали с уменьшением скорости воздуха  $Wn$  в начале водораспределителя.

На рис. 3.2. и 3.3 представлены опытные данные по распределению относительной скорости истечения  $\bar{V}_x^{KP}$  вдоль распределителя при  $Ri < 0$  и  $Ri > 0$ , которые также находятся в удовлетворительном согласии с результатами расчетов.

Таким образом, можно заключить, что выведенные аналитические зависимости подтвердились опытными данными и могут быть использованы при расчете водораспределителя стратификационного аккумулятора тепла.



**Рис.3.2.** Относительная скорость  $\bar{v}_x^{kp}$  истечения воздуха по длине воз-  
духораспределителя в режиме  $Ri < 0$ .

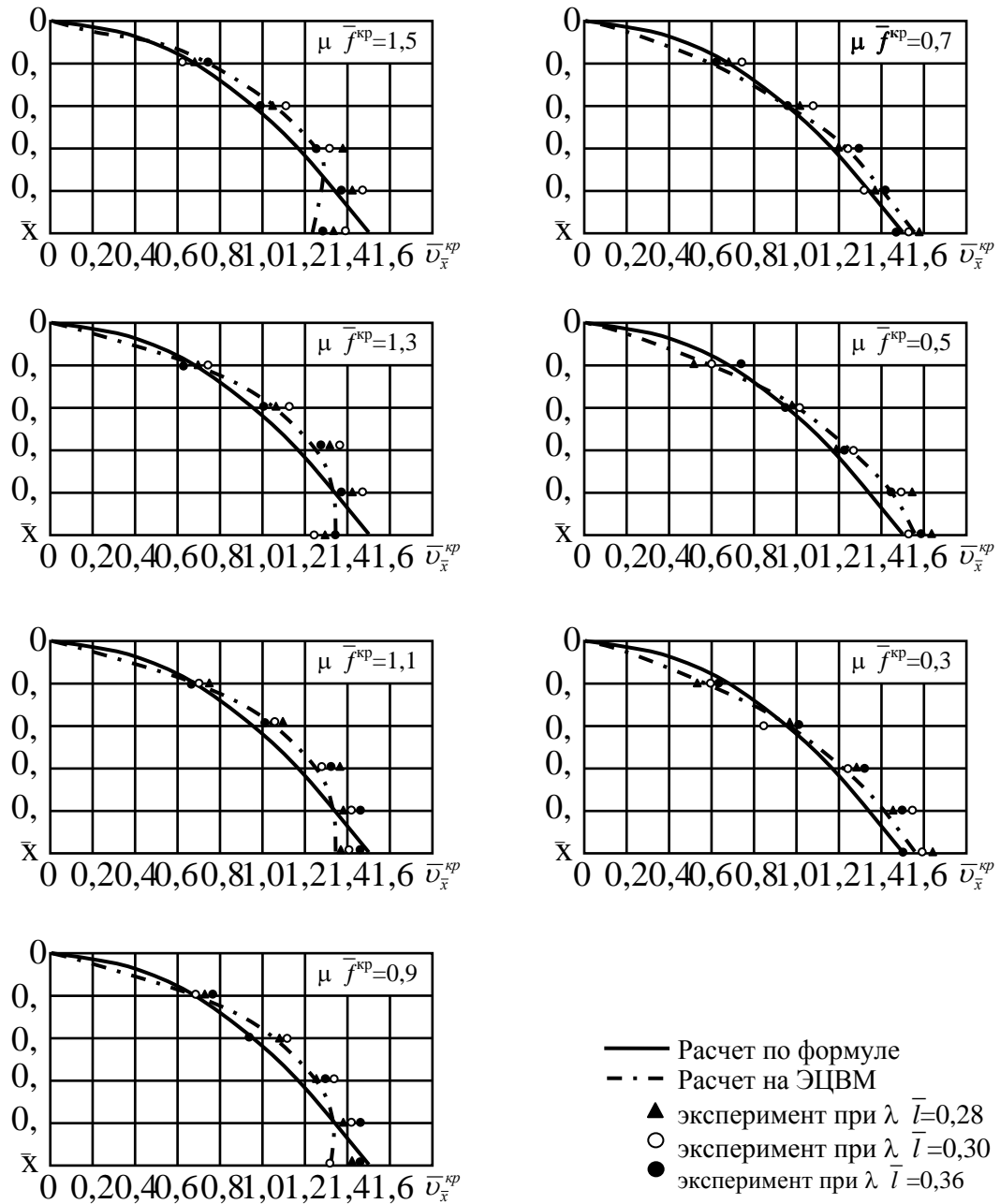


Рис.3.3. Относительная скорость  $\bar{v}_x^{kp}$  истечения воздуха по длине воздухо-распределителя в режиме  $Ri > 0$ .

### Выводы по III главе

1. Результаты теоретического анализа и эксперимента в основном удовлетворительно согласуются. Некоторое расхождение опытных данных по сравнению с результатами расчетов, наблюдаемое при больших числах Ричардсона, объясняется, по-видимому, ошибками эксперимента, которые существенно возрастали с уменьшением скорости воздуха  $W_n$  в начале воздухораспределителя.
2. Выведенные аналитические зависимости подтвердились опытными данными и могут быть использованы при расчете водораспределителя стратификационного аккумулятора тепла.

## Заключение

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Разработанные саморегулирующиеся устройства для стратификационного аккумулирования тепла обеспечивают более экономичное и надежное управление системой аккумулирования по сравнению с другими средствами автоматизации.

2. Поддержание температурной стратификации при зарядке и разрядке водяных аккумуляторов тепла достигается применением селективной раздачи и отбора теплоносителя по высоте бака. Саморегулирование раздачи и отбора можно осуществить, используя влияние архимедовых сил на движение жидкости. Саморегулирующийся стратификационный аккумулятор обеспечивает повышение эффективности системы солнечного теплоснабжения на 15-20 %, позволяет отказаться от многосекционной конструкции аккумулятора со сложной автоматикой слежения.

3. Физико-математическая модель процессов раздачи и отбора теплоносителя в аккумуляторах с перфорированными трубопроводами, включающая дифференциальные уравнения (5) и (8), граничные условия (6) и (9), справедлива для неизотермических потоков при действии объемных сил.

В стратификационных аккумуляторах следует применять водораспределители и водоотборники с параметром условной щели, равным критическому значению, определяемому из условия равенства нулю скорости истечения и отсоса воды на их концах. При этом аналитическим решением уравнений модели для чисел Ричардсона  $|Ri| > 5$  являются формулы (7) и (10). Если  $|Ri| < 5$ , то длину и шероховатость стенок перфорированных трубопроводов следует учитывать, используя численные решения уравнений на ПЭВМ.

4. С помощью предложенного коэффициента статификации  $K_c$  можно производить сравнение различных конструкций водяных аккумулято-

ров тепла по степени совершенства температурного расслоения воды при их зарядке (разрядке). Коэффициент стратификации рекомендуется использовать в качестве основной паспортной характеристики аккумулятора при нормативном расходе теплоносителя.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелентьев Л.А. О энергетической программе // Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Техника». - М. Знание, 1986 г. № I. С.3-21.
2. Аккумулирование тепла / Левенберг В. Д., Ткач М. Р., Гольстрем В. А. - Киев: Техника, 1991. - 112 с.
3. Амерханов Р. А., Долинский А. А., Морозюк Т. В. Аккумулирование теплоты в системах теплоснабжения сельского хозяйства // Промышленная теплотехника. - 2002. - № 1. - С. 106-108.
4. Мацевитый Ю. М., Ганжа Н. Г., Хищенко А. В. Оценка энергетической эффективности система электротеплоаккумуляционного отопления административных зданий // Энергосбережение • Энергетика • Энергоаудит. - 2011. - № 10. - С. 9-16
5. Ганжа Н. Г., Хищенко А. В. Тепловое аккумулярование как способ повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения // Энергосбережение • Энергетика • Энергоаудит. - 2012. - № 03. - С. 16-21.
6. Даффи Дж. А., Бекман У А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. -М.: Мир, 1977. - 420 с.
7. Бекман УА., Клейн С., Даффи Дж. А. Расчет систем солнечного теплоснабжения. - М.: Энергоиздат, 1982. - 79 с.
8. Бекман Г., Гилли П. Тепловое аккумулярование энергии: Перевод с англ. В. Я. Сидорова, Е. В. Сидорова. Под ред. В. М. Бродянского. - М.: Мир, 1987. - 272 с.
9. Ахтырский А.А. Научно-технический прогресс в теплоэнергетике жилищно-коммунального хозяйства. - М.: Стройиздат, 1986 г. - 248 с.
10. Васильева И.М., Порублев А.И., Чадин И.М., Кетаов А.Г., Гелиотеплоснабжение населенных мест // Обзорная информация ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре. - М., 1984 г., № 4. - 35с.
11. Документация по проектированию: гелиотехника Logasol для горячего водоснабжения и поддержки отопления. Издание 03/2013. [www.buderus.ru](http://www.buderus.ru).

12. Книга о «Солнце». Руководство по проектированию систем солнечного теплоснабжения. Издание 06/2010. [www.viessmann.ua](http://www.viessmann.ua).
13. Байбутаев К.Б. Сравнительные испытания различных систем солнечных водонагревателей. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1955 г. — 16с.
14. Захидов Р.А., Рашидов Ю.К., Таджиев У.А. Практика проектирования и эксплуатации систем солнечного теплоснабжения в Узбекистане // Гелиотехника. 1994, № 5, с. 43...50.
15. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. -М.: Энергоатомиздат, 1991. - 208 с.:ил.
16. Андерсон Б. Солнечная энергия (Основы строительного проектирования). -М.: Стройиздат, 1982.-375 с.
17. Мак-Вейг Д. Применение солнечной энергии / Перевод с англ. под ред. Б.В. Тарнижевского. - М.: Энергоиздат, 1981.-216 с.
18. Зоколей С. Солнечная энергия и строительство. Стройиздат, 1979.-209с.
19. Boettcher A., Heybutzki H., Krug W., Selfregulating solar water heaters with very short start-up phase. -Sol World Congr. Proc. 8th Bien. Congr. Int.Sol. Energy Soc., Perth, 14-19 Aug., 1982. Vol.2. Oxford e.a., 1984, 1170-1173.
20. Заявка № 3149607 (ФРГ). Selbstregulierende Solar-Anlage /Boettcher A.- Заявление 15.12.81, N P 3149607.5, опубликованное 21.07.83.
21. Buckley S. Thermic diods solar panels.-Sunworld, 1977, № 5, s.7...9.
22. Lochrike R.I., Holzer I. C., Gazi H.N., Sharp M.K. Stratification enhancement in liquid thermal storage tanks.-Journal of Energy, 1979, 3, № 3, p.129...130.
23. Self-regulating solar system.-World Constr, 1980, 33, № 6, pp 95...99.
24. Bickle Larry W. Passive Freeze protection for solar collectors. -Solarenergy, 1975, v.17, № 6, p.373...374.
25. Padillo R. Solar collection systems -the rationale.- American Society of Heating and Refrigerating Journal, 1977, vol. 19, № 6, p.43...46.
26. Duncan R.T. Doering Jr.E.R. Solar heating for Atlanta School. -ASHRAE Journal, 1975, vol. 17, № 7, p. 35...39 .
27. Sheridan N. R., Bullock K.M., Duffie J.A. Study of solar Processes by

- Analog Computer. - Solar Energy, 1967, 11, 69.
28. Кисторян Х.А. Аккумуляция тепла в солнечных отопительных устройствах. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М., 1959 г. - 13с.
29. Жамалов А. Исследование теплотехнических и энергетических характеристик солнечных водонагревателей с плоскорифленным приемником. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Ташкент, 1971 г. - 22с.
30. Аvezов Р.Р. Исследование по комбинированному использованию гелиоустановок для отопления и охлаждения помещений. Автореф. дис.... канд. техн. наук. - Ташкент, 1971 г. - 27с.
31. Соатов Ф. Исследование и разработка приемников солнечных водонагревательных установок. Автореф. дис....канд. техн. наук. - Ашхабад, 1978 г.-19с.
32. Рабинович М.Д. Разработка и исследование гелиосистем горячего водоснабжения гражданских зданий. Автореф. дис.... канд. техн. наук. - Ашхабад, 1980 г.- 19с.
33. Швалева О. Л. Исследование работы солнечных водонагревателей совместно с полупроводниковыми тепловыми насосами для теплоснабжения. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Ашхабад, 1980 г.- 23с.
34. Назарова Г.Р. Комбинированная солнечная установка для теплоснабжения на основе плоских коллекторов. Автореф. дис.... канд. техн. наук. -Ашхабад, 1987 г.-21с.
35. Захидов М.М. Исследование влияния элементов системы солнечного теплоснабжения на объёмно-планировочные решения сельских малоэтажных жилых здания. Автореф. дис. ... канд. арх. - М., 1982 г.- 24с.
36. Хатамов СО. Исследование системы солнечного воздушного обогрева. Автореф. дис.... канд. техн. наук. - Ашхабад, 1982 г. - 26с.
37. Рашидов Ю.К. Саморегулирующиеся устройства для систем солнечного теплоснабжения. Автореф. дис.... канд. техн. наук. - М., 1986 г. - 20с.

38. Назарова Г.Р. Комбинированная солнечная установка для теплоснабжения на основе плоских коллекторов. Автореф. дис.... канд. техн. наук. - Ашхабад, 1987 г. - 21 с.
39. Каландаров Б. Теплотехнические характеристики солнечных коллекторов и систем типа коллектор-рефлектор. Автореф. дис.... канд. техн. наук. - Ашхабад, 1987 г. - 21 с.
40. Беглиев Х.А. Разработка, создание и исследование систем горячего водоснабжения для стационарных потребителей. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Ашхабад, 1988 г. — 22 с.
41. Малевский Ю.Н., Тарнижевский Б.В., Фугенфиров М.И. Солнечная энергия за рубежом: прогнозы, состояние разработок, технико-экономические возможности // Гелиотехника, 1979 г. № 4 - С.72-75.
42. Фугенфиров М.И. Солнечная энергия за рубежом // Теплоэнергетика, 1980 г., №3 С.72-74.
43. Байрамов Р.Б., Ушакова А.Д. Солнечные водонагревательные установки. - Ашхабад: Ылым. 1987 г. - 168 с.
44. Смирнов С.И., Водовозов В.А. Использование солнечной энергии для теплоснабжения за рубежом // Жилищное строительство, 1980 г., № 10. С.21-22.
45. Кенисарин М.М., Карабаев М.К. Централизованные системы солнечного теплоснабжения с сезонным аккумулярованием тепла. Ташкент: Обзорная информация УзНИИНТИ. 1987 г. - 36 с.
46. Умаров Г.Я., Раббимов Р.Т., Авезов Р.Р., Усманов М.У. Использование низкопотенциальных солнечных установок. - Ташкент, Фан, 1976 г. - 100 с.
47. Константиновский Ю.А., Заваров А.И., Рабинович М.Д., Ферт А.Р. Использование солнечной энергии для теплоснабжения. - Киев: Будвельник, 1985 г. - 104 с.
48. Манюк В.И., Каплинский Я.И., Хиж Э.Б., Манюк А.И., Ильин В.К. Справочник по наладке и эксплуатации водяных тепловых сетей. - М.: Стройиздат, 1977 г., - 272 с.

49. Аверьянов В.К., Тютюнников А.И. Выбор оптимальной поверхности промежуточного теплообменника двухконтурной гелиосистемы. // Гелиотехника, 1984 г., №3. С.58-61.
50. Петраш В.Д., Полуниин М.М. Оптимальные расчетные параметры теплообменников двухконтурных гелиосистем горячего водоснабжения // Гелиотехника, 1985 г., №2. С.37-41.
51. Weiersmiiller R/ Durahfluss and Warneastauscherbemessung bei Sonnenenergieanlagen// Heizmg, Lufting, Haustechnik, Klimatchnin. 1985/ Bd.36. №5. S.234-237.
52. Харченко Н.В., Никифоров В.А. Оптимизация гелио-топливной системы теплоснабжения //Промышленная теплотехника, 1981 г, №4. С. 103-108.
53. Козлов В.Б., Рудян Ю.Б. Оптимизированная модель системы солнечный водонагреватель - аккумулятор - потребитель с переменным расходом теплоносителя // Гелиотехника, 1978 г., №5. С.52-57.
54. Аvezов Р.Р., Орлов А.Ю. Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения. Ташкент, Фан, 1988 г. - 286 с.
55. Аvezов Р.Р. Повышение эффективности использования низкопотенциальных солнечных нагревателей в системах теплоснабжения. Автореф. дис. ... док. техн. наук. - Ташкент, 1990 г.
56. Рашидов А.Ю., Аvezов Р.Р. Оптимизация двухконтурных систем солнечного теплоснабжения. Сборник научных работ по итогам VI традиционной конференция магистрантов. ТАСИ, Ташкент - 2006 г., 101-103 с.
57. Васильева И.М., Рабинович М.Д. Солнечно-топливные и солнечно-электрические котельные. В кн. Системы солнечного тепло -и хладоснабжения. М.: Стройиздат. 1990. с.89-103.
58. Насонов Е.А., Крюкова Т.Н., Аvezов Р.Р., Рузимуродов Б. //Гелиотехника. 1988. №3. с. 69-75.
59. Аvezов Р.Р., Аvezова Н.Р. Схемно-технологические решения солнечно-топливных систем теплоснабжения.// Труды международной конфе-

- ренция "Возобновляемые источники энергии и гелиоматериаловедение", Ташкент, 29-30 сентября 2005, с.4..6.
60. Аvezов Р.Р., Анарбаев А.И., Захидов Р.А. Оптимизация солнечных коллекторов на ограниченной площади.// Гелиотехника, 2005, №1, с.35...39.
61. Анарбаев А.И., Захидов Р.А., Короли М.А. Оптимизация пространственного положения солнечных коллекторов.// Труды второй международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», посвящённой 90-летию акад.С.А.Азимова. Ташкент. 18-19 ноября 2004. с.113...116.
62. Аvezов Р.Р., Анарбаев А.И., Захидов Р.А. Моделирование двухконтурных систем солнечного теплоснабжения// Гелиотехника, 2004, № 2, с.35...40.
63. Аvezов Р.Р., Аvezова Н.Р. Методика расчёта площади поверхности двухконтурных гелиоприставок солнечно-топливных котельных.// Материалы международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», посвящённой 15-летию независимости Узбекистана. Ташкент. 26-27 октября 2006. с.48...50.
64. Короли М.А., Валиев А.А. Оценка эффективности использования солнечных приставок к топливным котельным.// Труды международной конференции "Возобновляемые источники энергии и гелиоматериаловедение", Ташкент, 29-30 сентября 2005, с.76...79.
65. Сарнацкий Э.В., Константинов Ю.А., Заварова А.И. и др. Использование солнечной энергии для теплоснабжения зданий. Киев: Будівельник, 1985, 104 с.
66. Бутузов В.А., Мацко А.Н. Разработка и эксплуатация солнечно-топливных котельных// Промышленная энергетика. 1991 №1, с.4...7.
67. Вагапов И.Х. Расчёт коэффициента замещения тепловой нагрузки гелиотехнической части солнечно-топливных систем горячего водоснабжения.// Гелиотехника, 2006, № 3, с.79...82.
68. Рашидов Ю.К. Саморегулирующиеся активные элементы для водя-

- ных систем солнечного теплоснабжения // Архитектура. Строительство. Дизайн.- Ташкент, 2013, № 4, с.50-55.
69. Рашидов Ю.К. Расчет водораспределителя стратификационного аккумулятора тепла системы солнечного теплоснабжения // Гелиотехника.- Ташкент, 1983. - №2, С.62-67.
70. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. – М.: Наука, 1981 – 719 с.
71. Рашидов Ю.К., Пирназаров И. Саморегулирующиеся аккумуляторы теплоты для систем солнечного теплоснабжения Архитектура ва курилиш муаммолари. Магистрантларнинг XIII-анъанавий анжумани илмий мақолалар тўплами, ТАҚИ, Тошкент, 2014, 150-152 бет.
72. Авезова Н.Р., Авезов Р.Р., Рашидов Ю.К., Самиев К.А. Моделирование нестационарного теплового режима помещений с инсоляционной пассивной системой отопления с трехслойным светопрозрачным ограждением Международный научный журнал «Гелиотехника», 2014, №3, с.61- 65.
73. Avezova N.R., Avezov R.R., Rashidov Yu.K., Samiev K.A. Model-Based Analysis of Nonstationary Thermal Mode in Premises with an Insolation Passive Heating System with a Three-Layer Translucent Shield Applied solar energy (Geliotekhnika), Vol.50, No.3, pp.184 -187, 2014.
74. Рашидов Ю.К. Система солнечного горячего водоснабжения с активным элементом. Фундаментальные и прикладные вопросы физики. Сборник тезисов докладов республиканской конференции, посвященной 100-летию академика С.А. Азимова. Ташкент, 2014, с.212-213.
75. Рашидов Ю.К., Султанова Ш.Ю. Расчет активного элемента стратификационного аккумулятора теплоты термосифонной солнечной водонагревательной установки Архитектура, строительство.Дизайн. ТАСИ, 2015, №2, с. с.55-58.
76. Рашидов Ю.К., Султанова Ш.Ю., Закиров Б.А., Абдуллаев Б.А., Иноятов Д.Т. Метод расчёта перфорированного водораспределителя

стратификационного аккумулятора теплоты солнечной водонагревательной установки Материалы республиканской научно-практической конференции «Повышение энергоэффективности зданий и актуальные проблемы строительной физики», СамГАСИ, Самарканд, 2015, с.226-229.

77. Рашидов Ю.К., Султанова Ш.Ю., Абдуллаев Б.А., Иноятов Д.Т. К вопросу оценки эффективности температурного расслоения воды в стратификационных аккумуляторах теплоты систем солнечного теплоснабжения Материалы республиканской научно-практической конференции «Повышение энергоэффективности зданий и актуальные проблемы строительной физики», СамГАСИ, Самарканд, 2015, с.229-232.

78. Рашидов Ю.К., Пирназаров И.И. Расчет водораспределителя саморегулирующиеся аккумулятора теплоты термосифонной солнечной водонагревательной установки Архитектура ва қурилиш муаммолари. Магистрантларнинг XV-анъанавий анжумани илмий мақолалар тўплами, ТАҚИ, Тошкент, 2015, 123-125 бет.