

**ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС» в г. Алмалык
(Филиал НИТУ «МИСиС» в г. Алмалык)
КАФЕДРА «Математики и Естественно научных дисциплин»**



**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
ПО ПРЕДМЕТУ**

«ГИДРАВЛИКА»

(для студентов направления образования: специалитет
210504 - «21.05.04 Горное дело, 21.05.04-СГД-16-9.PLX Горные машины и
оборудование»

Алмалык-2022 г.

Составил:

Сидиков Мансур Насирович, доцент кафедры «МиЕНД» АФ НИТУ МИСиС
Учебно-методический комплекс по «Гидравлика»

Разработана в соответствии с ОС ВО:

Самостоятельно устанавливаемый образовательный стандарт высшего образования Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по специальности 21.05.04 ГОРНОЕ ДЕЛО (приказ от 02.12.2020 г. № 602 о.в.)

Составлен на основании учебного плана

21.05.04 ГОРНОЕ ДЕЛО, 21.05.04-СГД-16-9.PLX Горные машины и оборудование, утвержденного Ученым советом ФГАОУ ВО НИТУ "МИСиС" 21.05.2020,

Учебно-методический комплекс одобрен на заседании кафедры
Кафедра горного оборудования, транспорта и машиностроения

Протокол от 09.06.2022 г., № 10

Зав. кафедрой Каххаров Сергей Каримович

Содержание

Сборник лекции.....	4
Методические указание по выполнению лабораторных работ	122
Глоссарий	160
Рабочая учебная программа	167
Критерий оценки.....	178
Темы рефератов.....	179
Вопросы для контроля	180
Тестовые вопросы по дисциплине	184
Литература.....	189

**ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС» в г. Алмалык**

СБОРНИК ЛЕКЦИИ

по предмету

«Гидравлика»

Лекция 1

Область изучения и история предмета „Гидравлика ” Технологический обучения на лекция № 1.

Время - 2 час	Количества студентов: 20-30 чел
Форма учебного занятия	Введение, визуальная лекция
План учебного занятия	<ol style="list-style-type: none">1. Область изучения и история предмета „Гидравлика”2. Основные понятия и определения.3. Роль и применение гидравлики в современном , машиностроении и сельском хозяйстве.4. Физические свойства жидкостей.5. Гидростатическое давление и его свойства.6. Закон Ньютона для трения в жидкостях. Вязкость.7. Идеальные и реальные газы8. Давление насыщенного пара жидкости9. Понятие о кавитации.10. Модели идеальных и реальных газов
Цель учебного занятия: Ознакомить студентов с содержанием предмета: “Гидравлика”; с основными понятиями и определениями, с физическими свойствами жидкостей	
Задачи преподавателя: - <ul style="list-style-type: none">• ознакомить с понятием и сущностью гидростатики;• рассказать о предмете, методах и задачах гидростатики;• кратко охарактеризовать основные понятия жидкости.	Результаты учебной деятельности: Студент должен узнать: <ul style="list-style-type: none">- Что изучает предмет “Гидравлика”;- Какова роль и применение гидравлики в современном машиностроении;- Свойства жидкости;- Гидростатическое давление и вязкость жидкости
Методы и техники обучения	Лекция – визуализация, техники: блиц-опрос, фокусирующие вопросы, «думай – работай в паре – делись», техника «Кластер».
Средства обучения	Лазерный проектор, визуальные материалы, информационное обеспечение.
Формы обучения	Коллективная, фронтальная работа, работа в парах.
Условия обучения	Аудитория, приспособленная для работы с ТСО.

Технологическая карта лекции (1-е занятие)

	Деятельность	
	Преподавателя	студентов
1 этап. Введение (10 мин.)	1.1. Сообщает, тему, цель, планируемые результаты учебного занятия и план его проведения.	1.1. Слушают, записывают.
2 этап. Основной (60 мин.)	2.1. С целью актуализировать знания студентов задает фокусирующие вопросы: – Что такое жидкость? – В каких видах бывает жидкость? – Где используются жидкости? Для ответа на вопросы организует работу в парах. Проводит блиц-опрос. 2.3. Последовательно излагает материал лекции по вопросам плана, использует визуальные материалы Акцентирует внимание на ключевых моментах темы, предлагает их записать.	2.1. Слушают. По очереди отвечают на вопросы. Слушают правильный ответ. 2.3. Обсуждают содержание схем и таблиц, визуальные материалы, уточняют, задают вопросы. Записывают главное.
3- этап. Заключительная (10 мин.)	3.1. Проводит блиц-опрос. Делает итоговое заключение. Дает задание для самостоятельной работы. 3.2 Сотавить кластер на слово «Жидкость». Ставить оценки.	3.1. Отвечают на вопрос. 3.2. Слушают, записывают

1.1 Область изучения и история предмета «Гидравлика»

Гидравликой называется прикладная техническая наука, занимающаяся изучением законов равновесия и движения капельных жидкостей и рассматривающая приложение этих законов к решению конкретных технических задач. Изучением законов равновесия и движения жидкостей занимается и другая наука - гидромеханика, в которой применяются лишь строго математические методы, позволяющие получать общие теоретические решения различных задач, связанных с равновесием и движением жидкостей. Долгое время гидромеханика рассматривала преимущественно невязкую (идеальную) жидкость, т.е. некоторую условную жидкость с абсолютной подвижностью частиц, считающуюся абсолютно несжимаемой, не обладающей вязкостью - не сопротивляющейся касательным напряжениям. В последнее время гидромеханика стала разрешать также проблемы движения реальных жидкостей, а потому роль эксперимента в гидромеханике значительно возросла. Таким образом, изучением законов равновесия и движения жидкостей занимаются две науки: гидравлика (техническая механика жидкостей) и гидромеханика.

Краткая история курса. Вода всегда играла большую роль в жизни человека. Ещё при первобытнообщинном строе человек использовал реки и озёра как пути сообщения, а в древнем мире воду использовали для самых различных целей. Много тысяч лет назад в Средней Азии, Китае, Египте, Ассирии, Вавилоне, Риме и Греции были построены довольно крупные гидротехнические сооружения. Тогда же были созданы первые корабли.

С развитием производительных сил воду стали широко использовать для искусственного орошения полей, водоснабжения, в качестве источника энергии и для многих других целей. Это привело к строительству каналов, водопроводов, водяных двигателей. Наибольший опыт в вопросах гидравлики был накоплен в период строительства водопроводов.

Из наиболее значительных сочинений древнего мира, посвященным вопросам гидравлики, до наших дней дошло лишь одно - трактат Архимеда «*О плавающих телах*», написанный примерно за 250 лет до н.э. Известный закон Архимеда, определяющий силы давления жидкости на поверхность погружённого в неё тела, дошёл в полной неприкосновенности до наших дней. В XIV веке знаменитый учёный Леонардо да Винчи (1452-1519) написал исследование «*О движении и измерении воды*», которое, правда, было опубликовано только в XX столетии.

Последующие главнейшие работы в области гидравлики принадлежат Галилею (1564-1642), Торичелли (1608-1647), Паскалю (1623-1662) и Исааку Ньютону (1642-1726). Торичелли сформулировал закон истечения жидкости из отверстий. Паскалю принадлежит закон о передаче давления внутри жидкости (закон Паскаля), а Ньютон высказал гипотезу о внутреннем трении в жидкости и установил закон динамического подобия движущихся потоков, широко применяющийся в настоящее время в теории моделирования при гидравлических лабораторных исследованиях.

М.В. Ломоносов в классическом труде «*Рассуждения о твёрдости и жидкости тела*», открыв закон сохранения вещества и движения, создал теоретическую базу для дальнейшего развития гидродинамики, т.е. раздела гидравлики, рассматривающего законы движения жидкостей.

В выдающемся труде «*Гидродинамика*», опубликованном в 1738г. академик Бернулли получил широко известное уравнение, устанавливающее связь между давлением, скоростью движения и глубиной. Оно является основным уравнением гидродинамики.

Академик Эйлер в сочинении «*Общие принципы движения жидкости*» (1755) вывел дифференциальные уравнения равновесия и движения жидкостей, дав более общее решение данной задачи. Из дифференциальных уравнений Эйлера легко может быть получено уравнение Бернулли.

Французский учёный Шези известен работами в области равномерного движения жидкости. Его формула для средней скорости движения жидкости в настоящее время является основной при расчёте каналов, естественных русел и труб. Работы Вентури посвящены главным образом исследованиям истечения жидкости через отверстия и насадки (насадки Вентури, водомер Вентури), а работы Вейсбаха - преимущественно изучению местных и путевых потерь напора в трубах. Результаты широких исследований Базена, изучавшего

истечение жидкости через водосливы, а также равномерное движение жидкости используются и в настоящее время (формула Базена для водосливов с тонкой стенкой).

Следует особенно отметить работы английского физика Осборна Рейнольдса, который впервые (в 1883г.) на основании подавленных им наглядных экспериментов показал существование двух режимов движения реальных жидкостей - ламинарного и турбулентного.

Профессор Петров опубликовал в 1882г. исследование «*Гидродинамическая теория трения при наличии смазывающей жидкости*», принёсшее ему мировую известность.

Жуковский ещё в конце XIX века решил вопрос о гидравлическом ударе в трубах (в 1898г.), положив тем самым начало исследованию одной из важнейших проблем гидравлики. В 1906г. Жуковский совместно с Чаплыгиным опубликовал работу «*О трении смазочного слоя между шипом и подшипником*». В ней было дано точное математическое решение задачи Петрова. В том же году Жуковский разработал теорию подъёмной силы крыла. На основании этой теории стало возможным производить расчёты крыльев самолётов, а также лопастей рабочих колёс гидравлических турбин, центробежных и пропеллерных насосов. Таким образом, была решена важнейшая проблема аэродинамики и гидродинамики.

1.2. Основные понятия и определения.

Жидкими телами, или *жидкостями* называют физические тела, легко изменяющие свою форму под действием самых незначительных сил. В отличие от твёрдых тел жидкости характеризуются весьма большой подвижностью своих частиц и поэтому обладают свойством текучести и способностью принимать форму сосуда, в который они налиты

Различают жидкости *капельные* и *газообразные*. **Капельные** - это жидкости, встречающиеся в природе и применяемые в технике: вода, нефть, бензин и т.д. Все капельные жидкости оказывают большое сопротивление изменению объёма и трудно поддаются сжатию. При изменении давления и температуры их объём изменяется весьма незначительно. **Газообразные** - жидкости (газы) изменяют свой объём под влиянием указанных факторов в значительной степени. В гидравлике обычно изучают капельные жидкости.

Капельные жидкости практически не оказывают заметного сопротивления растягивающим усилиям. Силы сцепления, существующие между молекулами этих жидкостей, проявляются только на их поверхности в виде так называемых сил поверхностного натяжения, где и обнаруживается известная сопротивляемость жидкости разрыву. Этим объясняется, например, существование тонкой плёнки мыльного пузыря, образованием капли, удерживаемой от падения и т.д. Силы сопротивления разрыву у жидкости ничтожно малы. Так, для разрыва воды достаточна сила, примерно в десять миллионов раз меньшая силы, необходимой для разрыва стали (железа). Поэтому при решении обычных задач гидравлики считают, что растягивающие усилия в жидкости отсутствуют.

Наряду с этим следует особо подчеркнуть, что капельные жидкости оказывают существенное сопротивление сдвигающим силам, которое проявляется при движении жидкости в виде сил при движении жидкости-одна из основных задач гидравлики.

В гидравлике жидкость рассматривается как совокупность материальных точек (частиц) в ограниченном объёме. Размеры этих частиц принимаются бесконечно малыми, однако они никак не сопоставимы с размерами молекул во много раз меньших, из которых в действительности состоит жидкость. Физически подобные частицы представляют собой как бы некоторую достаточно большую их совокупность. При этом предполагается, что жидкость заполняет рассматриваемый объём сплошь, без каких бы то ни было пустот и, таким образом, представляет собой сплошную среду - континуум.

Различают твёрдые поверхности, ограничивающие объём жидкости (например, стенки и дно сосудов, заключающих жидкость), и свободные поверхности, по которым жидкость граничит с другими жидкостями или газами (например, поверхность соприкосновения жидкости с воздухом в открытом сосуде).

Силы, действующие на ограниченный объём жидкости, в гидравлике принято делить на внутренние и внешние. Внутренние — это силы взаимодействия между отдельными частицами рассматриваемого объёма жидкости. Внешние силы делятся на поверхностные, приложенные к

поверхностям, ограничивающим объём жидкости (например, силы, действующие на свободную поверхность, силы реакции стенок и дна сосудов), и на массовые, или объёмные, непрерывно распределенные по всему объёму жидкости (например, силы тяжести, силы инерции).

В гидравлике как массовые, так и поверхностные силы обычно рассматривают в виде единичных сил: массовые силы относят к единице массы, а поверхностные - к единице площади. Единичная массовая сила численно равна соответствующему ускорению. Единичная поверхностная сила представляет собой напряжение этой силы и в общем случае раскладывается на составляющие: нормальное напряжение (его называют гидромеханическим давлением) и напряжение касательное.

Для облегчения и упрощения ряда теоретических выводов и исследований в гидравлике иногда используют понятие идеальной, или совершенной, жидкости, обладающей абсолютной не сжимаемостью, полным отсутствием температурного расширения и не оказывающей сопротивления растягивающим и сдвигающим усилиям. Конечно, идеальная жидкость - жидкость фиктивная, и не существующая в действительности. Все реальные жидкости в той или иной степени характеризуются всеми перечисленными выше свойствами. Однако, как отмечено выше, сжимаемость, температурное расширение и сопротивление растяжению у реальных жидкостей ничтожно малы и обычно не учитываются. Таким образом, основной и, по существу, единственной особенностью, отличающей реальную жидкость от идеальной, является наличие у первой сил сопротивления сдвигу, определяемых особым свойством жидкости - вязкостью. Ввиду этого реальную жидкость иногда называют вязкой, а идеальную - невязкой.

Следует иметь, что помимо общепринятого в гидравлике понятия идеальной жидкости в гидромеханике используют также понятие идеальной сжимаемой жидкости. Сжимаемость, однако, проявляется и становится ощутимой лишь при весьма больших скоростях движения жидкости, близких к скорости звука. Поэтому в гидравлике, имеющей дело со скоростями, значительно меньшими, фактор сжимаемости обычно не учитывают (исключение - гидравлический удар) и оперируют понятием идеальной несжимаемой жидкости, опуская слово «несжимаемая».

Необходимо отметить, что основные законы гидравлики широко применяются в теории лопастных насосов и гидравлических турбин. Так, например, уравнение Бернулли для относительного движения жидкости используется при анализе характера движения потоков в области рабочих колёс указанных гидравлических машин. Оно служит также для исследования явления кавитации в лопастных насосах и гидравлических турбинах, позволяя устанавливать высоту всасывания или предельное число оборотов рабочих колёс. Реактивное взаимодействие струи и сосуда объясняет гидравлическую схему работу лопастных машин.

Теория гидродинамического подобия в применении к лопастным гидравлическим машинам необходима для решения многих сложных вопросов, связанных с созданием новых машин и усовершенствованием существующих конструкций.

Теория гидравлического удара широко используется при проектировании трубопровода и предохранительных устройств, служащих для борьбы с гидравлическим ударом, а также при проектировании гидравлических таранов, служащих для борьбы с гидравлическим ударом, а также при проектировании гидравлических таранов.

Гидравлические прессы, гидравлические аккумуляторы, гидравлические подъёмники и аналогичные им устройства рассчитываются на основании закона о передаче давления внутри жидкости. На этом же законе основана теория гидропривода, действующего на объёмном принципе и служащего для регулирования работы современных станков. Расчёт устойчивости понтонов, поплавков гидросамолётов и других плавучих средств, а также поплавковых приспособлений в карбюраторах производится в соответствии с теорией плавания тел. Сила давления бензина, действующая на стенки бензобака самолёта при его движении, сила давления жидкости на стенки цистерн при движении поезда и т.д. определяются из уравнений относительного покоя жидкости.

1.3. Физические свойства жидкостей.

Определение жидкости. Жидкость - это физическое тело, которое легко меняет свою форму под действием любых по величине сил. Жидкость отличается от твёрдого тела тем, что обладает большой подвижностью частиц (текучестью) и принимает форму сосуда, в котором она находится.

Различают два вида жидкостей: капельные и газообразные.

К капельным жидкостям относятся, например, вода, нефть, масло, ртуть и т.п. Капельная жидкость характеризуется весьма малой сжимаемостью и малым сопротивлением растягивающим усилиям.

К газообразным жидкостям относятся все газ при обычных условиях, которые характеризуются большой сжимаемостью и отсутствием сопротивления, растягивающим усилиям.

В гидравлике принято объединять жидкости, газы и пары под единым наименованием - жидкости. Это объясняется тем, что законы движения жидкостей и газов (паров) практически одинаковы, если их скорости значительно ниже скорости звука. Поэтому в дальнейшем жидкостями будут называться все вещества, обладающие текучестью при приложении к ним самых незначительных сил сдвига.

Общие законы равновесия и движения жидкостей выражаются обычно в виде дифференциальных уравнений, получаемых на основе рассмотрения жидкости как сплошной однородной среды. При этом пренебрегают тем, что элементарный объём, или частица жидкости является совокупностью молекул, расположенных на некоторых расстояниях одна от другой. Такое допущение возможно, поскольку размеры частиц всегда значительно больше средней длины пути свободного пробега молекул.

При выводе основных закономерностей в гидравлике вводят понятие о гипотетической идеальной жидкости, которая, в отличие от реальной (вязкой) жидкости, абсолютно несжимаема под действием давления, не изменяет плотности при изменении температуры и не обладает вязкостью.

Реальные жидкости делятся на *капельные* и *упругие* (газы или пары).

Капельные жидкости практически несжимаемы и обладают очень малым коэффициентом объёмного расширения. Объём упругих жидкостей сильно изменяется при изменении температуры или давления.

Различают следующие основные свойства жидкостей:

Плотность. Масса единицы объёма жидкости, т.е. отношение массы m к её объёму V называется плотностью и обозначается через ρ ;

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

где: m - масса жидкости;

V - объём жидкости.

За единицу плотности принимается килограмм на кубический метр ($\text{кг}/\text{м}^3$), что соответствует плотности такого однородного вещества, на один кубический метр которого приходится масса в один килограмм.

В гидравлике широко используется также понятие об *относительной плотности*, представляющей собою отношение плотности рассматриваемой жидкости к плотности воды при $t = + 3.98^\circ\text{C}$ и атмосферном давлении. Относительная плотность обозначается через d .

Следовательно, относительная плотность воды d - это отношение плотности воды при заданной температуре к наибольшей плотности воды, соответствующей $t = + 3,98^\circ\text{C}$. Тогда зависимость относительной плотности воды от температуры при атмосферном давлении характеризуется данными, приведёнными в табл. 1.

Таблица 1.

t ⁰ C	d						
0	0,99987	10	0,99750	30	0,99576	70	0,97794
3	0,99999	15	0,99915	40	0,99235	80	0,97194
3,98	1,00000	20	0,99826	50	0,98820	90	0,96556
5	0,99999	25	0,99712	60	0,98338	100	0,95865

Удельный вес - это вес единицы объёма жидкости, который обозначается через γ , т.е.:

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

Где: G - вес; V - объём жидкости

В таблице 2 приведены удельные веса некоторых жидкостей.

Таблица 2.

Наименование жидкости	Удельный вес (кГ/м ³)	t ⁰ C	Наименование жидкости	Удельный Вес (кГ/м ³)	t ⁰ C
Чистая пресная вода	1000	4	Бензин	700-750	15
Обычная морская вода	1020- 1030	4	обыкновенный Соляровое масло	880 – 890	15
Нефть легкая	860 - 880		Смазочные масла	890 – 920	15
Нефть средняя	880-900	15	Мазут	890-940	15
Нефть тяжелая	920 930	15	Гудрон	930-950	15
Керосин	790-820	15	Алкоголь безводный	790 – 800	15
Бензин авиационный	650	15	Глицерин	1260	0
		15	Ртуть	13600	0

Сжимаемость характеризуется коэффициентом объёмного сжатия β_v , представляющим собой относительное изменение объёма при изменении давления на 1 Па:

$$\beta_v = \frac{(V_1 - V_2)}{(W_1(p_2 - p_1))}, \quad (1-3)$$

где: V — первоначальный объём; W_2 ~ конечный объём; P_1 и P_2 — начальное и конечное давление.

Поверхностное натяжение (капиллярность) - это свойство жидкости, которое обусловлено силами взаимного притяжения, возникающими между частицами поверхностного слоя и вызывающими напряженное его состояние. Под действием указанных сил поверхность жидкости оказывается как бы покрытой равномерно натянутой тонкой пленкой, которая стремится придать объёму жидкости форму с наименьшей поверхностью.

Силы поверхностного натяжения оказывают на жидкость дополнительное давление, нормальное к её поверхности. Это давление измеряется в ньютонах на квадратный метр (Н/м²) и может быть определено по формуле Лапласа:

$$p = \sigma \left[\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right] \quad (1-4)$$

где: p - коэффициент поверхностного натяжения;
 r_1 и r_2 - радиусы кривизны кривых, получаемых при пересечении поверхности жидкости любыми двумя взаимно перпендикулярными плоскостями, проведенными через нормаль к этой поверхности в какой-либо точке.

Средние значения для некоторых жидкостей на границе раздела с воздухом следующие:

Вода	0, 073	Нефть.....	0, 025
Спирт.....	0, 0225	Глицерин	0, 065
Бензол.....	0, 029	Ртуть.....	0, 490

Обычно с повышением температуры поверхностное натяжение жидкостей уменьшается.

Особенно сильно поверхностное натяжение проявляется в трубках весьма малого диаметра (капиллярных), где благодаря действию дополнительного давления, вызываемого этим натяжением, положение поверхности изменяется по сравнению с нормальным её уровнем (капиллярность).

Для капиллярных трубок формула (1-4) принимает вид:

$$p = \frac{2\sigma}{r} \quad (1-5)$$

где r – радиус трубки.

Возможны два случая изменения уровня: поднятие, если жидкость смачивает стенки (например, вода), и опускание, если жидкость не смачивает стенки (ртуть).

Для воды при $t = 20^{\circ}\text{C}$ высота капиллярного поднятия (в мм) в стеклянной трубке определяется формулой:

$$h = \frac{29,8}{d}$$

где: d — внутренний диаметр трубки.

Для ртути при тех же условиях опускание уровня (в мм):

$$h = \frac{10,15}{d}$$

Температурное расширение характеризуется коэффициентом температурного расширения жидкостей, выражающим относительное увеличение объёма при увеличении температуры на 1°C :

$$\beta_t = \frac{(V_1 - V_2)}{(V_1 \Delta t)},$$

где: Δt — изменение температуры.

Коэффициент температурного расширения для воды увеличивается с возрастанием давления, но для большинства других капельных жидкостей этот коэффициент с ростом давления уменьшается. В таблице 3. приведены данные о величинах коэффициента температурного расширения для воды.

Таблица.3.

Давление ам	При температуре $t,^{\circ}\text{C}$				
	4-10	10-20	40-50	60-70	90-100
1	0,000 014	0,000150	0,000 422	0,000556	0,000719
100	0,000 043	0,000165	0,000 422	0,000548	-
500	0.000 149	0,000236	0,000 429	0.000523	0,000523

Коэффициенты температурного расширения для капельных жидкостей значительно выше их коэффициентов объёмного сжатия, тем не менее, они также очень малы.

1.4. Закон Ньютона для трения в жидкостях. Вязкость.

Вязкость - это свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигающим касательным усилиям. Это свойство не может быть обнаружено при покое жидкости, т.к. оно проявляется лишь при её движении.

Чтобы выяснить физическую сущность понятия вязкость, рассмотрим следующую схему. Пусть имеются две параллельные пластинки А и В (рис. 1.1). В пространстве между ними заключена жидкость. Нижняя пластинка пусть будет неподвижна, верхняя движется поступательно с некоторой постоянной скоростью \mathcal{Q}_1 .

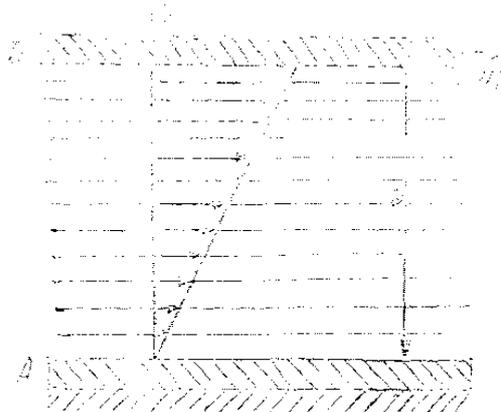


Рис.1.1

При этом, как показывает опыт, слои жидкости, прилегающие непосредственно к пластинкам (прилипшие), будут иметь одинаковые с ними скорости, т.е. слой, прилегающий к верхней пластинке В будет двигаться со скоростью \mathcal{Q}_1 , а прилегающий к нижней пластинке А, будет находиться в покое. Промежуточные слои будут скользить один по другому со скоростью, пропорциональной их расстоянию от нижней пластинки. Если расстояние между пластинками обозначить через n , то скорость \mathcal{Q}_y слоя жидкости, находящегося на расстоянии y от этой пластинки, будет равна

$$\mathcal{Q}_y = \mathcal{Q}_1 \frac{y}{n}.$$

Ещё Ньютон высказал предположение (впоследствии подтвержденное опытом), что силы сопротивления, возникающие при таком скольжении слоев, пропорциональны площади соприкосновения слоев и скорости скольжения. Тогда, приняв площадь соприкосновения равной единице, можно записать:

$$\tau = \mu (dv/dy) \quad (1-6)$$

где: τ - сила сопротивления, отнесенная к единице площади, или напряжение трения; μ - коэффициент пропорциональности, зависящий от рода жидкости, или динамическая вязкость жидкости.

Таким образом, вязкость есть физическое свойство жидкости, характеризующее её сопротивляемость скольжению или сдвигу.

1.5 Идеальные и реальные газы.

Закон Бойля-Мариотта, закон Гей-Люссака

Вставим поршень в трубку, противоположный конец которой запаян. Вдвигая поршень, уменьшим объём газа в трубке. При этом давление газа возрастает: если не удерживать поршень, газ поднимает поршень на прежнюю высоту и занимает первоначальный объём.

Выдвигая поршень из трубки, увеличиваем объём газа, при этом давление его уменьшается, так как под действием атмосферного давления поршень возвращается в прежнее положение, как только мы его отпустим.

Точные опыты позволили английскому учёному Роберту Бойлю (1627-1691) и французскому ученому Эдму Мариотту (1620-1684) установить следующую закономерность,

которую называют **законом Бойля-Мариотта**: при неизменной температуре давление постоянной массы газа обратно пропорционально объёму газа.

Газообразные жидкости по сравнению с капельными обладают значительно меньшей плотностью, которая подвержена большим изменениям в зависимости от давления и температуры.

Для совершенных (идеальных газов), подчиняющихся **законам Бойля-Мариотта и Гей-Люссака**, существует следующая зависимость между давлением p , плотностью ρ и температурой t :

$$\frac{p}{\rho} = R t \quad (1-7)$$

известная под названием уравнения состояния идеальных газов, где R — удельная газовая постоянная, она равна работе расширения 1кг газа при его нагревании на 1К при постоянном давлении. Измеряется газовая постоянная в джоулях на килограмм и кельвин [Дж/(кг К)].

Плотность (при $t = 0^\circ\text{C}$, $p = 101325 \text{ Па}$) и газовая постоянная приведены в табл. 4.

Таблица 4.

Газ	$\rho, \text{кг/м}^3$	R Дж/(кг К)	Газ	$\rho, \text{кг/м}^3$	R Дж/(кг К)
Воздух	1,293	287,0	Аргон	1,783	208,2
Кислород	1,429	259,8	Гелий	0,179	2078,0
Азот	1,251	296,8	Метан	0,717	518,8
Водород	0,090	4124,0	Этилен	1,251	296,6
Углекислота	1,977	188,0	Аммиак	0,771	488,3

Реальные газы не подчиняются уравнению состояния (1-7). Отклонения их свойств от этого уравнения возрастают с повышением давления и понижением температуры и при больших давлениях учитываются введением поправочных коэффициентов сжимаемости, устанавливаемых опытным путём.

Давлением насыщенных паров жидкости, или упругостью паров, называют давление, при котором пары жидкости находятся в равновесии с жидкостью и число молекул, переходящих из жидкости в пар, равно числу молекул, совершающих обратный переход.

Давление насыщенных паров различных жидкостей в значительной степени зависит от температуры и, как правило, увеличивается с её повышением (табл. 5).

Таблица 5.

Давление насыщенных паров (Па)

Жидкость	Температура жидкости $t, ^\circ\text{C}$											
	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Вода	613	872	1225	2332	4214	7350	1234	1989	3116	4733	7007	
Лёгкая нефть	3430	-		7840		1372	8	4	4	4	0	-
Бензин	646	-	7938	1068	1656			0		0		
Глинистый раствор	8		1764	1	2	2253	3194				-	-
				3136	5390	8	8	-	-	-	-	
						8320	1372	-	-	-		

Давление насыщенных паров можно определить так же как давление, соответствующее точке кипения жидкости при данной температуре. Поэтому, например если жидкость находится в каком-либо сосуде (резервуар, трубопровод), абсолютное давление $p_{\text{абс}}$, которое равно

давлению насыщенных паров $p_{н.п}$ ($p_{абс} = p_{н.п}$), жидкость будет кипеть, а сосуд заполняться её парами.

1.6. Понятие о кавитации.

Кавитацией (от латинского слова «кавитас» - полость) называется образование в движущейся жидкости полостей, заполненных паром или воздухом (газом). Кавитация возникает в тех случаях, когда давление в каких-либо местах потока снижается настолько, что становится меньше давления насыщения, т.е. давления, соответствующего испарению жидкости при данной температуре.

Явление кавитации может наблюдаться, например, в сифонных трубопроводах, где её появление обуславливается геометрической конфигурацией и принципом действия самого трубопровода, основной своей частью находящегося под давлением, меньшим, чем атмосферное; кавитация может иметь место также и при работе быстроходных гидравлических турбин, центробежных насосов и гребных винтов. В этих случаях причиной кавитации является возникновение больших местных скоростей, ведущих к понижению давления. Если при этом величина давления оказывается меньше упругости паров, в соответствующих местах потока начинается бурное испарение жидкости, жидкость начинает кипеть и в ней образуются кавитационные полости, состоящие из пузырьков, заполненных паром. Если затем при дальнейшем движении потока давление в нем повышается, - происходит конденсация пара, обычно сопровождаемая резким треском, и кавитационные полости смыкаются. Возникновение кавитации значительно облегчается при наличии в жидкости пузырьков воздуха, а также растворенных газов.

При этом вследствие мгновенных, быстро чередующихся процессов сжатия отдельных пузырьков здесь возникают очень большие местные импульсивные давления (в несколько сотен и даже тысяч атмосфер), приводящие к весьма коротким и интенсивным ударам, разрушающим металл, сначала выкрашивая его зерна с поверхности, а затем быстро распространяясь и вглубь. К этим чисто механическим, ударным действием присоединяются часто химические действия на металл выделяющегося из жидкости воздуха, обогащенного кислородом, а в отдельных случаях также и электролитические действия. В результате всех этих явлений, особенно если кавитация длится продолжительное время, происходит разъедание металла, из него выпадают отдельные кусочки, и он принимает на большую глубину губчатую структуру.

С целью предотвратить появление кавитации лопасти и лопатки проектируют в форме слабо изогнутых профилей со скругленными входными и выходными кромками и применяют для их изготовления особые, стойкие против коррозии, материалы (например, стали с добавкой хрома и никеля) с тщательно, по возможности, обработанными поверхностями.

1.7. Гидростатическое давление.

Силы, действующие на жидкость Когда жидкость находится в состоянии покоя, в ней проявляются силы вязкости. Следовательно, реальные жидкости, находящиеся в покое, будут характеризоваться свойствами, очень близкими к свойствам идеальной жидкости. Поэтому все задачи гидростатики, рассматриваемые с использованием понятия об идеальной жидкости, решаются с большой точностью.

Покоящаяся жидкость подвержена действию двух категорий внешних сил: массовых и поверхностных. **Массовыми** являются силы, пропорциональные массе жидкости - силы тяжести, а также силы инерции, последние действуют, например, в том случае, когда жидкость находится в относительном покое, будучи помещена, например, в движущуюся цистерну и т.д. **Поверхностные силы** - это силы, действующие на поверхности исследуемых объёмов жидкости, например, силы давления поршня на поверхность жидкости. В результате действия внешних сил внутри жидкости возникают напряжения, измеряемые в килограммах на квадратный метр ($\text{кг}/\text{м}^2$) и т.д.

Сжимающее напряжение, возникающее внутри покоящейся жидкости, называется **гидростатическим давлением или напряжением гидростатического давления**.

Установим основные положения, связанные с понятием гидростатического давления. Рассмотрим некоторый объём жидкого тела, находящегося в равновесии (рис. 1.3). Разделим плоскостью АВ данный объём жидкости на две части. Жидкость, заключенная в части 1 исследуемого объёма, будет воздействовать на часть 2 по плоскости раздела АВ. Обозначим

площадь плоскости раздела через ω (рис. 1.3), мысленно отбросив правую часть 1. Тогда для сохранения равновесия оставшейся левой части заменим воздействие на неё отброшенной правой части силой P , называемой силой гидростатического давления, действующего на площадь ω .

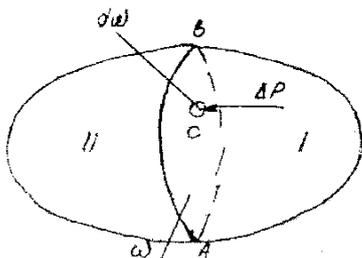


Рис.1.2.

Разделив силу гидростатического давления P на величину площади ω , получим среднее гидростатическое давление:

$$p_{cp} = \frac{P}{\omega} \quad (1-8)$$

Возьмем на плоскости АВ произвольную точку С и выделим около нее малую площадку $d\omega$ (рис. 1.2). На эту площадку будет приходиться некоторая сила ΔP . Если мы будем уменьшать площадку $d\omega$ таким образом, чтобы она стремилась к нулю, то получим предел отношения силы к площадке, называемый гидростатическим давлением в данной точке С:

$$p = \lim_{d\omega \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta P}{d\omega} \right) \quad (1-9)$$

Контрольные вопросы:

1. Что изучает предмет “Гидравлика”?
2. История возникновения предмета «Гидравлики»?
3. Какова роль и применение гидравлики в современном машиностроении и сельском хозяйстве?
4. Определение давления?
5. Силы действующие на жидкость?
6. Что такое удельный вес и удельный объем жидкости?
7. Что такое плотность жидкости?
8. Температурное расширение?
9. Сжимаемость жидкости?
10. Вязкость жидкости?
11. Дайте формулировку закону Бойля-Мариотта
12. Понятие о кавитации
13. Растворение газов в жидкости.
14. Какую жидкость называют идеальной?
15. Объясните реальную жидкость.
16. Закон Бойля – Мариотта.
17. Закон Гей – Люссака
18. Объясните уравнение Клайперона

Опорные слова: гидромеханика, гидромашины, силы, действующие на жидкость, основные физические свойства жидкости, плотность, вязкость, поверхностное натяжение. Свойства гидростатического давления, идеальные и реальные газы, закон Бойля-Мариотта, уравнение состояния идеальных газов, давление насыщенного пара, гидростатическое давление, силы, действующие на жидкость, капельные жидкости, поршень, реальные газы не подчиняются уравнению состояния идеальных газов, масса газа обратно пропорционально объёму газа, $p = \lim_{d\omega \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta P}{d\omega} \right)$.

Лекция 2
Гидростатика

Технологический обучения на лекция №2

Время - 2 час	Количества студентов: 20-30 чел
Форма учебного занятия	Введение, визуальная лекция
План учебного занятия	<ol style="list-style-type: none"> 1. Силы действующие на жидкость. 2. Гидростатика: <ol style="list-style-type: none"> а) основные свойства жидкости находящейся в покое. б) дифференциальное уравнение равновесия жидкости (уравнение Эйлера). 3. Свободная поверхность жидкости. 4. Основное уравнение гидростатики. 5. Понятие о пьезометре, пьезометрической высоте и вакууме. 6. Приборы и методы измерения давления. 7. Движение резервуара с жидкостью по вертикали с постоянным ускорением. 8. Горизонтальное перемещение резервуара с жидкостью с постоянным ускорением. 9. Вращение цилиндрического сосуда с жидкостью постоянной угловой скоростью.
<i>Цель учебного занятия:</i> Ознакомить студентов с основными свойствами жидкости, находящейся в покое, с приборами, с помощью которых измеряется давление, основными уравнениями гидростатики.	
<i>Задачи преподавателя:</i> <ul style="list-style-type: none"> • ознакомить приборами и методами измерения давления; • научить составлению дифференциального уравнения равновесия жидкости; • кратко охарактеризовать основные понятия свободной поверхностью жидкости. 	Результаты учебной деятельности: Студент должен узнать: <ul style="list-style-type: none"> - основные свойства жидкости, находящейся в покое; - дифференциальное уравнение равновесия жидкости - дифференциальное уравнение Эйлера; - свободная поверхность жидкости, основное уравнение гидростатики; - понятие о пьезометре, пьезометрической высоте и вакууме, приборы и методы измерения давления
Средства обучения	Лазерный проектор, визуальные материалы, информационное обеспечение.
Формы обучения	Коллективная, фронтальная работа, работа в парах. Графорганазеры
Условия обучения	Аудитория, приспособленная для работы с ТСО.

Этапы, время	Деятельность	
	преподавателя	студентов
1 этап. Введение (10 мин.)	1.1. Сообщает, тему, цель, планируемые результаты учебного занятия и план его проведения.	1.1. Слушают, записывают.
2 этап. Основной (60 мин.)	2.1. С целью актуализировать знания студентов задает фокусирующие вопросы: – Что такое давление? – Жидкости находящейся в покое? – Дифференциальное уравнение равновесия? Для ответа на вопросы организует работу в парах. Проводит блиц-опрос. 2.3. Последовательно излагает материал лекции по вопросам плана, использует визуальные материалы. Показывает прибор пьезометр и объясняет его работу. Акцентирует внимание на ключевых моментах темы, предлагает их записать	2.1. Слушают. По очереди отвечают на вопросы. Слушают правильный ответ. 2.3. Обсуждают содержание схем и таблиц, визуальные материалы, уточняют задают вопросы. Записывают главное.
3- этап. Заключительная (10 мин.)	3.1. Проводит блиц-опрос. Делает итоговое заключение. Дает задание для самостоятельной работы. 3.2 Сотавить кластер на слово «Жидкость». Ставить оценки.	3.1. Отвечают на вопрос. 3.2. Слушают, записывают.

2.1 Основные свойства жидкости, находящейся в покое

Рассмотрим равновесие жидкости. Для этого в пространстве исследуемой жидкости выбираем систему координатных осей x, y, z с центром в точке O и фиксируем произвольную точку A с координатами x, y, z (рис. 2.1). Затем около точки A выделим бесконечно малый параллелепипед 1-2-3-4-5-6-7-8 с бесконечно малыми сторонами dx, dy, dz так, чтобы точка A находилась в центре этого параллелепипеда. Гидростатическое давление, возникающее в точке A под действием внешних сил, обозначим через p . Выделенный параллелепипед, находящийся под действием внешних сил, будет в равновесии в том случае, если сумма проекций всех действующих сил на любую из координатных осей равна 0.

Установим внешние силы, действующие на исследуемый нами жидкий параллелепипед. Внешними силами здесь являются: 1) объёмные силы, пропорциональные массе параллелепипеда; 2) силы гидростатического давления, действующие на грани параллелепипеда со стороны окружающей жидкости, выражаются дифференциальными уравнениями равновесия Эйлера.

Обозначим через X, Y и Z проекции всех массовых сил (сила тяжести и силы инерции), отнесённые к единице массы, на координатные оси x, y, z . Тогда проекция объёмных сил dQ_x на ось x будет равна:

$$dQ_x = Xdm,$$

$$dm = dx dy dz \rho.$$

Следовательно,

$$dQ_x = X dx dy dz \rho.$$

Аналогичным путём определяются проекции массовых сил на оси x, y и z :

$$dQ_y = X dx dy dz \rho \quad \text{и} \quad dQ_z = Z dx dy dz \rho$$

Переходим к установлению сил гидростатического давления, действующих на грани параллелепипеда. Рассмотрим силы, действующие на вертикальные грани 1-2-3-4 и 5-6-7-8. Согласно первому свойству гидростатического давления, эти силы действуют нормально к указанным площадкам, т.е. направлены вдоль оси x . Проведём через точку А горизонтальную линию ВС, которая пересечёт грань параллелепипеда 1-2-3-4 в точке В, а грань 5-6-7-8 в точке С. Гидростатическое давление в точке В мы обозначим через p_B , а в точке С - через p_C . Так как в жидкой среде гидростатическое давление изменяется непрерывно по линейному закону, гидростатические давления в точках В и С будут выражаться в виде:

$$p_B = p - \frac{dx}{2} \frac{\partial p}{\partial x}$$

и

$$p_C = p + \frac{dx}{2} \frac{\partial p}{\partial x},$$

где частная производная $\frac{\partial p}{\partial x}$ называется градиентом гидростатического давления.

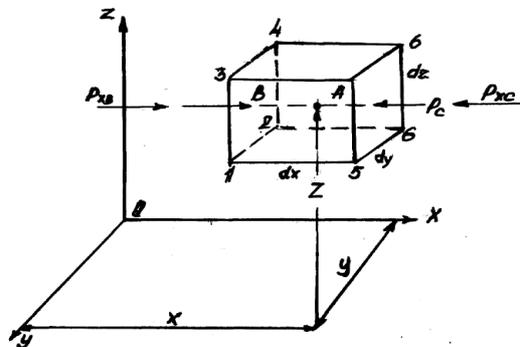


Рис. 2.1.

Площадки 1-2-3-4 и 5-6-7-8 являются бесконечно малыми, поэтому гидростатические давления в точках В и С могут рассматриваться как средние гидростатические давления для этих площадок. Следовательно, можно установить величины сил гидростатического давления на рассматриваемые площадки P_{xB} и P_{xC} (рис. 2.1):

$$P_{xB} = (\text{пл.} 1-2-3-4) p_B = dy dz \left(p - \frac{\partial p}{\partial x} dx \right); \quad (2.1)$$

$$P_{xC} = (\text{пл.} 5-6-7-8) p_C = dy dz \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right)$$

Составим уравнение равновесия исследуемого нами жидкого параллелепипеда 1-2-3-4-5-6-7-8 относительно оси x . Проектируя на ось x все внешние силы, действующие на параллелепипед, получаем:

$$P_{xB} - P_{xC} + dQ_x = 0 \quad (2.2)$$

Здесь силы гидростатического давления P_{xB} и P_{xC} , будучи нормальными к граням 1-2-3-4 и 5-6-7-8, проектируются на ось x в натуральную величину. Проекции же всех остальных сил гидростатического давления, действующих на другие грани, будут равны нулю, а потому в уравнение (2.2) не войдут. Уравнение (2.2) можно переписать следующим образом:

$$dy dz \left(p - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) - dy dz \left(p + \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) + X dx dy dz \rho = 0.$$

После несложных преобразований получим:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz + X dx dy dz \rho = 0.$$

Окончательно:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \rho X = 0. \quad (2.3)$$

Аналогичным путём можно составить уравнения равновесия относительно осей y и z :

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \rho Y = 0. \quad (2.3')$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \rho Z = 0. \quad (2.3'')$$

Полученные уравнения (2.3), (2.3') и (2.3'') являются дифференциальными уравнениями равновесия жидкости (Эйлера):

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho X &= 0. \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho Y &= 0. \\ -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho Z &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Для дальнейшего исследования произведём преобразование системы дифференциальных уравнений (2.4). Умножив каждое из уравнений (2.4) соответственно на dx , dy и dz получим:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial x} dx + \rho X dx &= 0. \\ -\frac{\partial p}{\partial y} dy + \rho Y dy &= 0. \\ -\frac{\partial p}{\partial z} dz + \rho Z dz &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.4')$$

Сложим эту систему уравнений:

$$\frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz = \rho(Xdx + Ydy + Zdz) \quad (2.5)$$

Так как гидростатическое давление является функцией только координат точки $x = f(x, y, z)$, то левая часть уравнения представляет собой полный дифференциал давления:

$$dp = \frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz \quad (2.6)$$

$$dp = \rho(Xdx + Ydy + Zdz). \quad (2.7)$$

Так как плотность рассматриваемой нами жидкости ρ является постоянной, то уравнение (2.7) может иметь смысл только в том случае, если правая часть этого уравнения также является полным дифференциалом. Для этого необходимо, чтобы существовала такая функция $U=f(x, y, z)$, частные производные которой по x , y и z были бы равны:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = X; \quad \frac{\partial U}{\partial y} = Y; \quad \frac{\partial U}{\partial z} = Z. \quad (2.8)$$

Такая функция называется потенциальной, или силовой, а силы, которые этой функцией выражаются, - *силами, имеющими потенциал*.

Следовательно, жидкость может находиться в равновесии только тогда, когда система массовых сил, действующих на неё, будет иметь потенциал. Из механики известны многие силы, имеющие потенциал, наибольшее значение из них имеют силы тяжести и силы инерции.

2.3 Свободная поверхность жидкости.

Рассмотрим наиболее важный для практики случай равновесия жидкости, находящейся под действием, только сил тяжести.

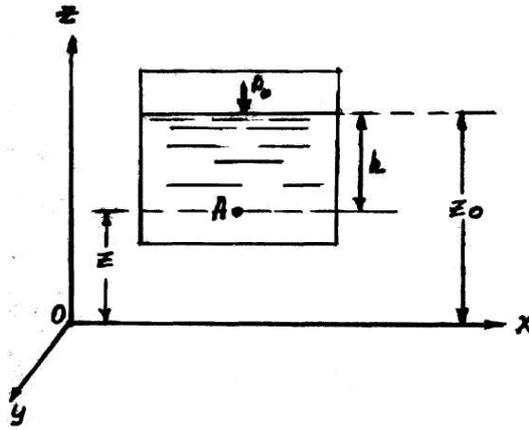


Рис. 2.2

Предположим, что жидкость находится в закрытом сосуде, как это показано на рис. 2.2. Будем считать также, что на поверхность жидкости действует известное нам давление p_0 , отличное от атмосферного. Тогда проекции объёмных сил (в данном случае сил тяжести) на оси Ox, Oy будут равны нулю:

$$X = \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \text{ и } Y = \frac{\partial U}{\partial y} = 0.$$

Проекция же силы тяжести на ось z , отнесённая к единице массы, будет равна:

$$Z = \frac{\partial U}{\partial z} = -g,$$

так как ось z имеет направление, противоположное направлению силы тяжести. Подставляя в уравнения Эйлера имеем:

$$dp = \rho \left(\frac{\partial U}{\partial x} dx + \frac{\partial U}{\partial y} dy + \frac{\partial U}{\partial z} dz \right)$$

или

$$dp = \rho dU \quad (2.9)$$

Т.е. дифференциальное уравнение для рассматриваемого случая примет следующий вид:

$$dp = -\rho g dz = -\gamma dz \quad (2.10)$$

$$\frac{dp}{\gamma} + dz = 0 \quad (2.10')$$

Полученное уравнение (2.10') является дифференциальным уравнением равновесия жидкости, находящейся под действием только силы тяжести.

В результате интегрирования уравнения (2.10') имеем:

$$z + \frac{p}{\gamma} = C \quad (2.11)$$

Пограничные условия на поверхности жидкости нам известны: при $z=z_0$ давление $p=p_0$. Следовательно,

$$z_0 + \frac{p_0}{\gamma} = C \quad (2.12)$$

Подставим полученное выражение для постоянной интегрирования в зависимость (2.11)

$$z + \frac{p}{\gamma} = z_0 + \frac{p_0}{\gamma},$$

или окончательно:

$$p = p_0 + \gamma(z_0 - z) \quad (2.13)$$

2.4 Основное уравнение гидростатики.

Из уравнения (2.14)

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho X &= 0. \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho Y &= 0. \\ -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho Z &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

следует, что давление в покоящейся жидкости изменяется только по вертикали (вдоль оси z , рис. 2.3), оставаясь одинаковым во всех точках любой горизонтальной плоскости, так как изменение давления вдоль осей x и y равно нулю. В связи с тем, что в этой системе уравнений частные производные $\frac{\partial p}{\partial x}$ и $\frac{\partial p}{\partial y}$ равны нулю, частная производная $\frac{\partial p}{\partial z}$ может быть заменена

на $\frac{dp}{dz}$ и, следовательно:

$$-\rho g - \frac{dp}{dz} = 0$$

Отсюда

$$-dp - \rho g dz = 0 \quad (2.15)$$

Разделив левую и правую части последнего выражения на ρg и переменяв знаки, представим это уравнение в виде:

$$dz + d \frac{1}{\rho g} dp = 0$$

Для несжимаемой однородной жидкости плотность постоянна и, следовательно

$$dz + d \left(\frac{p}{\rho g} \right) = 0$$

или

$$d \left(z + \frac{p}{\rho g} \right) = 0$$

откуда после интегрирования получим

$$z + \frac{p}{\rho g} = const \quad (2.16)$$

Для двух произвольных горизонтальных плоскостей 1 и 2 уравнение (2.16) выражают в форме:

$$z + \frac{p_1}{\rho g} = z_0 + \frac{p_2}{\rho g}, \quad (2.17)$$

Уравнение (2.16) или (2.17) является **основным уравнением гидростатики**. В уравнении (2.17): z_1 и z_2 - высоты расположения двух точек, внутри покоящейся однородной жидкости над произвольно выбранной горизонтальной плоскостью отсчета (плоскостью сравнения), а p_1 и p_2 гидростатические давления в этих точках.

Рассмотрим, например, две частицы жидкости, из которых одна расположена в точке 1 внутри объема жидкости (рис. 2.3) на высоте z от произвольно выбранной плоскости сравнения $0-0$, а другая находится в точке 2 на поверхности жидкости на высоте z_0 от той же плоскости. Пусть p и p_0 давления в точках 1 и 2 соответственно. При этих обозначениях согласно уравнению (2.17):

$$z + \frac{p}{\rho g} = z_0 + \frac{p_0}{\rho g}, \quad (2.17.a)$$

Или

$$\frac{p - p_0}{\rho g} = z_0 - z, \quad (2.17.б)$$

2.5 Понятие о пьезометре, пьезометрической высоте и вакууме

Рассмотрим закрытый сосуд L , заполненный жидкостью, на поверхности которой действует давление p_0 , превышающее атмосферное давление $p_{атм}$ (рис.2.3)

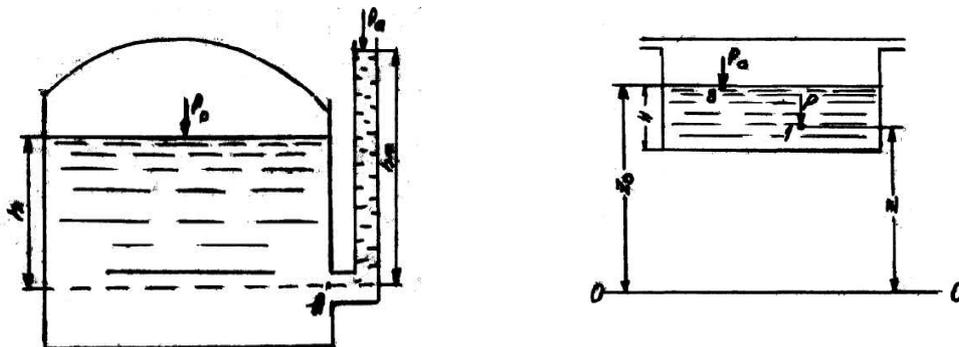


Рис. 2.3.

Предположим, что в некоторой точке A , расположенной на глубине h , сделано отверстие, к которому присоединена трубка 2, открытая сверху, т.е. сообщающаяся с атмосферой. Так как давление на поверхность жидкости p_0 больше атмосферного, то жидкость в трубке 2 поднимается на некоторую высоту h_0 , которая в гидравлике называется **пьезометрической высотой**, а сама трубка, в которой поднимается жидкость, пьезометрической, или **пьезометром**. Пьезометрическая высота h_p определяется из зависимости для гидростатического давления в точке A в соответствии с уравнением:

$$p_{abc} = p_{атм} + \gamma h_p, \quad (2.19)$$

Давление p_{abc} в точке A может быть определено и другим путём. В самом деле, область точки a находится под давлением столба жидкости в сосуде и давлением p_0 , действующим на поверхность жидкости в сосуде.

Тогда:

$$p_{abc} = p_0 + \gamma h,$$

В жидкости, находящейся в данном случае в состоянии покоя, давления в области точки A как со стороны пьезометра, так и со стороны сосуда, между собой равны, что позволяет написать равенство:

$$p_{атм} + \gamma h_p = p_0 + \gamma h,$$

Из этого равенства получаем второе выражение для h_p

$$h_p = \frac{p_0 - p_{атм}}{\gamma} + h. \quad (2.20)$$

Следовательно, пьезометрическая высота соответствует величине избыточного давления в точке A .

Обратимся теперь к зависимости (2.20), которая определяет пьезометрическую высоту. Предположим, что сосуд, в котором установлен пьезометр, является открытым. Тогда давление на поверхности жидкости в нем будет равно атмосферному ($p_0 = p_{атм}$), и зависимость (2.20) получает простое выражение:

$$h_p = h \quad (2.20')$$

Таким образом, в данном случае пьезометрическая высота будет равна глубине погружения точки в жидкость.

В практике очень часто приходится встречаться с областями, где имеет место разрежение, или вакуум, т.е. где давления бывают меньше атмосферного. **Вакуумом** называется разность между атмосферным и абсолютным давлением, характеризующая недостаток давления до окружающего атмосферного. Можно привести много случаев образования вакуума. Так, например, во всасывающей трубе насоса создаётся вакуум. Образование вакуума во всасывающей трубе поршневого насоса происходит в результате

движения поршня, а в центробежном насосе - в результате вращения рабочего колеса. Вакуум, возникающий в насадках, увеличивает их пропускную способность и т. д.

Остановимся на исследовании вопроса об образовании вакуума, о способах его измерения и его предельном значении. На рис. 2.5 показан резервуар, наполненный жидкостью, на поверхность которой действует давление p_0 , меньше атмосферного (например, из резервуара часть воздуха откачана вакуум-насосом). В точке К на глубине h к резервуару присоединена изогнутая U-образная трубка, с помощью которой можно измерить давление в этой точке (такая трубка называется *обратным пьезометром*, или *вакуумметром*).

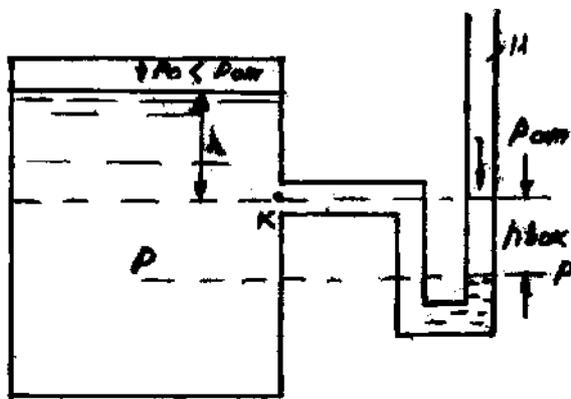


Рис.2.5

Так как давление, действующее на поверхность жидкости в резервуаре p_0 меньше атмосферного, уровень жидкости в трубке понизится по сравнению с положением точки К на величину $h_{\text{вак}}$, как это показано на рис. 2.5. Определим высоту $h_{\text{вак}}$, называемую вакуумметрической высотой. Для этого сначала установим величину давления в плоскости, проходящей через уровень жидкости в трубке (рис 2.5, линия А-А).

$$p_{p3} = p_0 + \gamma h + \gamma h_{\text{вак}},$$

со стороны же трубки оно составит величину:

$$p_{\text{тр}} = p_{\text{ат}}$$

Пусть давление p на поверхности жидкости в сосуде будет больше атмосферного. Тогда жидкость в трубке пьезометра поднимется выше уровня жидкости в сосуде на некоторую высоту h_p . Гидростатическое давление в точке А жидкости, взятой у основания пьезометрической трубки на глубине h от свободной поверхности жидкости в сосуде, определится по основному уравнению гидростатики

$$p_A = p_{\text{ат}} + \gamma(h_n + h)$$

и, следовательно,

$$h_n + h = \frac{p_A - p_{\text{ат}}}{\gamma}$$

С другой стороны, также имеем:

$$p_A = p + \gamma h$$

Таким образом, находим:

$$p = p_{\text{ат}} + \gamma h_n$$

Отсюда видно, что высота поднятия жидкости в пьезометрической трубке, так называемая **пьезометрическая высота**, - характеризует избыточное давление в сосуде и может служить мерой для определения его величины. Измерение давления высотой столба жидкости весьма удобно и часто применяется в технике. Полезно запомнить, что давление, равное 1 кг/см^2 (техническая атмосфера), соответствует весу столба воды с основанием в 1 см^2 высотой:

$$h_{\text{н.в.}} = \frac{p}{\gamma_B} = \frac{1}{0,001} = 1000 \text{ см} = 10 \text{ м}$$

или же весу столба ртути высотой

$$h_{n.p.m} = \frac{p}{\gamma_{рт}} = \frac{1}{0,0136} = 73,5 \text{ см} = 735 \text{ мм}$$

Физическая же атмосфера ($1,033 \text{ кГ/см}^2$) определяется ртутным столбом в 760 мм. Поэтому, например, если давление в сосуде будет 2,5 ат или, что то же самое, $2,5 \text{ кГ/см}^2$ его можно определить так же как давление, равное 25 м водяного или 183,75 см ртутного столба.

Пьезометр является очень чувствительным и точным прибором, однако он удобен только для измерения небольших давлений (не свыше 0,5 ат); при больших давлениях трубка пьезометра получается чрезмерно длинной, что осложняет измерения. В этих случаях применяют так называемые жидкостные манометры, в которых давление уравнивается не той же жидкостью, что и жидкость, находящаяся в сосуде, как это имеет место в пьезометре, а жидкостью большего удельного веса; обычно такой жидкостью является ртуть. Так как удельный вес ртути больше удельного веса воды в 1,36 раза, то при измерении одних и тех же давлений трубка ртутного манометра оказывается значительно короче пьезометрической трубки и сам прибор получается более компактным.

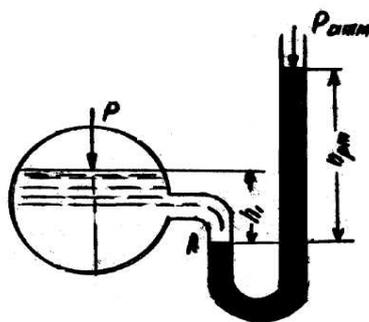


Рис.2.6.

Ртутный манометр (рис. 2.6) представляет собой обычно U-образную стеклянную трубку, изогнутое колено которой заполняется ртутью. Под действием давления в сосуде, уровень ртути в левом колене манометра понижается, а в правом - повышается. При этом величина гидростатического давления в точке А, взятой на поверхности ртути в левом колене, по аналогии с предыдущим определяется следующим образом:

$$p_A = p + \gamma_1 h_1 = p_{atm} + \gamma_{рт} h_{рт}$$

где γ_1 и $\gamma_{рт}$ - удельные веса жидкости в сосуде и ртути.

Отсюда:

$$p_{atm} = p + \gamma_{рт} h_{рт} - \gamma_1 h_1$$

Для измерения больших давлений применяется поршневой манометр, представляющий собой обращенный гидравлический пресс.

Этот манометр (рис. 2.7) состоит из трубки А, через которую измеряемое давление p передаётся на поршень В, оканчивающийся широкой металлической пластинкой С. Под ней находятся каучуковая пластинка D, соприкасающаяся с водой, заполняющей короткое колено манометра Е. Нижняя часть этого колена и открытая трубка G заливаются ртутью.

Если обозначить: f -площадь поршня, F - площадь пластинки, h - высоту ртути в манометрической трубке, то (это следует из уравнения равновесия) будем иметь:

$$p = \frac{F}{f} \gamma_{рт} h .$$

Из этого уравнения видно, что поршневой манометр при сравнительно малой высоте ртутного столба позволяет измерять весьма большие давления.

В тех случаях, когда необходимо измерить не давление в сосуде, а разность давлений в двух сосудах или же в двух точках жидкости в одном и том же сосуде, применяют дифференциальные манометры. Дифференциальный манометр, присоединенный к двум сосудам А и В, представлен на рис.2.7.

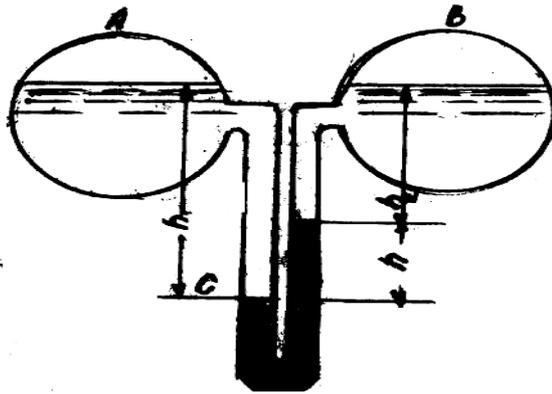


Рис. 2.7

Здесь, для давления p на уровне поверхности ртути в левом колене имеем:

$$p = p_A + \gamma_1 h_1 = p_B + \gamma_1 h_2 + \gamma_{pm} h,$$

откуда:

$$p_A - p_B = \gamma_1 (h_2 - h_1) + \gamma_{pm} h,$$

или, так как

$$h_2 - h_1 = -h,$$

$$p_A - p_B = (\gamma_{pm} - \gamma_1) h.$$

Таким образом, разность давлений определяется разностью уровней в двух коленах дифференциального манометра.

Для повышения точности измерений, а также при измерении незначительных по величине давлений применяются микроманометры. Одна из конструкций микроманометра изображена на рис.2.8 Он состоит из резервуара A , присоединяемого к сосуду, в котором измеряется давление и манометрической трубки B , угол наклона которой к горизонту α можно менять.

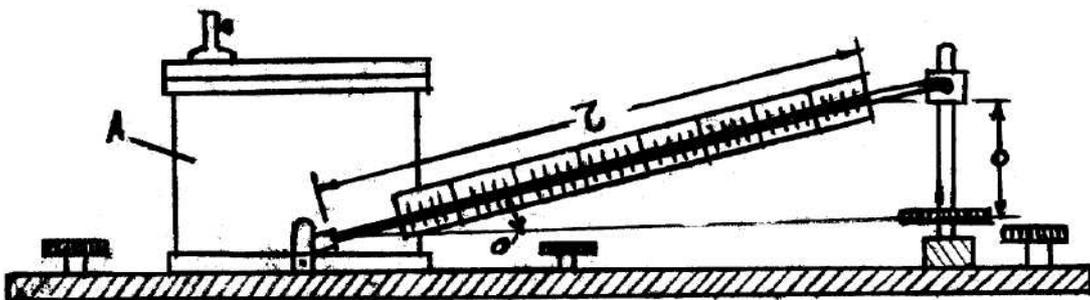


Рис.2.8

Давление около основания трубки; измеряемое микроманометром, определяется выражением: $p = \gamma l \sin \alpha$. По сравнению с обычным манометром подобный микроманометр обладает значительно большей чувствительностью, так как он позволяет вместо малой высоты h отсчитать длину l , тем большую, чем меньше угол α .

Если измеряемое давление, меньше атмосферного, т.е. в сосуде имеется вакуум, приборы, служащие для измерения давления, называются **вакуумметрами**. Обычно, однако, вакуумметры измеряют не непосредственно давление, а вакуум, т.е. недостаток давления до атмосферного. Принципиально они ничем не отличаются от ртутных манометров и также представляют собой заполненную ртутью изогнутую трубку (рис. 2.9), один конец которой - A - соединяется с пространством B , где измеряется давление, а другой конец - C - открыт. Пусть, например, измеряется давление газа в сосуде B ; в этом случае получаем:

$$p_{am} = p + \gamma_{pm} h_{pm},$$

откуда:

$$p = p_{am} - \gamma_{pm} h_{pm}$$

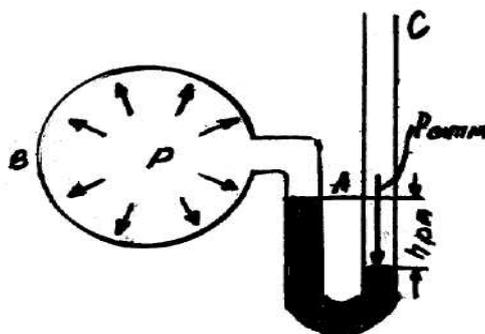


Рис. 2.9

Высоту:

$$h_{рт} = \frac{p - p_{атм}}{\gamma_{рт}},$$

соответствующую вакууму в сосуде ($p_{вак} = p_{атм} - p$), обычно называют **вакуумметрической высотой** и обозначают через $h_{вак}$. Отсюда видно, что величину вакуума также можно измерять высотой столба жидкости. Так, например, если показание ртутного вакуумметра $h_{рт} = 50$ см, то вакуум

$$p_{вак} = \gamma_{рт} h_{рт} = 0,0136 \cdot 50 = 0,68 \text{ кГ/см}^2.$$

Не всегда манометры и вакуумметры обязательно заполняются ртутью. В отдельных случаях, в зависимости от назначения и условий работы, для этой цели могут быть использованы и другие жидкости. При этом, однако, следует иметь в виду, что для заполнения вакуумметров нельзя применять летучие жидкости (спирт, эфир), так как при пониженном давлении они будут интенсивно испаряться и могут закипеть.

Применение рассмотренных приборов жидкостного типа, в том числе и ртутных, ограничивается областью сравнительно небольших давлений; главным образом они применяются в лабораторной практике, где используются весьма широко благодаря своей простоте и большой точности измерений. В тех случаях, когда необходимо измерять большие давления, применяют приборы второго типа – *механические*, из которых наибольшим распространением на практике пользуется пружинный манометр, схематически представленный на рис.2.8.

Он состоит из полый тонкостенной изогнутой трубки А, один конец которой запаян.

Этот конец соединяется при помощи цепи В с зубчатым механизмом С; второй - открытый - конец трубки сообщается с сосудом, в котором производится замеры давления. Через этот конец в трубку А поступает жидкость. Под действием давления пружина частично распрямляется и посредством зубчатого механизма приводит в движение стрелку, по отклонению которой судят о величине давления. Такие манометры обычно снабжаются градуированной шкалой, показывающей давление в атмосферах, а иногда оборудуются и самописцами.

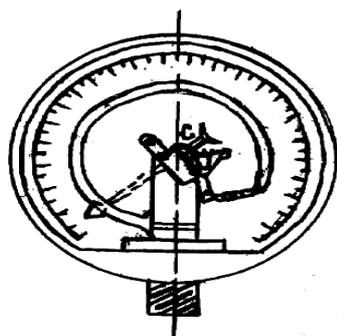


Рис. 2.10.

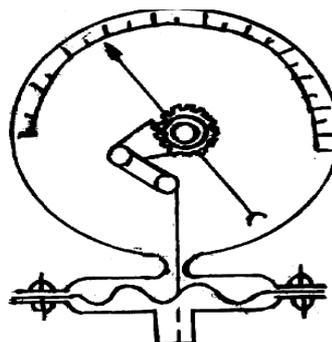


Рис. 2.11.

Существуют также так называемые мембранные манометры, в которых жидкость производит давление на тонкую металлическую пластинку или пластинку из

прорезиненной материи (мембрану). Получающаяся при этом деформация мембраны посредством системы рычагов передаётся стрелке, указывающей величину давления. Схема подобного манометра изображена на рис. 2.11.

Контрольные вопросы:

1. Перечислите основные свойства жидкости, находящейся в покое.
2. Составьте дифференциальное уравнение равновесия жидкости (уравнение Эйлера). Приведите примеры.
3. Что называется свободной поверхностью жидкости?
4. Уравнение поверхности равного давления для сосуда с заполненной жидкостью вертикального движения. Приведите примеры.
5. Распространение давления в сосуде заполненной жидкостью во время её движения в горизонтальном направлении. Уравнение для поверхности равного давления.
7. Выведите основное уравнение гидростатики?
8. Какие давления называются абсолютно манометрическое и вакуумметрической?
9. Что вы знаете о пьезометре, пьезометрической высоте и вакууме?
10. Объясните принцип работы U-образного ртутного манометра.
11. Принцип работы микроманометра и вакуумметра.
12. Приборы и методы измерения давления?

Опорные слова: гидростатика, основные свойства жидкости, находящейся в покое, дифференциальное уравнение равновесия жидкости, свободная поверхность жидкости, основное уравнение гидростатики, понятие о пьезометре, пьезометрической высоте и вакууме, приборы и методы измерения давления.

Лекция 3

**Законы гидростатики и их применени в технике.
Технологический обучения на лекция №3**

Время - 2 час	Количества студентов: 20-30 чел
Форма учебного занятия	Информационная лекция, совместная учеба и использование графического органайзера таблица "З. З.У".
План учебного занятия	1. Законы гидростатики и их применение в технике а) закон Паскаля 2. Гидростатические машины 3. Давление на плоские стенки. Эпюры гидростатического давления. Закон Архимеда.

Цель учебного занятия: ознакомить студентов с законами гидростатики и их применение в технике, напомнить законы: Архимеда и Паскаля, объяснить принцип действия гидростатических машин.

Технологическая карта лекции (3-е занятие)

Задачи преподавателя: • ознакомление кинематикой и динамикой жидкости; • ознакомить основными гидравлическими элементами потока; • кратко охарактеризовать уравнение Эйлера для движения идеальной жидкости.	Результаты учебной деятельности: Студент должен узнать: - о законе Паскаля - гидростатические машины - давление на плоские стенки; -; Эпюры гидростатического давления.
Методы и техники обучения	Лекция, «обучения сообща»; техники: Инсерт, презентация, графический органайзер: таблица Э
Средства обучения	Лазерный проектор, информационное обеспечение, скотч, листы бумаги А32
Формы обучения	Фронтальная, индивидуальная работа, работа в гр
Условия обучения	Аудитория, приспособленная для работы имеющая условия для использования ТСО/ инф технологий

Этапы, время	Деятельность	
	Преподавателя	студентов
1 этап. Введение (10 мин.)	1.1. Сообщает, тему, цель, планируемые результаты учебного занятия и план его проведения.	1.1. Слушают, записывают.

<p>2 этап. Основной (60 мин.)</p>	<p>2.1. С целью актуализировать знания студентов задает фокусирующие вопросы: – Для ответа на вопросы организует работу в парах. Проводит блиц-опрос.</p> <p>2.3. Последовательно излагает материал лекции по вопросам плана, использует визуальные материалы. Показывает прибор пьезометр и объясняет его работу.</p> <p>Акцентирует внимание на ключевых моментах темы, предлагает их записать</p>	<p>2.1. Слушают. По очереди отвечают на вопросы. Слушают правильный ответ.</p> <p>2.3. Обсуждают содержание схем и таблиц, визуальные материалы, уточняют, задают вопросы. Записывают главное.</p>
-----------------------------------	--	--

3.1 Закон Паскаля.

Поместим на свободную поверхность жидкости, находящейся в равновесии в резервуаре (рис. 3.1) поршень и приложим к нему силу P_0 . в результате чего со стороны поршня на жидкость возникает давление p_0 . В соответствии с основным уравнением гидростатики:

$$p = p_0 + \rho gh,$$

абсолютные давления в произвольно выбранных точках жидкости A, B, C будут соответственно равны:

$$p_A = p_0 + \rho gh_A.$$

$$p_B = p_0 + \rho gh_B$$

$$p_C = p_0 + \rho gh_C$$

Из анализа полученных уравнений видно, что абсолютные давления в точках жидкости, находящихся на разной глубине, будут различные, однако внешнее давление на жидкость, заключённую в замкнутом сосуде, передаётся всем её частицам без изменения. В этом суть закона Паскаля.

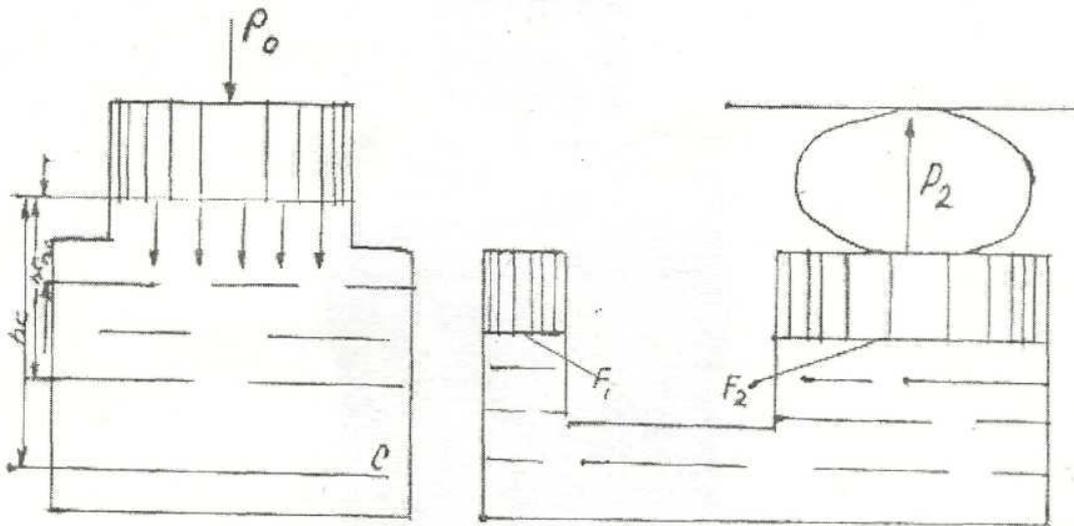


Рис. 3.1

3.2. Гидростатические машины

Рассмотрим принцип действия и основные схемы наиболее употребительных гидростатических машин.

Гидравлический пресс применяется для получения больших сжимающих усилий, что необходимо, например, для деформации металлов при обработке давлением (прессовании, ковке, штамповке), при испытании различных материалов, уплотнении рыхлых материалов, брикетировании и т.д.

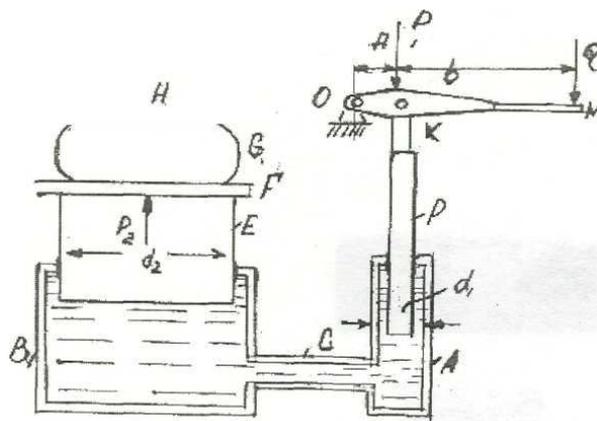


Рис. 3.2

Принципиальная схема гидравлического пресса.

Принципиальная схема пресса изображена на рис. 3.2. Он состоит из двух цилиндров A и B (малого и большого диаметра), соединённых между собой трубкой C . В малом цилиндре имеется поршень (ныряло) D , соединённый с рычагом ОКМ. Имеющим неподвижную шарнирную опору в точке O , а в большом цилиндре поршень (плунжер) E , составляющий одно целое со столом (платформой) F , на котором помещается прессуемое тело G .

Рычаг приводится в действие вручную или при помощи специального двигателя. При этом поршень D получает движение вниз и оказывает давление на находящуюся под ним жидкость, которое передаётся на поршень E и заставляет его вместе со столом двигаться вверх до тех пор, пока тело G не войдёт в соприкосновение с неподвижной плитой H . После этого при продолжающейся работе пресса, а следовательно и дальнейшем подъёме стола, собственно, и начинается процесс прессования и тело G подвергается сжатию.

Если рассматриваемое устройство служит не для прессования, а только для поднятия груза, т.е. представляет собой, так называемый гидравлический подъёмник, неподвижная плита оказывается лишней и из конструкции исключается.

Помимо указанных основных частей гидравлический пресс всегда снабжается также (не показанными на схеме) всасывающим и нагнетательными клапанами, регулирующими работу пресса, и предохраняющим его от разрыва при чрезмерном возрастании давления.

Установим основные соотношения, определяющие работу пресса. Пусть усилие, действующее на конец M рычага ОКМ, будет Q , а плечи рычага соответственно равны $OK = a$, $KM = b$. Тогда, рассматривая равновесие рычага и составляя уравнение моментов относительно его центра вращения O :

$$Q(a+b) = P_1 a$$

легко найдём силу

$$P_1 = \frac{Q(a+b)}{a},$$

передаваемую на поршень D малого цилиндра и создающую в жидкости добавочное гидростатическое давление:

$$P = \frac{P_1}{4} \cdot \frac{\pi d_1^2}{4}.$$

Это давление передаётся на поршень E большого цилиндра, в результате чего полная сила давления на этот поршень, обуславливаемая силой Q , будет равна:

$$P_2 = p \frac{\pi d_2^2}{4} = Q \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 \frac{a+b}{a}$$

где d_1 и d_2 — диаметры цилиндров, соответственно малого и большого. Из последнего выражения видно, что сила P_2 может быть получена сколько угодно большой путём выбора соответствующих размеров цилиндров и плеч движущего рычага. Действительная сила P_2' , передаваемая на стол и осуществляющая процесс прессования, оказывается несколько меньше силы P_2 , за счёт неизбежных потерь энергии на преодоление трения в движущихся частях пресса и утечек жидкости через различные не плотности и зазоры, что учитывается введением в последнюю формулу коэффициента полезного действия пресса η

$$P_2' = Q \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 \frac{a+b}{a} \eta.$$

В современных гидравлических прессах развиваются весьма большие усилия (до 25 000 т). В этих конструкциях малый цилиндр выполняется обычно в виде поршневого насоса высокого давления, подающего рабочую жидкость (воду или масло) в большой цилиндр (собственно пресс), часто с включением специального устройства - гидравлического аккумулятора, выравнивающего работу насоса.

Гидравлический аккумулятор. Как показывает само название, гидравлический аккумулятор служит для аккумуляирования, т.е. накапливания, собирания энергии. Он

применяется на практике в тех случаях, когда необходимо произвести кратковременную работу, требующую значительных механических усилий, например, при поднятии больших тяжестей, открывании и закрывании ворог шлюзов и т.п.

Наиболее широкое применение гидравлические аккумуляторы получили в настоящее время при работе гидравлических прессов, представляя собой здесь установки, накапливающие жидкость в период холостого хода пресса и отдающие её при рабочем ходе, когда производительность насосов оказывается недостаточной.

Гидравлический аккумулятор (рис. 3.3) состоит из цилиндра *A*, в котором помещён плунжер *B*, присоединённый своей верхней частью к платформе *C*, несущей груз большого веса. В аккумулятор по трубе *D* насосом нагнетается жидкость (вода, масло), которая поднимает вверх плунжер с грузом; при достижении крайнего верхнего положения насос автоматически выключается.

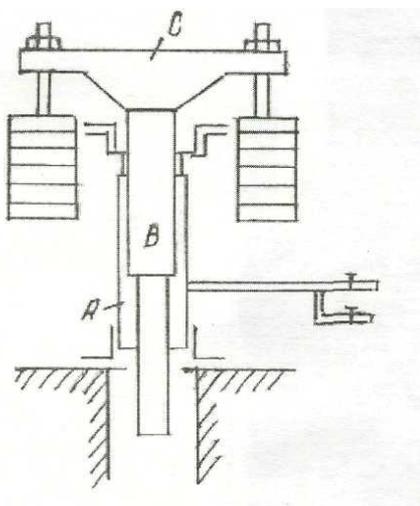


Рис 3.3

Обозначим вес плунжера с грузом через *G*, а его полную высоту подъёма через *H*. Тогда энергия запасённая аккумулятором при полном подъёме плунжера, будет равна *G*, а создаваемое им в жидкости гидростатическое давление:

$$p = \frac{G}{F}$$

где *F*- площадь сечения плунжера.

Под этим постоянным давлением находящаяся в аккумуляторе жидкость подводится по трубе *E* к гидравлическим машинам - орудиям, например прессовым насосам, обеспечивая тем самым их работу с постоянной нагрузкой.

Полная работа, совершаемая аккумулятором, определяется уравнением

$$A = pFH\eta.$$

Гидростатическое давление, создаваемое аккумулятором, получается тем большим, чем меньше площадь сечения плунжера.

3.3. Давление жидкости на плоские стенки и криволинейные поверхности

Давление жидкости на плоские стенки Предположим, что имеется плоская стенка площадью *F*, наклонённая к горизонту под некоторым углом α (рис. 3.4). Разделим её по высоте па ряд элементарных горизонтальных (весьма узких) полосок *AF* и определим давление на одну из таких полосок. Гидростатическое давление в любой точке на оси полоски определяется формулой:

$$R = \sum \Delta R = \sum (p_0 + \gamma h) \Delta F = p_0 \sum \Delta F + \gamma \sum h \Delta F$$

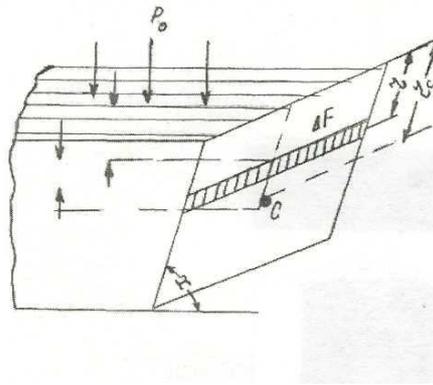


Рис.3.4

Сумма $\sum \Delta F = F$, а сумма $\sum h \Delta F$ может быть представлена в виде:

$$\sum h \Delta F = \sum l \sin \alpha \Delta F = \sin \alpha \sum l \Delta F,$$

где: l — расстояние до полосок от поверхности воды, отсчитываемое в плоскости стенки.

Но сумма $\sum l \Delta F$ есть статистический момент площади F относительно линии пересечения поверхности воды с плоскостью стенки (эта линия носит наименование уреза воды) и равняется:

$$\sum l \Delta F = Fl$$

где l_c — расстояние (в плоскости стенки) до центра тяжести этой площади. Следовательно,

$$\sum h \Delta F = Fl_c \sin \alpha = F h_c$$

где $h_c = l_c \sin \alpha$ — глубина погружения центра тяжести стенки.

Таким образом, получаем:

$$R = p_0 F + \gamma h_c F = (p_0 + \gamma h_c) F$$

Замечая, что величина, стоящая в скобках, представляет собой гидростатическое давление в центре тяжести стенки, и, обозначая его через p_c , получаем окончательно:

$$R = p_c F$$

Следовательно, *давление жидкости на плоскую стенку равняется произведению величины смоченной площади стенки на гидростатическое давление в её центре тяжести.*

Давление жидкости на криволинейные поверхности.

Возьмём сосуд произвольной формы и выделим на его стенке какую-либо криволинейную поверхность S , ограниченную контуром $FMBN$ (рис. 3.5). Будем искать составляющие полного давления на эту поверхность по координатным осям, выбрав, например, начало координат на свободной поверхности жидкости, как и расположив оси так, как это показано на рис. 3.5. При этом ограничимся определением лишь одной составляющей

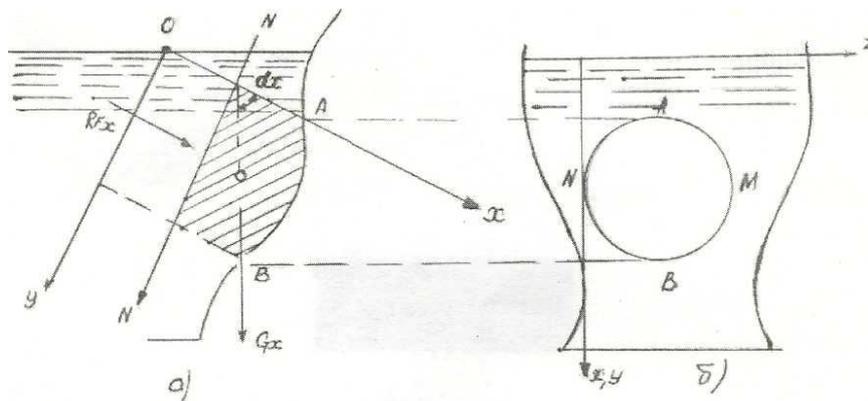


Рис. 3.5.

R_x , параллельной оси x , поскольку остальные составляющие могут быть найдены совершенно аналогичным образом.

Найдём проекцию поверхности S на некоторую плоскость $N-N$, нормальную к оси x и расположенную между этой поверхностью и координатной плоскостью zOy . Отметим, что указанную плоскость проекций $N-N$ так же, как и направление самой оси x , можно выбирать различным образом.

На отсек жидкости, заключённый в объёме между поверхностью S , плоскостью $N-N$ и поверхностью проектирующего цилиндра, образующие которого параллельны оси x , действуют следующие силы:

- 1) вес выделенного объёма жидкости G_x ;
- 2) сила R_F -давления жидкости на проекцию поверхности S на плоскость $N-N$;
- 3) силы давления на боковую поверхность указанного объёма; их проекция на ось x равняется нулю;
- 4) сила реакции R со стороны поверхности S , равная по величине, но обратная по направлению искомой силе давления жидкости.

Проектируя эти силы на ось x , имеем:

$$\sum X = R_{Fx} + G_x \cos \alpha_x - R_x = 0,$$

откуда для проекции силы реакции получаем следующее выражение:

$$R_x = R_{Fx} + G_x \cos \alpha_x = 0 \quad (3-1)$$

Аналогичные выражения подобным же образом находятся и для проекций силы реакции на другие координатные оси:

$$\begin{aligned} R_y &= R_{Fy} + G_y \cos \alpha_y = 0 \\ R_z &= R_{Fz} + G_z \cos \alpha_z = 0 \end{aligned} \quad (3-2)$$

где $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ — углы между направлением линии действия силы тяжести и осями координат x, y, z .

Итак, получаем следующую общую теорему о давлении на криволинейную поверхность: "проекция на заданную ось x силы давления на криволинейную поверхность S равняется сумме проекций на эту ось веса жидкости, находящейся между поверхностью S , поверхностью проектирующего цилиндра и плоскостью проекций, нормальной к оси x , и силы давления жидкости на проекцию поверхности S на ту же плоскость проекций".

3.4. Эпюры гидростатического давления.

Изменения гидростатического давления на ограничивающую жидкость поверхность изображаются очень наглядно при помощи графиков, или эпюр, давления. При этом давление, возрастающее с глубиной погружения точки его приложения по линейному закону, откладывают в определённом масштабе в виде отрезков, нормальных к поверхности.

Предположим, что требуется построить эпюру абсолютного давления на вертикальную стенку AB сосуда, наполненного жидкостью

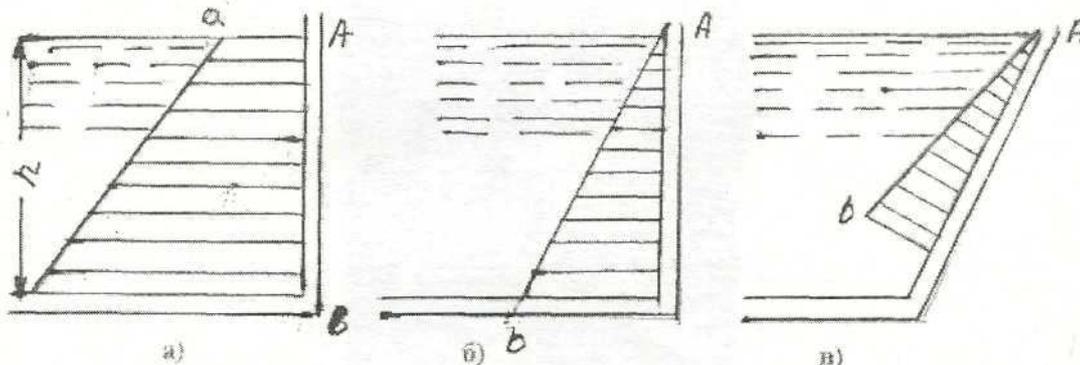


Рис.3.6

удельного веса γ до уровня h (рис. 3.6, а) давление на свободной поверхности жидкости равно атмосферному давлению. Изменение гидростатического давления по высоте стенки. В этом случае определяется уравнением:

$$p = p_{атм} + \gamma h,$$

представляющим уравнение прямой линии. Поэтому для построения эпюры давления необходимо отложить от точки А на свободной поверхности жидкости ($h = 0$) отрезок aA , соответствующий в масштабе построения атмосферному давлению, а от точки В у дна сосуда - отрезок bB , изображающий давление в этой точке $p = p_{атм} + \gamma h$, и соединить концы этих отрезков прямой ab . Полученная фигура - трапеция $AabB$ - и представит собой эпюру гидростатического давления.

Эпюра избыточного манометрического давления $p - \gamma h$ для той же стенки изображается, очевидно, прямоугольным треугольником AbB (рис. 3.6. б).

В случае сосуда с наклонной стенкой, составляющей с горизонтальной плоскостью некоторый угол α , эпюра избыточного гидростатического давления также представляет собой прямоугольный треугольник AbB (рис. 3.6, в), в котором отрезки, изображающие давления, наклонены к горизонту под углом $90^\circ - \alpha$.

Если стенка состоит из ряда отдельных плоских граней, наклоненных под различными углами к горизонту, и изображается на чертеже (рис. 3.7. а) в виде некоторой ломаной линии $ABCD$, эпюра гидростатического давления может быть построена теми же методами, что и для обычной плоской стенки. Для этого сначала отложим от точки В нормально к грани AB отрезок Bb , изображающий гидростатическое давление в этой точке. Затем соединим точки А и б прямой линией и получим эпюру давления на указанную грань в виде прямоугольного треугольника AbB . Далее, перейдем к построению эпюры давления на грань BC . Отложим от точек В и С этой грани, нормально к ней, отрезки, соответствующие гидростатическим давлениям - от точки В отрезок Bb , равный Bb , и от точки С отрезок Cc . В результате получим трапецию $Bb'Cc$, представляющую собой эпюру давления на грань. Аналогичным путём строится эпюра давления и для последней грани CD (трапеция $Cc'dD$).

Отметим такой же случай, когда стенка имеет криволинейную форму. Гидростатическое давление в отдельных точках такой стенки также изображается отрезками прямых, нормальных к стенке в соответствующих точках, эпюра же давления представит собой в этом случае криволинейный треугольник (рис. 3.7. б).

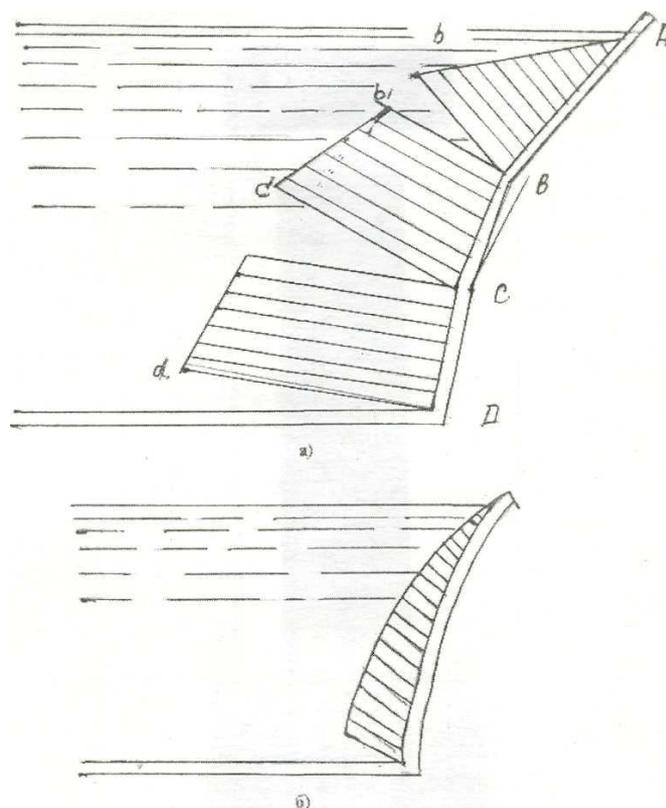


Рис. 3.7.

3.5. Закон Архимеда.

Закон Архимеда, открытый им за 250 лет до н.э., характеризует плавучесть тела погруженного в жидкость. Для теоретического вывода закона Архимеда рассмотрим давление жидкости на тело, погруженное в неё. Для упрощения допустим, что поверхность тела не имеет перегибов и поэтому с любой горизонтальной прямой пересекается только в двух точках (рис. 3.8).

Рассечём тело вертикальными плоскостями, параллельными координатным плоскостям yOz и xOz , на элементарные призмы с площадками $d\omega_1$ и $d\omega_2$, на вертикальную ось будут равны:

$$\begin{aligned} dP_{1=} &= p_1 d\omega_1 \cos(dP_1, z) = p_1 d\omega = \gamma h_1 d\omega \\ dP_{2=} &= -p_2 d\omega_2 \cos(dP_2, z) = -p_2 d\omega = -\gamma h_2 d\omega \end{aligned} \quad (3-1)$$

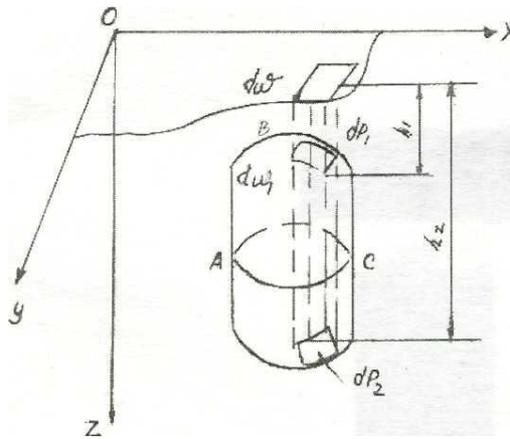


Рис. 3.8

где: p_1 и p_2 — манометрические давления в центрах тяжести площадок $d\omega_1$ и $d\omega_2$;
 h_1 и h_2 — глубины погружения центров тяжести площадок $d\omega_1$ и $d\omega_2$.

Интегрируя уравнения (3-1) и суммируя их для определения результирующей силы вертикального давления на тело, получаем:

$$P = \int p_1 d\omega - \int p_2 d\omega = \gamma (\int h_1 d\omega - \int h_2 d\omega) = \gamma (W_1 - W_2) = \gamma W \quad (3-1, a)$$

где: W_1 и W_2 — объёмы призм, имеющих в качестве верхнего основания проекция тела на координатную плоскость xOy , в качестве нижнего основания - верхнюю и нижнюю поверхности тела $ABCD$, W — объём тела.

Суммы проекций сил давлений на оси x и y должны быть равны нулю, т.к. жидкость находится в покое, и давление зависит не от ориентировки площадок, а только от их заглубления.

Уравнение (3-1a) показывает, что результирующая сила давления жидкости на погруженное в неё тело (*архимедова сила*) равна весу жидкости в объёме погруженного в неё тела и направлена по вертикали снизу вверх.

Плавание тел в жидкости. Плавучесть тела.

Если вес погруженного в жидкость тела G меньше архимедовой силы, т.е. меньше силы давления жидкости на него, или $P = \gamma W > G$, тело всплывает. Если $P < G$, тело тонет. При $P = G = \gamma W$ тело не тонет и не всплывает, находясь в состоянии покоя в любой точке водного пространства.

Следовательно, когда $P > G$, то только часть тела погружена в жидкость, что характеризует его плавучесть. В этом случае архимедова сила P_n равна весу жидкости в объёме погружённой в неё части тела ξW , где ξ - коэффициент, определяющий часть тела, погруженную в жидкость ($\xi < 1$) или $P_n = \gamma W \xi = G$.

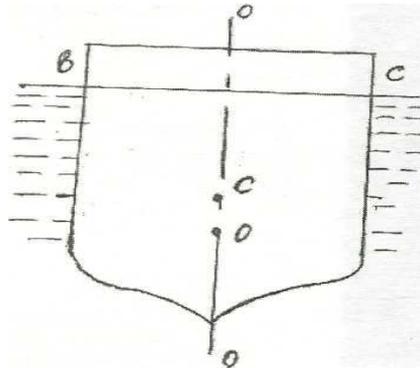


Рис.3.9.

Вес жидкости в объёме погруженной в неё части тела $\gamma W \xi$ называется *водоизмещением* (или архимедовой силой). Соответственно, центр давления при плавании, т.е. *точку приложения архимедовой силы*, называют центром водоизмещения. При качке судна центр давления меняет своё положение, т.к. в этом случае одна часть судна погружается в воду, а противоположная, наоборот, выходит из воды, как бы обсыхает; это меняет форму подводной части судна и, следовательно, положение центра давления. Водоизмещение определяет максимальную величину погружения судна в воду и его грузоподъёмность.

Линию пересечения свободной поверхностью водоёма с боковой поверхностью судна при его максимальной нагрузке называют *ватерлинией BB*, а плоскость в пределах судна, ограниченную *ватерлинией*, - плоскостью плавания (рис. 3.9). Вертикальная ось симметрии *О-О*, нормальная к плоскости плавания и обязательно проходящая через центр тяжести *С* плавающего тела или судна, носит наименование *оси плавания*. Центр тяжести сухогрузного судна (не наливного) не меняет своего положения при качке. У наливных судов, имеющих свободную поверхность залитой жидкости, центр тяжести при качке перемещается.

Контрольные вопросы:

1. Объясните принцип работы гидропрессов.
2. Объясните применения законов гидростатики в технике.
3. Напишите уравнение поверхности равного давления?
4. Объясните эпюру давления.
5. Сформулируете закон Архимеда.
6. Сформулируете закон Паскаля.
7. Применение закона Архимеда в технике.

Опорные слова: Законы гидростатики и их применение в технике, закон Паскаля гидростатические машины, давление жидкости на плоские и криволинейные поверхности, эпюры гидростатического давления, закон Архимеда; теории плавания тел; движение резервуара с жидкостью; перемещение резервуара с жидкостью, вращение цилиндрического сосуда с жидкостью.

Лекция 4.
Технология обучения на лекцию № 4.

Время - 2 час	Количества студентов: 20-30 чел
Форма учебного занятия	Информационная лекция, совместная учеба и использование графического органайзера таблица "З. З.У".
План учебного занятия	<p>Кинематика и динамика жидкости. Классификация движений, местная скорость жидкости. Линия тока, и её направление.</p> <p>Основные задачи гидродинамики</p> <p>3. Основные гидравлические элементы потока.</p> <p>4. Уравнение неразрывности (сплошности) потока.</p> <p>5. Уравнение Эйлера для движения идеальной жидкости.</p>
<i>Цель учебного занятия:</i> Ознакомить студентов с кинематикой и динамикой жидкости, с основными задачами гидродинамики, с основными гидравлическими элементами потока, с уравнением неразрывности (сплошности) потока.	
<i>Задачи преподавателя:</i>	<i>Результаты учебной деятельности:</i>
<ul style="list-style-type: none"> • ознакомление кинематикой и динамикой жидкости; • ознакомить основными гидравлическими элементами потока; • кратко охарактеризовать уравнение Эйлера для движения идеальной жидкости. 	<p>Студент должен узнать:</p> <ul style="list-style-type: none"> - кинематика и динамика жидкости; - задачи гидродинамики линия тока и её направление; - дифференциальное уравнение Эйлера; - основные гидравлические элементы потока;
Методы и техники обучения	Лекция, «обучения сообща»; техники: Инсерт, блиц-опрос, презентация, графический органайзер: таблица З/Х/У
Средства обучения	Лазерный проектор, информационное обеспечение, маркеры, скотч, листы бумаги А32
Формы обучения	Фронтальная, индивидуальная работа, работа в группах
Условия обучения	Аудитория, приспособленная для работы в группах, имеющая условия для использования ТСО и информационных технологий

Технологическая карта лекции (4-е занятие)

Этапы, время	Деятельность	
	Преподавателя	студентов
1 этап. Введение в учебное занятие (3 мин.)	1.1. Сообщает тему и план лекционного занятия (выводит на экран), напоминает основные вопросы, знакомит с планируемыми учебными результатами занятия и регламентом работы.	1.1. Слушают, записывают.
2 этап. Актуализация знаний (17 мин.)	2.1. Выводит на экран таблицу З/Х/У и комментарий к работе с ней (приложение 2). Дает задание начертить таблицу в рабочих тетрадях и заполнить колонку 2 в соответствии с планом лекции. 2.2. Предлагает студентам, пользуясь сделанными ими отметками на полях текста во время его прочтения, ответить на вопросы: (1) Что они уже знают? (т.е. могут самостоятельно рассказать) (2) Что осталось не усвоенным, не понятным? (3) Какая требуется дополнительная информация?, в соответствии с чем, заполнить 3 и 4 колонку таблицы, проставляя номера ключевых понятий (приложение 3). 2.3. Проводит блиц-опрос. При этом выслушивает всего несколько ответов и сообщает, что работа будет продолжена в минигруппах.	2.1. Перерисовывают таблицу З/Х/У, вносят во 2-ю колонку таблицы вопросы плана лекции. 2.2. Заполняют 3 и 4 колонку таблицы. 2.3. Зачитывают результаты.
3 этап. Информационный (55 мин.)	3.1. Разбивает студентов на 4 мини-группы по произвольному признаку и дает задание: (1) проанализировать индивидуальную информацию в колонках 4 таблицы З/Х/У пофрагменту темы, в соответствии с номером группы: 1 группа – по 1 вопросу, 2 группа – по 2 вопросу и т.д.; (2) обобщить неусвоенное в 1-2 вопроса; (3) совместно подготовить ответы, используя любые имеющиеся источники (учебник, текст лекции); (4) подготовиться к презентации результатов работы – оформить ответы на листах презентации в виде таблицы З/Х/У по данному вопросу темы. Объявляет о начале работы в группах. 3.2. Организует процесс презентации, обсуждение. 3.3. После изложения ответа каждой группы: (1) задает вопрос на определение уровня усвояемости всей аудитории: «Что мы узнали?», (2) проводит блиц-опрос. 3.4. Обобщает результаты учебной деятельности, предлагает заполнить 5 колонку индивидуальной таблицы З/Х/У.	3.1 Работают в группах: - каждый член группы зачитывает, ключевые понятия из 4 колонки своей индивидуальной таблицы; - лидер группы организует процесс формулирования и записи вопросов 4 колонки; - коллективно обсуждают и находят и записывают ответ в колонке 5 обобщающей таблицы З/Х/У; - оформляют ответ на листе презентации. 3.2. Презентация результатов работы: лидеры групп - прикрепляют к доске лист (Формат не менее А-32) с заполненной таблицей З/Х/У по своему вопросу и комментируют ее; отвечают на вопросы; обосновывают свое мнение. 3.3. Отвечают на вопросы. 3.4. Заполняют (до 2 мин) 5 колонку индивидуальной таблицы З/Х/У.
4 этап. Заключительный (5 мин.)	4.1. Подводит итоги, обобщает результаты, оценивает выступления лидеров, поощряет активных участников. 4.2. Дает задание для самостоятельной работы: написать кластер «Движение жидкости».	Слушают, записывают.

Приложение 1 (4.1)

Правила работы с применением техники Инсерт

1. Прочитайте текст.
2. Систематизируйте полученную информацию, проставив карандашом пометки на полях:

V – соответствует имеющимся знаниям (информации) о ...;

- (минус) – противоречит имеющимся знаниям о ...;

+ (плюс) – является новой информацией;

? - непонятная/требующая уточнения/дополнения информация.

Приложение 2 (4.1)

Правила работы с применением техники З/Х/У
1. Прочитайте текст, используя технику Инсерт.
2. Полученную информацию индивидуально систематизируйте – «разнесите» в колонки таблицы соответственно сделанным в тексте пометкам.
Таблица З/Х/У (Знаю/Хочу узнать/Узнал(а))

№	Вопрос темы	Знаю	Хочу узнать	Узнал
1	2	3	4	5
1				
2				
3				
4				

Приложение 3 (4.1) Ключевые понятия

1	Кинематика движения жидкости
2	Динамика движения жидкости
3	Задачи гидродинамики
4	Линия тока
5	Направление линии тока
6	Гидравлические элементы потока
7	Движение идеальной жидкости
8	Уравнение Эйлера
9	Уравнение неразрывности
10	Определение живого сечения
11	Местная скорость жидкости

4.1 Кинематика и динамика жидкости.

Классификация движений, местная скорость жидкости.

Движение жидкости определяется скоростями движения частиц в отдельных точках потока жидкости, давлениями, возникающими на различных глубинах, глубинами, а также общей формой потока. При этом глубина потока жидкости, скорости, ускорения и давления в точках потока зависят от положения точек, определяемого координатами x , y , z . Следовательно, указанные величины являются функциями координат. Кроме того, величины, характеризующие движение жидкости, могут изменяться и во времени, являясь также функцией времени t . В связи с этим различают два вида движения: установившееся и неустановившееся.

Установившимся движением называется такой вид движения, при котором скорости, ускорения, давления не меняются с течением времени, а зависят только от положения в потоке жидкости рассматриваемой точки, являясь функцией координат:

$$u = f(x, y, z); \quad p = f_1(x, y, z); \quad h = f_2(x, y, z).$$

Здесь u - скорость движения жидкости; p - гидродинамическое давление в рассматриваемой точке; h - глубина потока.

Неустановившимся движением называется такой вид движения, при котором все перечисленные выше компоненты являются функцией не только координат, но и времени:

$$u = f(x, y, z, t); \quad p = f_1(x, y, z, t); \quad h = f_2(x, y, z, t).$$

Проиллюстрируем приведенные выше виды движения жидкости на примере вытекания жидкости из резервуара. Предположим, что в резервуаре имеется кран для выпуска воды. Подвод воды к резервуару осуществляется водопроводной трубой, оборудованной задвижкой. Если одновременно открыть выпускной кран и задвижку в трубе и отрегулировать их положение так, чтобы количество вытекающей воды было равно количеству поступающей воды, то мы будем наблюдать в резервуаре установившееся движение. Действительно, глубина воды в резервуаре H будет постоянной, не изменяющейся с течением времени; поэтому в любой точке жидкости гидродинамическое давление p , глубина погружения h рассматриваемой точки и скорость также не будут меняться с течением времени. Закроем задвижку водопроводной трубы, а выпускной кран оставим открытым. Резервуар будет опорожняться. При этом мы будем наблюдать неустановившееся движение жидкости. На самом деле глубина воды в резервуаре H с течением времени уменьшается. В связи с этим уменьшаются глубина h погружения рассматриваемой точки в жидкость, давление и скорость течения в этой точке. В результате наступит момент, когда резервуар опорожнится и все компоненты движения $\{u, p, h\}$ будут равны нулю.

Установившееся движение разделяется на равномерное и неравномерное. **Равномерным движением** называется такой вид установившегося движения, при котором все компоненты движения - скорость, давление, форма русла, глубина - не меняются по длине (ось x) потока. Поперечное сечение потока при равномерном движении постоянно по длине.

Примером равномерного движения может служить движение в канале правильной формы с постоянной глубиной наполнения. Движение потока с постоянной скоростью в цилиндрической трубе постоянного сечения будет также равномерным.

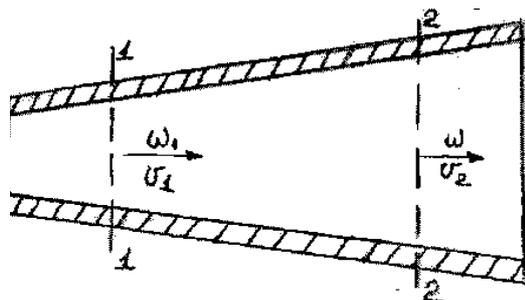


Рис. 4.1

Неравномерное движение можно наблюдать в конической трубе, в которой по длине меняются поперечные сечения потока и, следовательно, скорости, давления и глубины.

В зависимости от причин и общих условий, при которых происходит движение, различают напорное и безнапорное движение. **Напорным движением** называют движение жидкости в потоке без свободной поверхности; оно обычно наблюдается в закрытых трубопроводах или иных гидравлических системах. При напорном движении

жидкость полностью заполняет поперечное сечение, образуемое ограничивающими поток твёрдыми стенками. Напорное движение происходит в силу наличия разности напоров по длине потока, создаваемой, например, водонапорной башней, питающим баком самотечной топливной системы, насосом, включенным в сеть, и т.д.

. Движение, когда поток не со всех сторон ограничен твёрдыми стенками, а имеет свободную поверхность, называется **безнапорным**, или движением со свободной поверхностью. В большинстве случаев свободная поверхность соприкасается с атмосферой, а потому при безнапорном движении давление на поверхности потока почти всегда равно атмосферному. Причиной безнапорного движения является действие силы тяжести. На рис. 4.3. показан бензопровод, соединяющий бензобак с поплавковой камерой карбюратора. Движение жидкости в таком бензопроводе напорное.

Линия тока и её направление.

При решении многих задач практической гидродинамики делается предположение о том, что поток движущейся жидкости состоит из отдельных элементарных струек, не меняющих своей формы (Рис.4.3.)

Таким образом, поток мысленно разбивается на ряд элементарных струек-трубок, как это схематически показано на рис. 4.2., и будет рассматриваться нами как

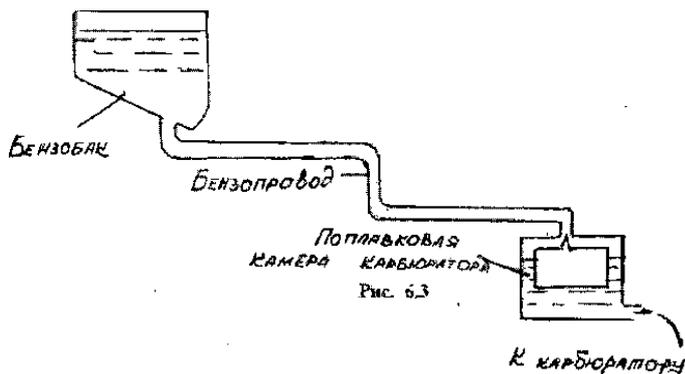


Рис. 4.2

совокупность движущихся элементарных струек. Дадим определение понятию элементарной струйки и приведем её свойства.

Рассмотрим поток жидкости, находящейся в установившемся движении (рис. 4.3). Возьмем в этом потоке точку 1 и построим в ней век-

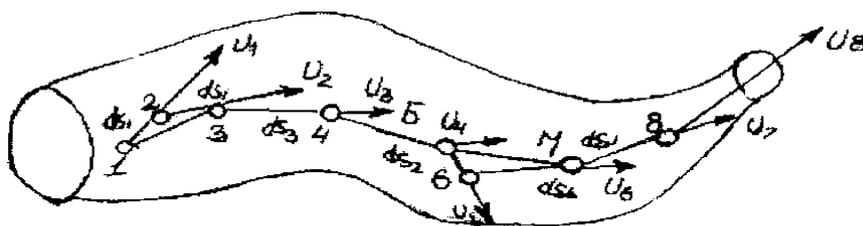


Рис.4.3.

тор скорости u_1 , выражающий её по величине и направлению. На этом векторе возьмем точку 2 на бесконечно малом расстоянии ds_1 от точки 1. В точке 2 построим вектор скорости u_2 ,

на котором возьмем точку 3 на бесконечно малом расстоянии ds_2 от точки 2 и т.д. Если мы расстояния между точками ds_1 , ds_2 и т.д. будем уменьшать до нуля, то вместо ломаной линии 1-2-3-4-5-6-7-8 в пределе получим кривую, начинающуюся в точке 1 и называемую линией тока. *Линией тока* называется линия, в каждой точке которой в данное мгновение вектор скорости жидкости совпадает с направлением касательной к этой линии. При установившемся движении линии тока совпадают с траекториями частиц жидкости. При этом частица жидкости перемещается по линии тока. Поэтому в установившемся движении линии тока совпадают с траекториями движущихся частиц.

Построим вокруг точки 1 замкнутый контур, образующий бесконечно малую площадку dw , а через все точки контура проведем линии тока (рис. 4.4.). Мы получим так называемую трубку тока. Если через все точки бесконечно малой площадки dw мы проведем линии тока, то получим элементарную струйку, заполненную «пучком» линий тока.

На основании всего изложенного принимается, что элементарная струйка обладает следующими свойствами:

1. Форма элементарной струйки остаётся неизменной с течением времени, т.к. вид линий тока, из которых состоит струйка, в установившемся движении во времени не меняется.

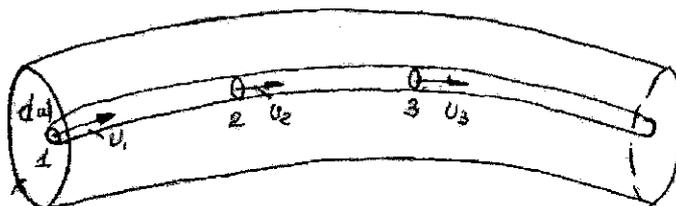


Рис. 4.4

2. Поверхность элементарной струйки, образованная линиями тока, является как бы непроницаемой для частиц жидкости, движущихся в соседних струйках. Частицы жидкости из соседних струек, скользя по поверхности струйки, не могут проникнуть внутрь неё.

3. Вследствие малости поперечного сечения элементарной струйки скорости во всех точках её поперечного сечения являются одинаковыми.

4. Поток жидкости, состоящий из элементарных струек, обладающих перечисленными выше свойствами, иногда называют «струйной моделью движения жидкости». Такой поток может быть, например, представлен движением жидкости в модели, состоящей из трубы, заполненной тонкими стеклянными трубками.

4.1. Основные задачи гидродинамики.

Гидродинамикой называется раздел гидравлики, в котором изучаются законы движения жидкости. Движение жидкости по сравнению с движением твёрдого тела отличается значительно большей сложностью. Если в случае покоя состояние жидкости характеризовалось величиной одного лишь гидростатического давления, то состояние жидкости в движении определяется наравне с давлением также скоростью жидких частиц. В общем случае значения давления и скорости, различные в разных точках пространства, могут изменяться ещё в зависимости от времени.

Ввиду большого числа переменных величин, определяющих движение жидкости, сложности наблюдаемых при этом явлений и трудности математического исследования,

действительное движение жидкости обычно схематизируется и заменяется некоторой условной, упрощенной схемой, расчленяющей движение на отдельные составные части. Такой схемой, лежащей в основе гидродинамики и логически наиболее хорошо отвечающей естественным представлениям о движении жидкости, является схема (струйчатая модель движения жидкости), рассматривающая поток жидкости состоящим из отдельных элементарных струек.

4.3. Основные гидравлические элементы потока.

При изучении потоков жидкости вводится ряд понятий, характеризующих потоки с гидравлической и геометрической точек зрения. Такими понятиями являются: площадь живого сечения потока, смоченный периметр и гидравлический радиус.

Площадь живого сечения, или, короче, **живым сечением потока**, называется площадь сечения потока, проведённая нормально к направлению линий тока, т.е. нормально к направлению скоростей элементарных струек; будем обозначать эту площадь через F . В ряде случаев живые сечения, строго говоря, являются криволинейными. Так, например, при движении жидкости в конические расходящейся трубе (рис. 4.5), когда поток состоит из ряда расходящихся элементарных струек, живое сечение представляет собой криволинейную поверхность AB . Однако, если расхождение струек невелико (движение жидкости в этом случае называется медленно-изменяющимся), то практически под живым сечением обычно понимают плоское сечение потока, нормальное к общему направлению движения жидкости, т.е., например, в рассматриваемом случае конической трубы сечение $A_1 B_1$ нормальное к оси трубы.

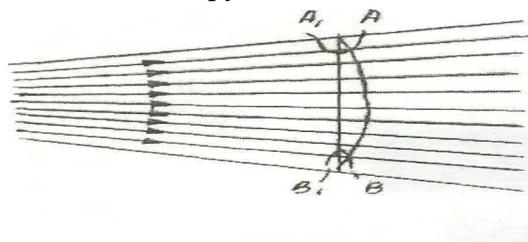


Рис. 4.5

Живое сечение может быть ограничено твёрдыми стенками полностью или частично (во втором случае часть живого сечения ограничивается открытой поверхностью жидкости). Если стенки ограничивают поток полностью, движение жидкости называется напорным; если же ограничение частичное, движение называется безнапорным. Безнапорное же движение характеризуется постоянным давлением на свободной поверхности, обычно равным атмосферному.

Примером напорного движения является движение жидкости в трубопроводе, например, при истечении из водонапорного бака; примером безнапорного движения может служить движение жидкости в открытых каналах и реках.

Длину части периметра живого сечения, по которой поток соприкасается с ограничивающими его стенками, называют **смоченным периметром**; будем обозначать, его через Λ . При напорном движении жидкости геометрический и смоченный периметр совпадают, по величине.

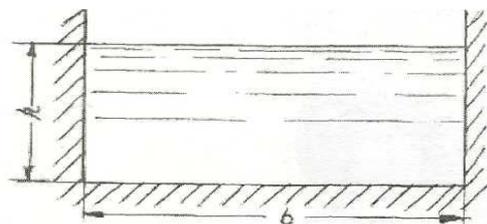


Рис.4.6.

В случае же безнапорного движения жидкости смоченный периметр будет отличен от геометрического, т.к. линия, по которой жидкость соприкасается с воздухом, в длину смоченного периметра не входит; т.к. в случае канала, изображенного на рис. 4.6, смоченный периметр $A = b + 2h$, геометрический же периметр равен $2b + 2h$.

Отношение площади живого сечения к смоченному периметру $R = F/A$ называют гидравлическим радиусом сечения.

4.4. Уравнение неразрывности (сплошности) потока.

Установим общую зависимость между скоростями в потоке жидкости, для которого соблюдается условие *сплошности*, или *неразрывности движения*, т.е. не образуется пустот, не заполненных жидкостью.

Выделим (рис. 4.9) внутри потока элементарный параллелепипед объёмом $dV = dx dy dz$, ребра которого ориентированы параллельно осям координат. Пусть составляющая скорости потока вдоль оси x в точках, лежащих на левой грани параллелепипеда площадью $dS = dy dz$, равна w_x . Тогда, согласно уравнению $V_{сек} = w_x S$, через эту грань в параллелепипед войдет вдоль оси x за единицу времени масса жидкости $\rho w_x dy dz$, а за промежуток времени $d\tau$ - масса жидкости:

$$M_x = \rho w_x dy dz d\tau$$

где ρ - плотность жидкости на левой грани параллелепипеда. На противоположной (правой) грани параллелепипеда скорость и плотность жидкости могут отличаться от соответствующих величин на левой грани и будут равны $\left(w_x + \frac{\partial w_x}{\partial x} dx \right) \rho \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} dx \right)$.

Тогда через правую грань параллелепипеда за то же время $d\tau$ выйдет масса жидкости:

$$M_{x+dx} = \left(\rho w_x + \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} dx \right) dy dz d\tau$$

Приращение массы жидкости в параллелепипеде вдоль оси x :

$$dM_x = M_x - M_{x+dx} = \left(-\frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} dx \right) dx dy dz d\tau$$

Если составляющие скорости вдоль осей y и z равны w_y , и w_z - соответственно, то приращения массы в элементарном объёме вдоль этих осей:

$$dM_z = \left(-\frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} dz \right) dx dy dz d\tau$$

$$dM_y = \left(-\frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} dy \right) dy dz dx d\tau$$

Общее накопление массы жидкости в параллелепипеде за время $d\tau$ равно сумме её приращений вдоль всех осей координат:

$$dM = \left[\frac{\partial(pw_x)}{\partial x} + \frac{\partial(pw_y)}{\partial y} + \frac{\partial(pw_z)}{\partial z} \right] dx dy dz d\tau.$$

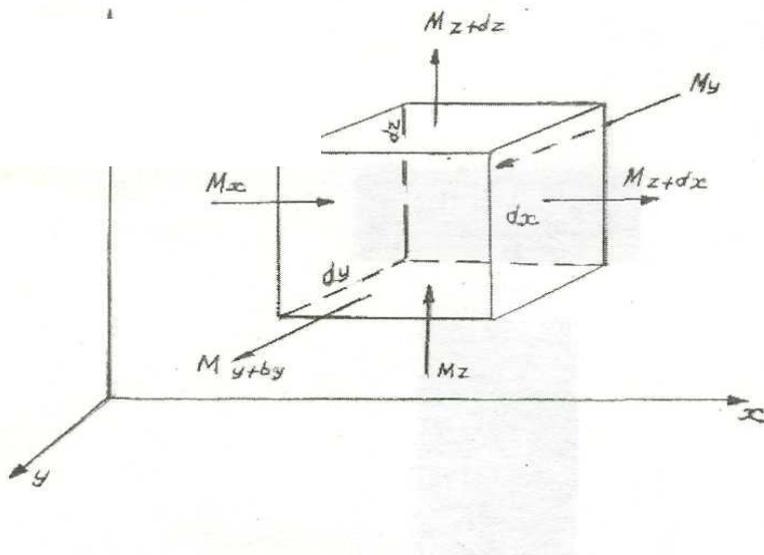


Рис. 4.9.

К выводу дифференциального уравнения неразрывности потока.

Вместе с тем изменение массы в полностью заполненном жидкостью объёме параллелепипеда возможно только вследствие изменения плотности в этом объёме. Поэтому:

$$dM = \frac{\partial p}{\partial \tau} dx dy dz d\tau$$

Приравнявая оба выражения dM , сокращая на $(-dx dy dz)$ и перенося $\frac{\partial p}{\partial \tau}$ в левую часть уравнения, окончательно получим:

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial(pw_x)}{\partial x} + \frac{\partial(pw_y)}{\partial y} + \frac{\partial(pw_z)}{\partial z} = 0$$

Это уравнение представляет собой дифференциальное уравнение неразрывности потока для неустановившегося движения сжимаемой жидкости.

4.5 Уравнение Эйлера для движения идеальной жидкости.

Рассмотрим установившийся поток идеальной жидкости, движущейся без трения. Выделим в потоке элементарный параллелепипед объёмом $dV = dx dy dz$, ориентированный относительно осей координат.

Проекции на оси координат сил тяжести и давления, действующих на параллелепипед, составляют соответственно:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz, \quad -\frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz, \quad -(pg + \frac{\partial p}{\partial z}) dx dy dz$$

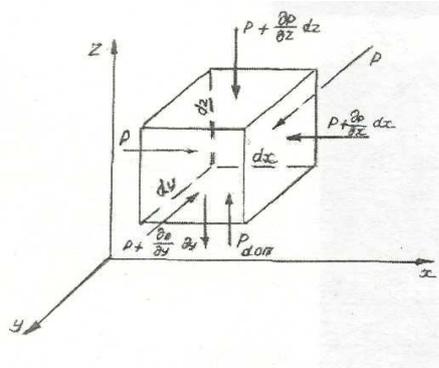


Рис. 4.10.

К выводу дифференциальных уравнений равновесия Эйлера.

Масса жидкости в объёме параллелепипеда: $dm = \rho dx dy dz$

Согласно основному принципу динамики, сумма проекций сил, действующих на движущийся элементарный объём жидкости, равна произведению массы жидкости на её ускорение.

Если жидкость движется со скоростью w , то её ускорение равно $\frac{\partial w}{\partial \tau}$, а проекция ускорения на оси координат:

$$\frac{\partial w_x}{\partial \tau}; \quad \frac{\partial w_y}{\partial \tau}; \quad \frac{\partial w_z}{\partial \tau},$$

где w_x, w_y, w_z - составляющие скорости вдоль осей x, y и z .

В соответствии с основным принципом динамики:

$$\begin{aligned} \rho dx dy dz \frac{\partial w_x}{\partial \tau} &= -\frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz \\ \rho dx dy dz \frac{\partial w_y}{\partial \tau} &= -\frac{\partial p}{\partial y} dx dy dz \\ \rho dx dy dz \frac{\partial w_z}{\partial \tau} &= -(-pg - \frac{\partial p}{\partial z}) dx dy dz \end{aligned}$$

или после сокращения:

$$\rho \frac{\partial w_x}{\partial \tau} = -\frac{\partial p}{\partial x}; \quad \frac{\partial w_y}{\partial \tau} = -\frac{\partial p}{\partial y}; \quad \frac{\partial w_z}{\partial \tau} = -(-pg - \frac{\partial p}{\partial z}), \quad (4-1)$$

;

где, согласно уравнению

$$\frac{du}{d\tau} = \frac{\partial u}{\partial x} w_x + \frac{\partial u}{\partial y} w_y + \frac{\partial u}{\partial z} w_z$$

Субстанциональные производные соответствующих составляющих

скорости равны:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dw_x}{d} &= \frac{\partial w_x}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_x}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_x}{\partial z} w_z \\ \frac{dw_y}{d\tau} &= \frac{\partial w_y}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_y}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_y}{\partial z} w_z \\ \frac{dw_z}{d\tau} &= \frac{\partial w_z}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_z}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_z}{\partial z} w_z \end{aligned} \right\} \quad (4-2)$$

Система уравнений (4-1), с учетом выражений (4-2), представляет собой дифференциальные уравнения движения идеальной жидкости Эйлера для установившегося потока.

При неустановившемся движении скорость жидкости изменяется не только при перемещении частицы потока из одной точки пространства в другую, но и с течением времени в каждой точке. Поэтому, в соответствии с уравнением $\frac{du}{d\tau} = \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{\partial u}{\partial x} w_x + \frac{\partial u}{\partial y} w_y + \frac{\partial u}{\partial z} w_z$ составляющие ускорения в уравнении (4-1), выражаемые субстанциональными производными для неустановившихся условий, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dw_x}{d} &= \frac{\partial w_x}{\partial \tau} + \frac{\partial w_x}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_x}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_x}{\partial z} w_z \\ \frac{dw_y}{d\tau} &= \frac{\partial w_y}{\partial \tau} + \frac{\partial w_y}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_y}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_y}{\partial z} w_z \\ \frac{dw_z}{d\tau} &= \frac{\partial w_z}{\partial \tau} + \frac{\partial w_z}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_z}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_z}{\partial z} w_z \end{aligned} \right\} \quad (4-2, a)$$

Система уравнений (4-1), с учётом выражений (4-2, а) представляет собой дифференциальные уравнения движения идеальной жидкости Эйлера для неустановившегося потока.

Контрольные вопросы:

1. Перечислите основные гидравлические элементы потока.
2. Дайте определения: линия тока элементарной струйки и поток жидкости.
3. Определение живого сечения.
4. Объясните расход жидкости и среднюю скорость жидкости.
5. Сформулируете уравнение неразрывности.

Опорные слова: кинематика и динамика жидкости, основные задачи гидродинамики линия тока и её направление, основные гидравлические элементы потока, уравнение Эйлера для движения идеальной жидкости.

Лекция 5
Закономерности движения реальных жидкостей
Технология обучения на лекцию №5

Время - 2 час	Количества студентов: 20-30 чел
Форма учебного занятия	Введение, визуальная лекция
План учебного занятия	<ol style="list-style-type: none"> 1. Закономерности движения реальных жидкостей <ol style="list-style-type: none"> а) уравнение Бернулли для элементарной струйки реальной жидкости. б) уравнение Бернулли для потока реальной жидкости 2. Геометрические и физические смысл уравнения Бернулли. 3. Понятие о гидравлических и пьезометрических наклонах. 4. Уравнение Навье – Стокса для движения реальной жидкости. 5. Методы и приборы измерения скоростей и расходов жидкости.
<p><i>Цель учебного занятия:</i> ознакомить студентов с закономерностями движения реальных жидкостей, с методами и приборами измерения скоростей и расходов жидкости, с трубчатым водомером, с водомерной шайбой (диафрагмой), с трубкой Прандтля; научить составлять уравнение Бернулли для элементарной струйки, а также уравнение Бернулли для потока реальной жидкости.</p>	
<p><i>Задачи преподавателя:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • ознакомить с свойствами реальной жидкости; • ознакомить с уравнением Навье-Стокса для движения реальной жидкости; • ознакомить с уравнением Бернулли для реальной жидкости. • ознакомить методами 	<p><i>Результаты учебной деятельности:</i></p> <p>Студент должен узнать:</p> <ul style="list-style-type: none"> - с свойствами реальной жидкости; - уравнения Навье-Стокса для движения реальной жидкости; - уравнение Бернулли для потока реальной жидкости; - гидравлические и пьезометрические уклоны; - объёмный способ измерения; - весовой способ измерения, трубка Пито;
Средства обучения	Лазерный проектор, визуальные материалы, информационное обеспечение.
Формы обучения	Коллективная, фронтальная работа, работа в парах. Графорганазеры
Условия обучения	Аудитория, приспособленная для работы с ТСО.

Технологическая карта лекции (5-е занятие)

Этапы, время	Деятельность	
	Преподавателя	студентов
1 этап. Введение (10 мин.)	1.1. Сообщает, тему, цель, планируемые результаты учебного занятия и план его проведения.	1.1. Слушают, записывают.
2 этап. Основной (60 мин.)	<p>2.1. С целью актуализировать знания студентов задает фокусирующие вопросы: – Что такое реальная жидкость? – Что такое элементарная струйка? – Дифференциальное уравнение равновесия? Для ответа на вопросы организует работу в парах. Проводит блиц-опрос.</p> <p>2.3. Последовательно излагает материал лекции по вопросам плана, использует визуальные материалы. Показывает приборы водомерная шайба и трубка Пито объясняет их работу.</p> <p>Акцентирует внимание на ключевых моментах темы, предлагает их записать</p>	<p>2.1. Слушают. По очереди отвечают на вопросы. Слушают правильный ответ.</p> <p>2.3. Обсуждают содержание схем и таблиц, визуальные материалы, уточняют, задают вопросы. Записывают главное.</p>
3- этап. Заключительная (10 мин.)	<p>3.1. Проводит блиц-опрос. Делает итоговое заключение. Дает задание для самостоятельной работы.</p> <p>3.2 Сотавить кластер на слово «Реальная жидкость». Ставить оценки.</p>	<p>3.1. Отвечают на вопрос.</p> <p>3.2. Слушают, записывают.</p>

5.1. Уравнение Бернулли для элементарной струйки реальной жидкости.

Если вместо идеальной жидкости рассматривать жидкость реальную (в которой при движении возникают касательные напряжения), то уравнение Бернулли должно будет существенным образом измениться. В то время как в первом случае полная энергия жидкости, или напор H , сохраняют постоянное значение по длине струйки, при движении реальной жидкости эта энергия будет убывать по направлению движения. Причиной этого являются затраты энергии на преодоление сопротивлений движению, обусловленные внутренним трением в вязкой жидкости. Поэтому для струйки реальной жидкости напор H_1 в сечении 1:

$$H_1 = z_1 + \frac{\rho_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g}$$

будет всегда больше, чем напор H_2 в следующем за ним на некотором расстоянии сечении 2:

$$H_2 = z_2 + \frac{\rho_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

на величину указанных потерь энергии, и уравнение Бернулли в силу этого получает вид:

$$z_1 + \frac{\rho_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{\rho_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{1-2} \quad (5.1)$$

Подобно тому, как три члена левой части этого уравнения и три первых члена правой его части представляют собой соответственные полные энергии жидкости в сечениях 1 и 2, точно так же и величина h_{1-2} является мерой энергии, потерянной единицей веса жидкости на преодоление сопротивлений при её движении между указанными сечениями. Эту потерю удельной энергии жидкости называют потерей напора между сечениями 1 и 2.

Поскольку в случае реальной жидкости полный напор вдоль струйки непостоянен, а убывает по направлению движения, его значения по длине струйки изображаются не горизонтальной прямой, как в предыдущем случае, а некоторой кривой $b-b$ (рис. 5.1); в частном случае струйки постоянного сечения напора по длине струйки будет пропорциональна расстоянию от начального сечения и изменение полного напора изобразится как наклонная прямая.

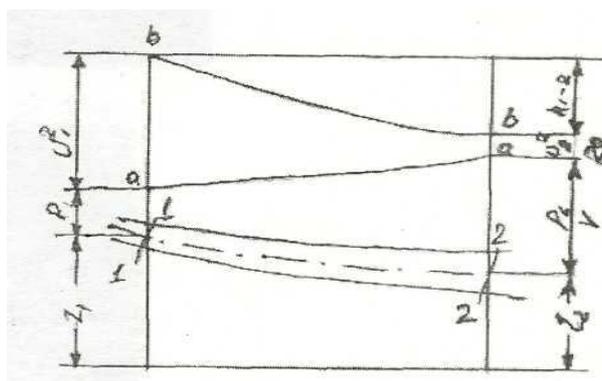


Рис 5.1

Для характеристики относительного изменения полного напора на единицу длины струйки вводится понятие о так называемом гидравлическом уклоне. Аналитически гидравлический уклон представляет собой производную от потери напора по соответствующему расстоянию, отсчитываемому от начального сечения по оси струйки:

$$i = \frac{dh_{1-2}}{dL} \quad (5-2)$$

Гидравлический уклон не имеет размерности, это - отвлечённая, безмерная величина.

Среднее значение гидравлического уклона на участке элементарной струйки между сечениями 1 и 2 определяется как величина потери напора на единицу длины струйки:

$$i_{cp} = \frac{h_{1-2}}{L_{1-2}} = \frac{\left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \right)}{L_{1-2}} \quad (5-2)$$

где L_{1-2} — расстояние между сечениями 1 -2.

5.2. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости.

Исходя из уравнения (5.1)

$$z_1 + \frac{\rho_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{\rho_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{1-2} \quad (5-3)$$

умножим все члены этого уравнения на γq (весовой расход жидкости):

$$\gamma q \frac{v_2^2}{2g} + \gamma q \left(z_2 + \frac{\rho_2}{\gamma} \right) + \gamma q h_{1-2} = \gamma q \frac{v_1^2}{2g} + \gamma q \left(z_1 + \frac{\rho_1}{\gamma} \right)$$

Подобные выражения можно составить для всех отдельных струек. Просуммировав их, будем иметь:

$$\sum \gamma q \frac{v_2^2}{2g} + \sum \gamma q \left(z_2 + \frac{\rho_2}{\gamma} \right) + \sum \gamma q h_{1-2} = \sum \gamma q \frac{v_1^2}{2g} + \sum \gamma q \left(z_1 + \frac{\rho_1}{\gamma} \right) \quad (5-4)$$

Рассмотрим каждый из членов этого уравнения в отдельности. Выражения:

$$\sum \gamma q \frac{v_2^2}{2g} = \frac{\gamma}{2g} \sum q v_2^2$$

$$\sum \gamma q \frac{v_1^2}{2g} = \frac{\gamma}{2g} \sum q v_1^2$$

представляют, значения кинетической энергии (живой силы) массы жидкости, протекающей в единицу времени через поперечные сечения протока 2 и 1.

Для практических целей оказывается удобным эти выражения заменить через кинетическую энергию потока, подсчитываемую по средней для всего потока скорости v_{cp} , т.е. представить в виде:

$$\gamma Q \frac{v_{cp2}^2}{2g} \quad \gamma Q \frac{v_{cp1}^2}{2g}$$

Однако

$$\frac{\gamma}{2g} \sum q v^2 \neq \gamma Q \frac{v_{cp}^2}{2g}.$$

Объясняется это тем, что величина $\sum q v^2$ представляет собой арифметическую сумму произведений расходов отдельных элементарных струек q на квадраты их действительных скоростей v^2 . в то время как $Q v_{cp}^2$ есть произведение суммарного расхода потока ($Q = \sum q$) на квадрат средней скорости потока v_{cp}^2 , представляющий среднее арифметическое из величин v в первой степени ($v_{cp} = \frac{\sum v}{n}$, где n — число струек).

Поэтому для того, чтобы произведенная замена не внесла изменений в величину кинетической энергии потока, в выражение $\gamma Q \frac{v_{cp}^2}{2g}$ необходимо внести некоторый

поправочный коэффициент, называемый коэффициентом Кориолиса и обозначаемый через α . Таким образом, коэффициент Кориолиса представляет собой отношение действительной кинетической энергии жидкости, протекающей через поперечное сечение потока в единицу времени, к кинетической энергии, которая имела бы место при том же расходе, если бы все частицы жидкости обладали одинаковыми скоростями, равными средней скорости, т.е.:

$$\alpha = \frac{\sum q v^2}{Q \cdot v_{cp}^2}$$

С учётом того, что $q = v \Delta F$ и $Q = v_{cp} F$, последнее выражение можно представить также и в следующем виде:

$$\alpha = \frac{\sum v^2 \Delta F}{v_{cp}^2 F}$$

Обычно коэффициент Кориолиса определяется опытным путём. Он зависит от степени неравномерности распределения скоростей в поперечном сечении потока и всегда больше единицы; для так называемого ламинарного режима в цилиндрической трубе $\alpha = 1$. А для так называемого турбулентного режима $\alpha = 1,045 \div 1,10$.

Рассмотрим теперь выражение второго члена уравнения (5-4), представляющего собой потенциальную энергию потока.

При медленно изменяющемся движении, которое главным образом и рассматривается в гидравлике, распределение давлений в живых сечениях потока подчиняется основному закону гидростатики. Поэтому можно принять, что величина $z + \frac{p}{\gamma}$ во всех точках сечения такого потока будет одинакова и, следовательно,

$$\sum \gamma q \left(z + \frac{p}{\gamma} \right) = \gamma \left(z + \frac{p}{\gamma} \right) \sum q = \gamma Q \left(z + \frac{p}{\gamma} \right)$$

Третий член уравнения (5-4), выражающий сумму работ сил сопротивлений можно представить (подразумевая под h_{1-2} осредненное значение потерь напора) в виде:

$$\sum \gamma h_{1-2} q = \gamma h_{1-2} Q$$

Подставляя полученные выражения в уравнение (5-4), будем иметь:

$$\gamma Q \frac{\alpha_2 v_{cp2}^2}{2g} + \gamma Q \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right) + \gamma h_{1-2} Q = \gamma Q \frac{\alpha_1 v_{cp1}^2}{2g} + \gamma Q \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right)$$

или после сокращения на γQ и перегруппировки слагаемых:

$$\left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right) + \alpha_1 \frac{v_{cp1}^2}{2g} = \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right) + \alpha_2 \frac{v_{cp2}^2}{2g} + h_{1-2} \quad (6-5)$$

При практических расчётах коэффициентом α часто пренебрегают и считают его равным единице, тем самым, полагая, что вес струйки как бы движется с одной и той же средней скоростью. Опустим индексы «*ср*» при v_{cp} , подразумевая везде, что речь идет о

средних значениях этой величины. Тогда форма записи уравнения Бернулли для целого потока становится идентичной его записи для элементарной струйки:

$$\left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right) + \frac{v_{cp1}^2}{2g} = \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right) + \frac{v_{cp2}^2}{2g} + h_{1-2} \quad (5-6)$$

В таком виде уравнение Бернулли обычно применяется при решении практических задач для потоков однородной несжимаемой жидкости при установившемся движении, происходящем под действием одной силы тяжести.

5.3. Методы и приборы измерения скоростей и расходов жидкости.

Наиболее простыми и вместе с тем точными способами измерения расхода жидкости являются объёмный и весовой способы.

При объёмном способе измерения протекающая в исследуемом потоке (например, в трубе) жидкость поступает в особый, тщательно протарированный сосуд (так называемый мерник), время заполнения которого точно фиксируется по секундомеру. Если объём мерника - V , а измеренное время его наполнения - T , объёмный расход будет равен:

$$Q = V/T$$

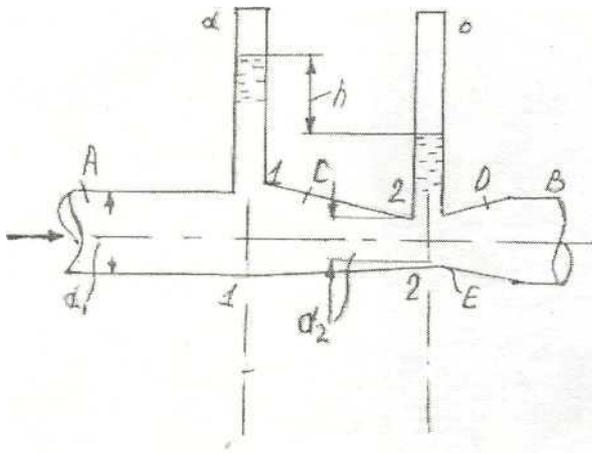
При весовом способе взвешиванием на весах находят вес G_v всей жидкости, поступившей в мерник за время T , определяют весовой расход:

$$G = \frac{G_v}{T}$$

и по нему, зная удельный вес жидкости γ , вычисляют объёмный расход:

$$Q = \frac{G}{\gamma}$$

Однако объёмный или весовой способы пригодны лишь при сравнительно небольших значениях расхода жидкости, т.к. в противном случае размеры мерников получаются громоздкими и замеры затруднительными; кроме того, этими способами невозможно измерить расход в произвольном сечении. Например, длинного трубопровода или канала без нарушения целостности последних. Поэтому, за исключением случаев измерений сравнительно небольших расходов жидкостей в коротких трубах и каналах, объёмный или весовой способы, как правило, не применяются, а в практике пользуются специальными приборами, которые предварительно тарируются объёмным или весовым способом. Одним из таких основных приборов является *трубчатый водомер*, или водомер Вентури. Большим достоинством этого водомера является простота конструкции и отсутствие в нем каких-либо движущихся частей.



Трубчатые водомеры могут быть горизонтальными и вертикальными; рассмотрим водомер с горизонтальной осью, представленный на рис. 5.2. Он состоит из двух цилиндрических труб *A* и *B*, соединенных при помощи конических участков (патрубков) *C* и *D* с цилиндрической вставкой *E* меньшего диаметра. В сечениях 1 и 2 водомера присоединены пьезометрические трубки *a* и *b*, разность уровней жидкости *h* которых показывает разность давлений в этих сечениях.

Составляя уравнение Бернулли для сечений 1 и 2, получим, пренебрегая очень небольшими на малой длине между этими сечениями потерями,

$$\frac{\rho_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{\rho_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

откуда

$$\frac{\rho_1}{\gamma} - \frac{\rho_2}{\gamma} = \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g}.$$

Но

$$\frac{\rho_1}{\gamma} - \frac{\rho_2}{\gamma} = h,$$

следовательно,

$$h = \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g}.$$

С другой стороны, из уравнения постоянства расхода имеем

$$v_1 F_1 = v_2 F_2$$

Выразим отсюда через v_1 через v_2 :

$$v_1 = v_2 \frac{F_2}{F_1},$$

и подставив это значение в предыдущее уравнение

$$h = \frac{v_2^2}{2g} \left[1 - \left(\frac{F_2}{F_1} \right)^2 \right]$$

определим среднюю скорость в сечении 2:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2gh}{1 - \left(\frac{F_2}{F_1}\right)^2}}.$$

Тогда искомый расход жидкости будет равен:

$$Q = v_2 F_2 = F_2 \sqrt{\frac{2gh}{1 - \left(\frac{F_2}{F_1}\right)^2}}.$$

В действительности ввиду неравномерности распределения скоростей в поперечных сечениях потока, а также за счёт неизбежных потерь напора между рассматриваемыми сечениями, действительный расход жидкости будет несколько отличаться от вычисленного по этой формуле, что учитывается введением в неё поправочного коэффициента m . С учётом этого обстоятельства:

$$Q = m F_2 \sqrt{\frac{2gh}{1 - \left(\frac{F_2}{F_1}\right)^2}}.$$

Величина коэффициента для каждого данного водомера устанавливается опытным путём на основании ряда предварительных измерений расходов при различных скоростях движения жидкости; в этом заключается тарирование водомера.

При практическом определении расхода обычно пользуются формулой:

$$Q = c \sqrt{h},$$

где коэффициент

$$c = m F_2 \sqrt{\frac{2g}{1 - \left(\frac{F_2}{F_1}\right)^2}}$$

называется постоянной водомера и имеет для данного водомера вполне определенное значение.

В большинстве случаев разность давлений в сечениях 1 и 2 трубчатого водомера измеряется при помощи дифференциального манометра, обычно ртутного. Тогда, как это следует из описания дифференциального манометра,

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \left(\frac{\gamma_1}{\gamma} - 1\right) h_1$$

и поэтому в полученные выше формулы вместо h необходимо ввести величину

$$\left(\frac{\gamma_1}{\gamma} - 1\right) h_1,$$

где γ_1 - удельный вес ртути;

h_1 - разность уровней ртути в обоих коленах дифференциального манометра.

При этом для определения расхода соответственно получаем следующую формулу:

$$Q = mF_2 \sqrt{\frac{2g \left(\frac{\gamma_1 - 1}{\gamma} \right)}{1 - \left(\frac{F_2}{F_1} \right)^2}}$$

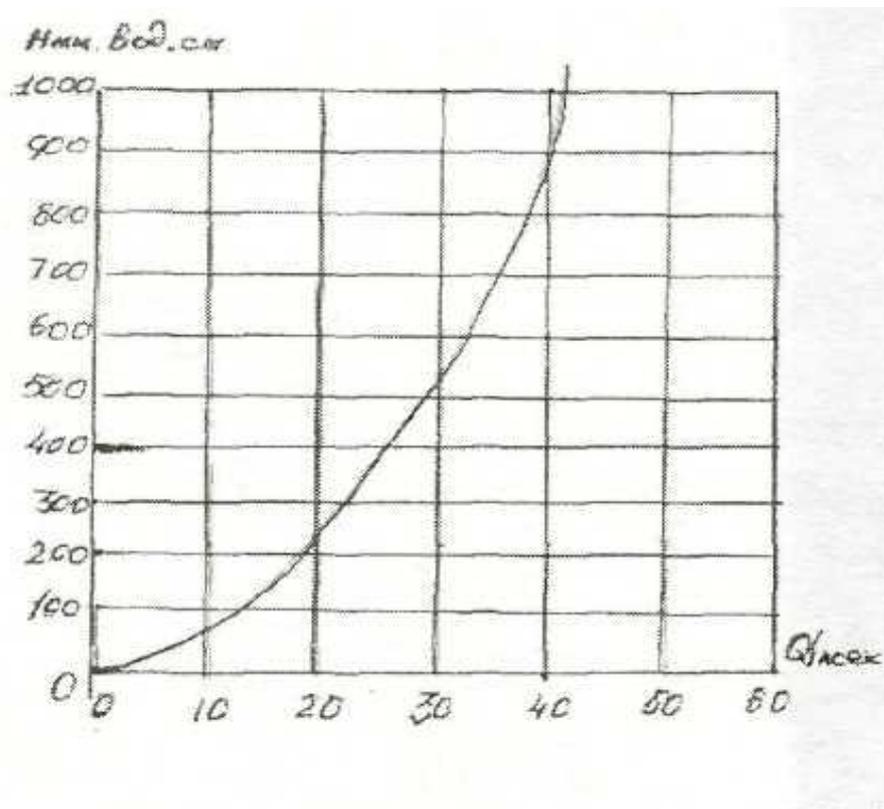
А также

$$Q = c_1 \sqrt{h_1},$$

где постоянная водомера

$$c_1 = mF_2 \sqrt{\frac{2g \left(\frac{\gamma_1 - 1}{\gamma} \right)}{1 - \left(\frac{F_2}{F_1} \right)^2}}$$

Рис. 5.3.



В практике вместо вычисления по формулам расход жидкости часто определяют по так называемым тарировочным кривым, получаемым опытным путем и дающим для данного водомера прямую зависимость между показаниями манометра H измеряемыми расходами жидкости Q . Одна из таких кривых приведена на рис.5.3.

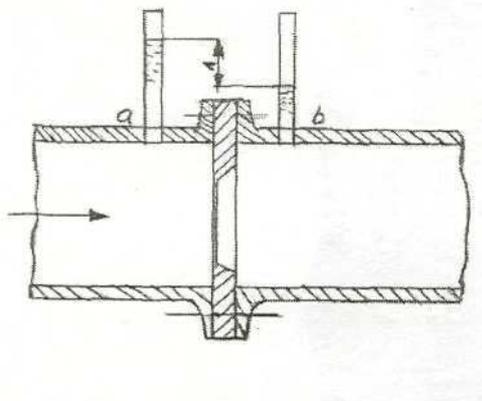


Рис. 5.4

Другим широко распространенным прибором для измерения расхода является **водомерная шайба** (или **диафрагма**), обычно выполняемая в виде плоского кольца с круглым отверстием в центре, устанавливаемого между фланцами трубопровода (рис. 5.4). Края отверстия чаще всего имеют острые входные кромки под углом 45° или же закругляются по форме втекающей в отверстие струи жидкости (сопло). Два пьезометра a и b или дифференциальный манометр служат для измерения перепада давления до и после диафрагмы.

Расход определяется по замеренной разности уровней в трубках пьезометров по формуле, аналогичной формуле водомера

$$Q=c\sqrt{h}.$$

Величина коэффициента c определяется опытным путём для каждого типа диафрагмы в отдельности.

Расходы могут быть вычислены также в результате измерений скоростей течения жидкости и живых сечений потока. Одним из широко распространенных приборов, применяемых для этой цели, является **гидрометрическая вертушка**. Наиболее широкое применение она получила для измерений в естественных потоках (реки) и открытых каналах.

Вертушка (рис. 5.5) состоит из крыльчатки A , представляющей собой колесо с винтовыми лопастями, насаженное на горизонтальный вал C . Будучи установлена в потоке, крыльчатка под действием протекающей жидкости вращается, причём число её оборотов прямо пропорционально скорости течения. От вертушки вверх выводятся провода B , идущие к электрическому звонку, подающему сигнал при каждом замыкании электрической цепи, которое осуществляется через определённое число оборотов особым контактным механизмом, помещаемым в камере C , или же к специальному счётчику, автоматически записывающему число оборотов и время.

Для определения расхода жидкости поступают так: вычерчивают в масштабе живое сечение потока (рис. 5.6) и разбивают его на ряд элементарных сечений $\Delta F_1, \Delta F_2, \dots$, затем вертушкой измеряют скорости v_1, v_2, \dots в центрах тяжести этих сечений c_1, c_2, \dots ; элементарные расходы через эти сечения будут:

$$q_1 = \Delta F_1 v_1, \quad q_2 = \Delta F_2 v_2; \dots$$

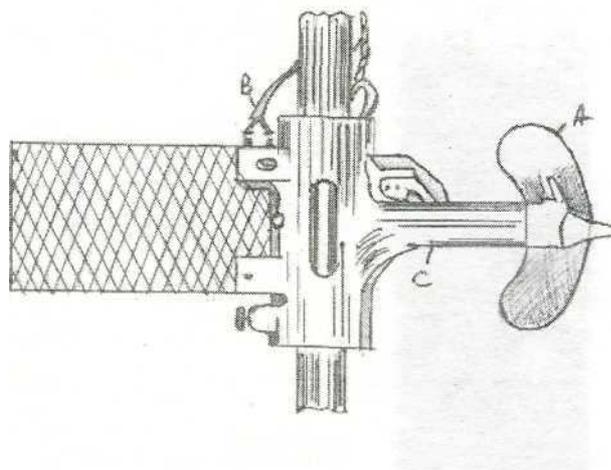
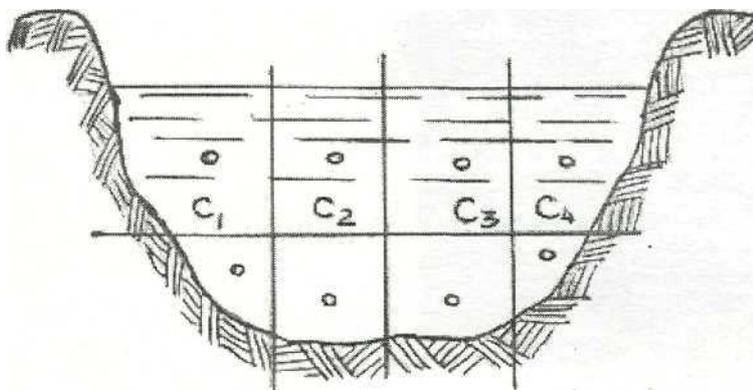


рис. 5.5



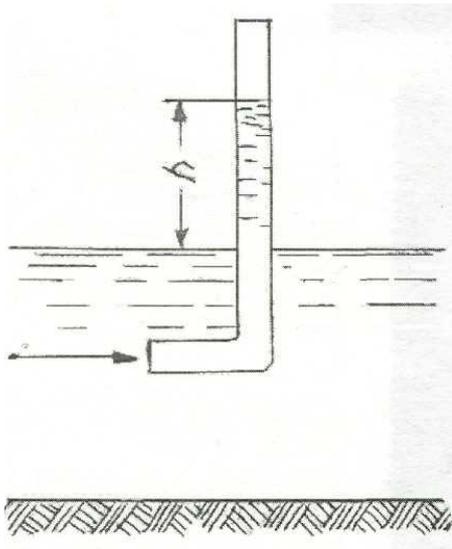


Рис.5.7

Полный расход жидкости находится суммированием элементарных ходов по всему сечению

$$Q = \sum q_i = \Delta F_1 v_1 + \Delta F_2 v_2 + \dots$$

Распространённым прибором для замеров скорости в некоторой точке потока, применяемым как в небольших открытых потоках, главным образом в лабораторной практике, так и при движении в трубах, является **трубка Пито**. В простейшем виде трубка Пито (рис. 5.7) представляет собой изогнутую прямым углом трубку небольшого диаметра, устанавливаемую в потоке открытым нижним концом на встречу течению жидкости; второй, верхний, конец трубки выводится из потока наружу.

Если такую трубку установить в открытом потоке, например, в канале, где на свободной поверхности жидкости давление равно атмосферному, то, как это следует из предыдущего, высота h поднятия жидкости в трубке над поверхностью потока представляет собой величину скоростного $\frac{v^2}{2g}$ напора в точке установки трубы. Таким образом,

$$h = \frac{v^2}{2g}$$

откуда и находится скорость движения жидкости:

$$v = \sqrt{2gh}.$$

Действительная величина скорости ввиду неизбежных потерь напора в самой трубке и некоторого нарушения потока, вызываемого введением в него инородного тела, оказывается несколько больше и определяется по формуле

$$v = a \sqrt{2gh},$$

где a — поправочный коэффициент, определяемый для каждой данной трубки опытным путём.

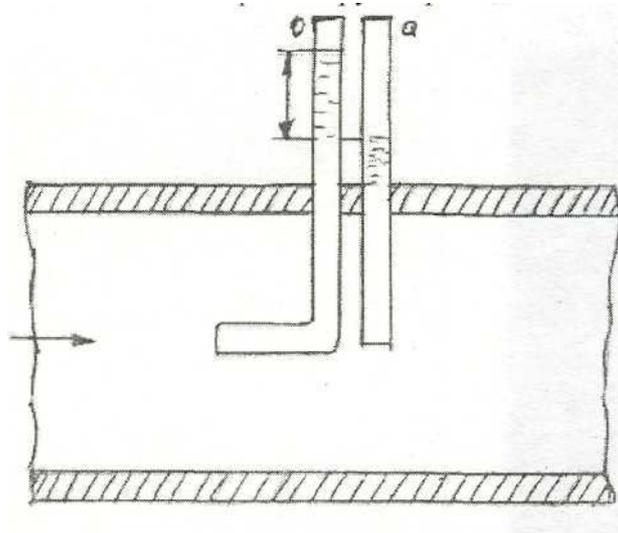


Рис. 5.8

Трубка Прандтля является дальнейшим развитием и усовершенствованием трубки Пито. Она применяется для измерения скорости течения жидкости в напорных трубопроводах. Она состоит из двух трубок (рис. 5.8), одна из которых - a представляет собой обычный

пьезометр, показывающий пьезометрический напор $\frac{p}{\gamma}$. а другая b - $a \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$. Разность

уровней жидкости в обеих трубках h дает величину скоростного напора $\frac{v^2}{2g}$, по которой и определяется скорость.

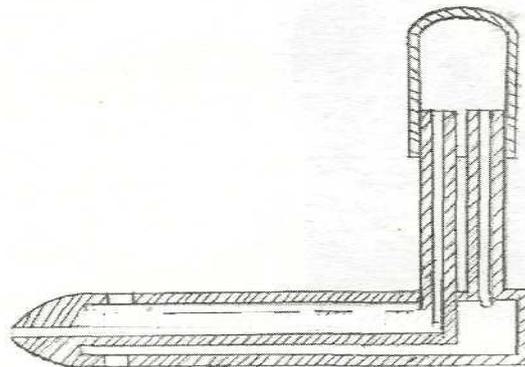


Рис. 5.9

В существующих конструкциях обе трубки обычно совмещаются в один прибор, состоящий в этом случае из двух концентрически расположенных трубок, концы которых присоединяются к дифференциальному манометру (5.9). Центральная внутренняя трубка передаёт в манометр полный напор; внешняя же трубка, имеющая по боковой поверхности вырез или отверстия, передаёт пьезометрический напор. Для уменьшения нарушений потока жидкости возле трубки её оголовку придаётся удобнообтекаемая сферическая

форма. Размеры трубки могут быть сделаны очень малыми - до 0,5 мм в диаметре (шприцевая игла), так что измеряемая ею скорость может быть принята за скорость в данной точке.

Величина скорости движения жидкости в точке установки трубки Прандтля находится по формуле:

$$v = a \sqrt{2gh} \left(\frac{\gamma_1}{\gamma} - 1 \right)$$

где: h — разность уровней в коленах дифференциального манометра;

γ_1 и γ_2 — удельные веса исследуемой жидкости и промежуточной жидкости манометра;

a — поправочный коэффициент, определяемый опытным путем и изменяющийся в пределах от 1 до 1,04, в зависимости от точности изготовления трубки и её размеров.

Помещая трубку Прандтля в различных точках поперечного сечения потока, можно найти распределение скоростей в этом сечении и вычислить затем значение расхода.

Контрольные вопросы:

1. Приведите уравнения Навье - Стокс для движения реальной жидкости.
2. Приведите уравнение Бернулли для элементарной струйки.
3. Приведите уравнение Бернулли для элементарной струйки реальной жидкости.
4. Объясните геометрический смысл уравнения Бернулли.
5. Объясните физический смысл уравнения Бернулли для потока реальной жидкости.
6. Объясните гидравлический и пьезометрический уклон.
7. Способы определения скорости расхода жидкости.
8. Приборы для измерения скорости и расхода жидкости и принцип их работы.

Опорные слова: уравнение Бернулли, водомерная шайба, гидравлический уклон, уравнение Бернулли для потока реальной жидкости, гидрометрическая вертушка, диафрагма, коэффициент Кориолиса, объёмный способ измерения, весовой способ измерения, трубка Пито.

Лекция 6.

Режимы движения жидкостей и основы гидродинамического подобия. Технологическая карта лекции (6-е занятие)

Время - 2 час	Количества студентов: 20-30 чел
Форма учебного занятия	Информационная лекция, совместная учеба и использование графического органайзера таблица "З. З.У".
План учебного занятия	1. Режимы движения жидкостей. 2. Понятие о «гидродинамическом подобии», критерии подобия. 3. Распределение скоростей и расход жидкости при установившемся ламинарном потоке. 4. Турбулентный режим движения жидкости. 5. Пульсация и средняя скорость потока при турбулентном режиме движения жидкости.
Цель учебного занятия: ознакомить студентов с режимами жидкостей, с понятием о «гидродинамическом подобии», критерием подобия, с пульсацией и средней скоростью потока, с распределением скоростей и расходом жидкости при установившемся ламинарном потоке.	
Задачи преподавателя: <ul style="list-style-type: none">• Понятие о «гидродинамическом подобии», критерии подобия;• ознакомиь турбулентный режим движения жидкости;• кратко охарактеризовать пульсацию и среднюю скорость потока при турбулентном режиме движения жидкости.	Результаты учебной деятельности: Студент должен узнать: <ul style="list-style-type: none">- «гидродинамическом подобии», критерии подобия;- Пульсация и средняя скорость потока при турбулентном режиме движения жидкости;- теория смазки в гидродинамике;- критическое число Рейнольдса;
Методы и техники обучения	Лекция, «обучения сообща»; техники: Инсерт, блиц-опрос, презентация, графический органайзер: таблица З/Х/У
Средства обучения	Лазерный проектор, информационное обеспечение, маркеры, скотч, листы бумаги А32
Формы обучения	Фронтальная, индивидуальная работа, работа в группах
Условия обучения	Аудитория, приспособленная для работы в группах, имеющая условия для использования ТСО и информационных технологий

Этапы, время	Деятельность	
	Преподавателя	студентов
1 этап. Введение в учебное занятие (3 мин.)	1.1. Сообщает тему и план лекционного занятия (выводит на экран), напоминает основные вопросы, знакомит с планируемыми учебными результатами занятия и регламентом работы.	1.1. Слушают, записывают.
2 этап. Актуализация знаний (17 мин.)	<p>2.1. Выводит на экран таблицу З/Х/У и комментарий к работе с ней (приложение 2). Дает задание начертить таблицу в рабочих тетрадях и заполнить колонку 2 в соответствии с планом лекции.</p> <p>2.2. Предлагает студентам, пользуясь сделанными ими отметками на полях текста во время его прочтения, ответить на вопросы:</p> <p>(1) Что они уже знают? (т.е. могут самостоятельно рассказать)</p> <p>(2) Что осталось не усвоенным, не понятным?</p> <p>(3) Какая требуется дополнительная информация?, в соответствии с чем, заполнить 3 и 4 колонку таблицы, проставляя номера ключевых понятий (приложение 3).</p> <p>2.3. Проводит блиц-опрос. При этом выслушивает всего несколько ответов и сообщает, что работа будет продолжена в минигруппах.</p>	<p>2.1. Перерисовывают таблицу З/Х/У, вносят во 2-ю колонку таблицы вопросы плана лекции.</p> <p>2.2. Заполняют 3 и 4 колонку таблицы.</p> <p>2.3. Зачитывают результаты.</p>

<p>3 этап. Информационный (55 мин.)</p>	<p>3.1. Разбивает студентов на 4 мини-группы по произвольному признаку и дает задание: (1) проанализировать индивидуальную информацию в колонках 4 таблицы З/Х/У пофрагменту темы, в соответствии с номером группы: 1 группа – по 1 вопросу, 2 группа – по 2 вопросу и т.д.; (2) обобщить неувоенное в 1-2 вопроса; (3) совместно подготовить ответы, используя любые имеющиеся источники (учебник, текст лекции); (4) подготовиться к презентации результатов работы – оформить ответы на листах презентации в виде таблицы З/Х/У по данному вопросу темы. Объявляет о начале работы в группах. 3.2. Организует процесс презентации, обсуждение. 3.3. После изложения ответа каждой группы: (1) задает вопрос на определение уровня усвояемости всей аудитории: «Что мы узнали?», (2) проводит блиц-опрос. 3.4. Обобщает результаты учебной деятельности, предлагает заполнить 5 колонку индивидуальной таблицы З/Х/У.</p>	<p>3.1 Работают в группах: - каждый член группы зачитывает, ключевые понятия из 4 колонки своей индивидуальной таблицы; - лидер группы организует процесс формулирования и записи вопросов 4 колонки; -коллективно обсуждают и находят и записывают ответ в колонке 5 обобщающей таблицы З/Х/У; -оформляют ответ на листе презентации. 3.2. Презентация результатов работы: лидеры групп -прикрепляют к доске лист (Формат не менее А-32) с заполненной таблицей З/Х/У по своему вопросу и комментируют ее; отвечают на вопросы; обосновывают свое мнение. 3.3. Отвечают на вопросы. 3.4. Заполняют (до 2 мин) 5 колонку индивидуальной таблицы З/Х/У.</p>
<p>4 этап. Заключительный (5 мин.)</p>	<p>4.1. Подводит итоги, обобщает результаты, оценивает выступления лидеров, поощряет активных участников. 4.2. Дает задание для самостоятельной работы: написать кластер «Турбулентное движение».</p>	<p>Слушают, записывают.</p>

Приложение 1 (3.1)

Правила работы с применением техники Инсерт

1. Прочитайте текст.
2. Систематизируйте полученную информацию, проставив карандашом пометки на полях:
V – соответствует имеющимся знаниям (информации) о ...;
- (минус) – противоречит имеющимся знаниям о ...;
+ (плюс) – является новой информацией;
? - непонятная/требующая уточнения/дополнения информация.

Приложение 2 (3.1)

Правила работы с применением техники З/Х/У				
1. Прочитайте текст, используя технику Инсерт.				
2. Полученную информацию индивидуально систематизируйте – «разнесите» в колонки таблицы соответственно сделанным в тексте пометкам.				
Таблица З/Х/У (Знаю/Хочу узнать/Узнал(а))				
№	Вопрос темы	Знаю	Хочу узнать	Узнал
1	2	3	4	5
1				
2				
3				
4				

Приложение 3 (3.1) Ключевые понятия

1	Ламинарный режим движения
2	Турбулентный режим движения
3	Число Рейнольдса
4	Геометрическая подобия
5	Критерии подобия
6	Распределение скоростей и расход жидкости
7	Гидродинамическая подобия
8	Распределение скоростей по поперечному сечению
9	Распределения скорости для турбулентного режима движения
10	Пульсация скорости
11	Приравненная скорость
12	Критическое число Рейнольдса

6.1 . Два режима движения вязкой жидкости.

Различные режимы течения жидкости можно проследить, вводя в поток подкрашенную струйку или какой-либо иной индикатор.

Впервые режимы течения жидкости изучались О. Рейнольдсом в 1883г. К сосуду 1, в котором поддерживается постоянный уровень воды, присоединена горизонтальная стеклянная труба 2. В эту трубу по её оси через капиллярную трубку 3 вводится тонкая струйка окрашенной воды (индикатор). При небольшой скорости воды в трубе 2 окрашенная струйка вытягивается в горизонтальную нить, которая, не размываясь, достигает конца трубы

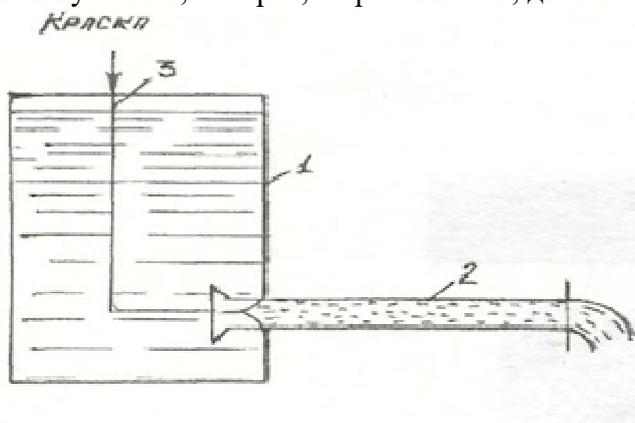


Рис. 6.1. а.

Это свидетельствует о том, что пути частиц прямолинейны и параллельны друг другу.

Такое движение при котором все частицы жидкости движутся по параллельным траекториям, называют ламинарным.

Если скорость воды в трубе 2 увеличивать сверх определенного предела, то окрашенная струйка сначала приобретает волнообразное движение, а затем начинает размываться, смешиваясь с основной массой воды. Это объясняется тем, что отдельные частицы жидкости движутся уже не параллельно друг другу, а перемешиваются в поперечном направлении.

Движение, при котором все частицы жидкости движутся хаотично, называется *турбулентным*.

Опыт показывает, что переход от ламинарного течения к турбулентному происходит тем легче, чем больше массовая скорость жидкости ρw и диаметр трубы d и чем меньше вязкость жидкости μ . Рейнольдс установил, что указанные величины можно объединить в безразмерный комплекс $\omega d \rho / \mu$, численное значение которого позволяет судить о режиме движения жидкости. Этот комплекс носит название *критерия Рейнольдса* (Re):

$$\text{Re} = \frac{\omega d \rho}{\mu} \quad (6-1)$$

Число Re является мерой соотношения между силами вязкости и инерции в движущемся потоке. В самом деле, вероятность нарушения ламинарного режима течения и возникновения хаотического перемещения частиц тем больше, чем меньше вязкость жидкости, препятствующая этому нарушению, и чем больше её плотность, представляющая собой меру инерции отклонившихся от прямолинейного движения частиц. Поэтому при равных скоростях движения различных жидкостей в трубах одинакового диаметра турбулентность возникает тем легче, чем больше плотность ρ и меньше μ , или чем меньше кинематическая вязкость $\nu = \frac{\mu}{\rho}$. Соответственно критерий Рейнольдса можно записать в виде:

$$\text{Re} = \frac{\omega d \rho}{\mu} \quad (6-1, a)$$

Переход от ламинарного движения к турбулентному характеризуется критическим значением $\text{Re}_{кр}$. Так, при движении жидкостей по прямым гладким трубам $\text{Re}_{кр} \approx 2320$. При $\text{Re} < 2320$ течение обычно является ламинарным, поэтому данную область значений Re называют областью устойчивого ламинарного режима течения. При $\text{Re} > 2320$ чаще всего наблюдается турбулентный характер движения. Однако при $2320 < \text{Re} < 10000$ режим течения неустойчиво турбулентный, или переходный (смешанный). Хотя турбулентное движение при таких условиях более вероятно, но иногда при этих значениях Re может наблюдаться и ламинарный поток. Лишь при $\text{Re} > 10000$ турбулентное движение становится устойчивым (развитым).

6.2. Понятие о «гидродинамическом подобии», критерии подобия.

Современная теория моделирования гидравлических машин и гидротехнических сооружений основана на теории гидродинамического подобия. Основной закон динамического подобия, установленный в 1686 г. Ньютоном применительно к движущимся потокам жидкости, может быть сформулирован следующим образом.

В динамически подобных потоках действующие силы в сходственных точках потоков должны находиться в одинаковых соотношениях. Эти соотношения носят в гидравлике наименования числа Ньютона. Два потока считаются геометрически подобными, если между

их линейными размерами L и l , площадями Ω и ω , объёмами W и w , соблюдаются соотношения:

$$\frac{L}{l} = \lambda \quad \frac{\Omega}{\omega} = \lambda^2 \quad \frac{W}{w} = \lambda^3 \quad (6-2)$$

где λ - линейный масштаб моделирования, показывающий, во сколько раз размеры модели уменьшены по сравнению с натурой.

Если потоки геометрически и динамически подобны, то они будут и кинематический подобны, т.е. выполняется условие:

$$\frac{T}{t} = \tau \quad (6-3)$$

где τ - масштаб моделирования времени.

Одним из условий динамического подобия является постоянство отношений между плотностями жидкости в движущихся потоках:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = r \quad (6-4)$$

где: r - масштаб плотности;

ρ_1, ρ_2 - плотности жидкости первого и второго потоков.

Если массу первого потока, имеющего объём W обозначить через M , а массу второго потока, имеющего объём w - через m , то:

$$M = \rho_1 W \quad \text{и} \quad m = \rho_2 w.$$

или на основании (6-2) и (6-4):

$$\frac{M}{m} = \frac{\rho_1 W}{\rho_2 w} = r \lambda \quad (6-5)$$

Если скорость первого потока равна V , а второго - v , то:

$$V = \frac{L}{T} \quad \text{и} \quad v = \frac{l}{t}.$$

Следовательно,

$$\frac{V}{v} = \frac{\frac{L}{T}}{\frac{l}{t}} = \frac{Lt}{lT} = \frac{\lambda}{\tau} \quad (6-6)$$

Если ускорение первого потока U , а второго - u , то:

$$U = \frac{L}{T^2} \quad \text{и} \quad u = \frac{l}{t^2}$$

или

$$\frac{U}{u} = \frac{\frac{L}{T^2}}{\frac{l}{t^2}} = \frac{Lt^2}{T^2l} = \frac{\lambda}{\tau^2} \quad (6-7)$$

Обратимся теперь к моделированию сил, действующих на движущиеся потоки. Запишем:

$$S = MU; \quad s = mu,$$

где S и s - силы, действующие на первый и второй потоки, M и m - массы, $U = \frac{L}{T^2}$ и $u = \frac{l}{t^2}$ - ускорения первого и второго потоков.

Тогда:

$$S = \frac{\rho_1 WL}{T^2} = \frac{\rho_1 WL^2}{T^2 L} = \frac{\rho_1 W V^2}{L}$$

Определим соотношения сил S и s

$$\frac{S}{s} = \frac{\rho_1 W V^2 l}{L \rho_2 w v^2} = \frac{\rho_1 L^2 V^2}{\rho_2 l^2 v^2}$$

$$\frac{W}{w} = \lambda^3 = \frac{L^3}{l^3}$$

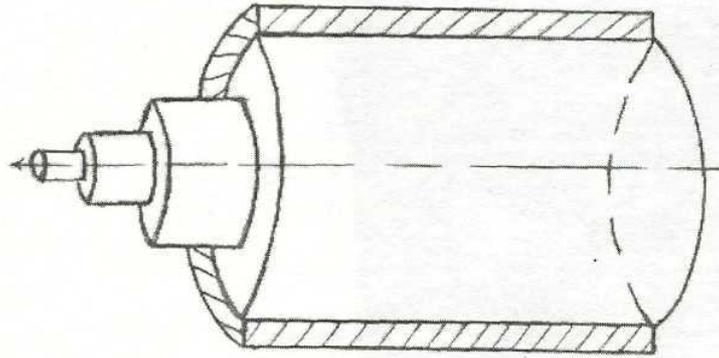
Для динамического подобия необходимо соблюдение следующего условия:

$$\frac{S}{s} = \frac{\rho_1 L^2 V^2}{\rho_2 l^2 v^2} = const \quad (6-8)$$

Равенство (6-8) является математическим выражением основного закона динамического подобия.

6.3. Распределение скоростей и расход жидкости при установившемся ламинарном потоке.

В случае ламинарного движения вязкой жидкости в прямой трубе круглого сечения всю жидкость можно мысленно разбить на ряд кольцевых слоев, соосных с трубой (рис. 6.2, а).



Вследствие действия между слоями сил трения, слои будут двигаться с неодинаковыми скоростями. Центральный цилиндрический слой у оси трубы имеет максимальную скорость, но, по мере удаления от оси, скорость элементарных кольцевых слоев будет уменьшаться. Непосредственно у стенки жидкость как бы «прилипает» к стенке, и её скорость здесь обращается в нуль.

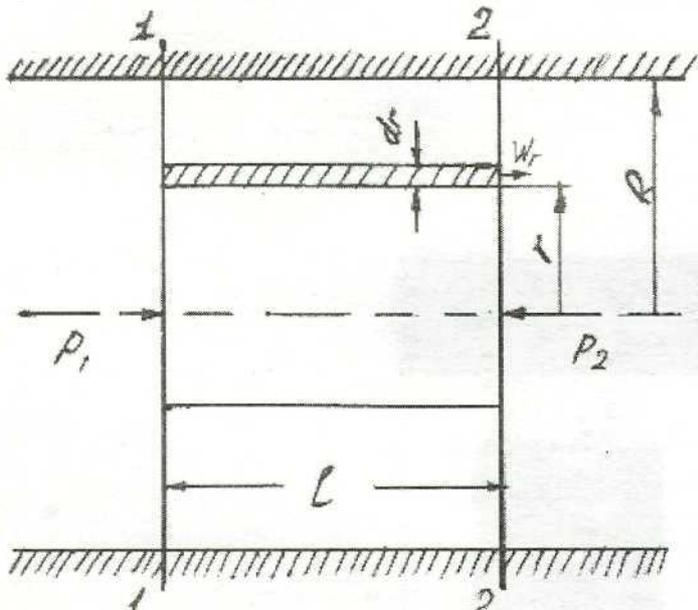


Рис.6.2 б

Выделим в потоке жидкости, ламинарном движущемся по трубе, радиусом r (рис. 6.2, б), цилиндрический слой, длиной l и радиусом r .

Движение слоя происходит под действием разности сил давления P_1 и P_2 с обеих торцовых сторон цилиндра:

$$P_1 - P_2 = (p_1 - p_2) \pi r^2$$

где p_1 и p_2 - гидростатическое давление в сечениях 1-1 и 2-2.

Движению цилиндра оказывает сопротивление сила внутреннего трения T , равная, согласно уравнению:

$$T = \mu F \frac{dw}{dn}$$

где: μ - коэффициент пропорциональности.

$$T = -\mu F \frac{dw_r}{dn}$$

где w_r - скорость движения жидкости вдоль оси цилиндра на расстоянии r от оси; $F = 2\pi r l$ - наружная поверхность цилиндра; μ - вязкость жидкости.

Знак минус указывает на убывание скорости с увеличением радиуса r (при $r = R$ величина $w_r = 0$).

При установившемся движении разность сил давления $P_1 - P_2$ затрачивается на преодоление силы трения T , то есть:

$$(p_1 - p_2)\pi r^2 = -\mu\pi r l \frac{dw}{dr},$$

откуда, после сокращения и разделения переменных, получаем:

$$\frac{p_1 - p_2}{2\mu l} r dr = -dw_r,$$

Переходя ко всему объёму жидкости в трубе, проинтегрируем это дифференциальное уравнение, учитывая, что переменная величина радиуса в левой части уравнения изменяется от r до $r = R$, а переменная скорость в правой части - от $w = w_r$ до $w = 0$ (у стенки, где $r = R$).

$$\int_r^R \frac{p_1 - p_2}{2\mu l} r dr = -\int_{w_r}^0 dw_r$$

Тогда:

$$\frac{p_1 - p_2}{2\mu l} \cdot \left(\frac{R^2}{2} - \frac{r^2}{2} \right) = w_r,$$

или

$$w_r = \frac{p_1 - p_2}{4\mu l} \cdot (R^2 - r^2) \quad (6-9)$$

Скорость имеет максимальное значение на оси трубы, при $r = 0$:

$$w_{\max} = \frac{p_1 - p_2}{4\mu l} \cdot (R^2) \quad (6-9a)$$

Сопоставляя выражения (6-9) и (6-9a), находим:

$$w_r = w_{\max} \frac{R^2 - r^2}{R^2} = w_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (6-10)$$

Уравнение (6-10) представляет собой закон Стокса, выражающий параболическое распределение скоростей в сечении трубопровода при ламинарном движении.

Для определения расхода жидкости при ламинарном движении рассмотрим элементарное кольцевое сечение (рис. 6.1, б) с внутренним радиусом r и внешним радиусом ($r + dr$), площадь которого равна $dS = 2\pi r dr$. Объёмный расход жидкости через это сечение составляет:

$$dV_{\text{сек}} = w r dS = w r 2\pi r dr$$

или с учётом уравнения (6-9a)

$$dV_{\text{сек}} = \frac{p_1 - p_2}{4\mu l} (R^2 - r^2) 2\pi r dr$$

Интегрируя последнее уравнение, получим общий расход жидкости через трубу:

$$V_{cek} = \frac{P_1 - P_2}{4\mu l} \int_0^R (R^2 - r^2) 2\pi r dr = \frac{P_1 - P_2}{4\mu l} (2\pi R^2 \int_0^R r dr - 2\pi \int_0^R r^3 dr) = \frac{P_1 - P_2}{8\mu l} \pi R^4 \quad (6-11)$$

Подставляя вместо R диаметр трубы $d = 2R$ и обозначая $(p_1 - p_2) = \Delta p$, окончательно находим:

$$V_{cek} = \frac{\pi d^4 \Delta p}{128 \mu l} \quad (6-11a)$$

Уравнение (6-11) и (6-11a), определяющее расход жидкости при её ламинарном движении по круглой прямой трубе, носит название уравнения Пуазеля.

Соотношение между средней скоростью w и максимальной скоростью w_{max} можно получить, сопоставив значения V_{cek} из уравнения:

$$V_{cek} = wS, \quad (6-11)$$

$$V_{cek} = \frac{P_1 - P_2}{4\mu l} \cdot \int_0^R (R^2 - r^2) 2\pi r dr = \frac{P_1 - P_2}{4\mu l} \left(2\pi R^2 \int_0^R r dr - 2\pi \int_0^R r^3 dr \right) = \frac{P_1 - P_2}{8\mu l} \cdot (\pi R^4), \text{ или}$$

$$wS = \frac{P_1 - P_2}{8\mu l} \cdot (\pi R^4),$$

откуда

$$w = \frac{P_1 - P_2}{8\mu l} \cdot (R^2). \quad (6-12)$$

Сравнивая уравнения (6-9а) и (6-12), находим:

$$w = \frac{w_{max}}{2}. \quad (6-13)$$

Таким образом, при ламинарном потоке в трубе средняя скорость жидкости равна половине скорости по оси трубы.

Соответственно параболический закон распределения скоростей по сечению трубы, выражаемый уравнением (6-13), может быть представлен в виде:

$$w_r = 2w \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right). \quad (6-13a)$$

6.4 Турбулентный режим движения жидкости.

В промышленной практике наиболее распространено турбулентное движение жидкостей. При турбулентном движении из-за хаотического движения частиц происходит выравнивание скоростей в основной массе потока и их распределение по сечению трубы

характеризуется кривой, отличающейся по форме от параболы на рис. 6.3, а: кривая имеет значительно более широкую вершину (рис. 6.3. б).

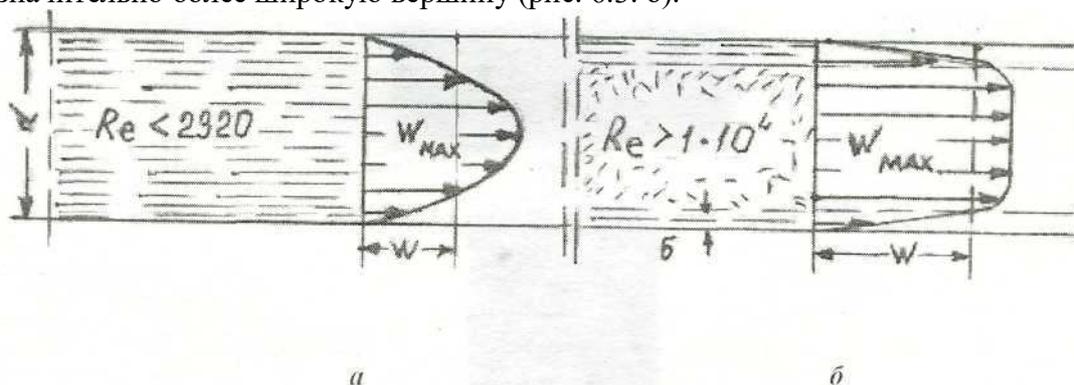


Рис.6.3.

Опыт показывает, что средняя скорость w при турбулентном движении не равен половине максимальной (как для ламинарного движения), а значительно больше этой величины, причем: $w/w_{max} = f(Re)$. Например, при $Re = 108$ величина $w \approx 0,9 w_{max}$.

6.5 Пульсация и средняя скорость потока при турбулентном режиме движения жидкости.

В связи со сложным характером турбулентного движения не представляется возможным строго теоретически получить профиль распределения скоростей и значение w/w_{max} . Кроме того, при турбулентном потоке профиль скоростей (рис. 6.3, б) выражает распределение не истинных, а осредненных во времени скоростей.

В каждой точке турбулентного потока истинная скорость не остается постоянной во времени из-за хаотичности движения частиц. Её мгновенные значения испытывают флуктуации, или нерегулярные пульсации, носящим хаотический характер.

Типичная картина изменения составляющей истинной мгновенной скорости w_x (вдоль оси потока) для некоторой точки в зависимости от времени t представлена на рис. 6.4. Саму истинную скорость измерить практически невозможно из-за хаотического перемещения частиц во всех направлениях. Как видно из рисунка 6.4, скорости пульсируют около некоторой осредненной во времени величины, становясь то больше, то меньше её. Для данной точки величина осредненной во времени и скорость может быть найдена из соотношения:

$$w_x = \frac{\int_0^{\tau} w_x d\tau}{\tau}.$$

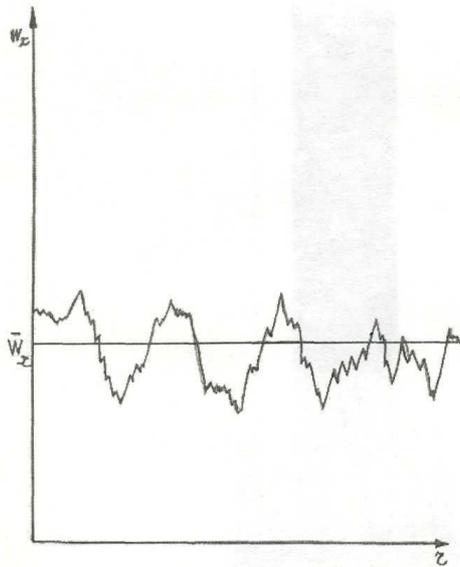


Рис. 6.4

Таким образом, величина w_x равна высоте прямоугольника, равновеликого площади, заключенной между пульсационной кривой и осью абсцисс в пределах изменения времени от 0 до τ (рис. 6.4). Разность между истинной и осредненной скоростями называют мгновенной пульсационной скоростью и обозначают

$$w - \bar{w}_x = \Delta w. \quad (6-15)$$

Контрольные вопросы:

1. Объясните ламинарный режим движения?
2. Объясните турбулентный режим движения?
3. Что обозначает число Рейнольдса?
4. Что такое геометрическое подобия?
5. Объясните критерии подобия.
6. Какие критерии могут выполняться для гидродинамического подобия двух потоков?
7. Распределение скоростей по поперечному сечению.
8. Приведите примеры подчиняющиеся законам параболы.
9. Приведите формулу закона параболы для распределения скорости.
10. Объясните закон распределения скорости для турбулентного режима движения.
11. Объясните пульсацию скорости.
12. Какую скорость называют приравненной?

Опорные слова: режима, течения, уровень воды, ламинарный, масштаб плотности, площадь, флуктуация, или нерегулярные пульсации, всего поперечного сечения трубопровода.

Лекция 7

Потери напора при движении жидкости Технология обучения на лекцию № 7

Время - 2 час	Количества студентов: 20-30 чел
Форма учебного занятия	Введение, визуальная лекция
План учебного занятия	1. Потери напора при движении жидкости. 2. Понятие о гладких и шероховатых трубах. 3. Виды местных потерь 4. Зависимость коэффициента местного сопротивления от числа Рейнольдса 5. Обобщение потерь напора.
<i>Цель учебного занятия:</i> ознакомить студентов с закономерностями потери напора в различных случаях, также о зависимости коэффициента местного сопротивления от числа Рейнольдса.	
<i>Задачи преподавателя:</i> •охарактеризовать потери напора в трубопроводах; •ознакомить с понятием местного сопротивления; •Обобщит потерь напора; •Объяснить зависимость меньшего коэффициента местного сопротивления от числа Рейнольдса.	<i>Результаты учебной деятельности:</i> Студент должен узнать: - потери напора в трубопроводах; - местное сопротивление; - потери напора при внезапном расширении потока; - зависимость коэффициента местного сопротивления от числа Рейнольдса;
Средства обучения	Лазерный проектор, визуальные материалы, информационное обеспечение.
Формы обучения	Коллективная, фронтальная работа, работа в парах.
Условия обучения	Аудитория, приспособленная для работы с ТСО.

Технологическая карта лекции (7-е занятие)

Этапы, время	Деятельность	
	Преподавателя	студентов
1 этап. Введение (10 мин.)	1.1. Сообщает, тему, цель, планируемые результаты учебного занятия и план его проведения.	1.1. Слушают, записывают.
2 этап. Основной (60 мин.)	<p>2.1. С целью актуализировать знания студентов задает фокусирующие вопросы: – Что такое снижения давления в трубах? – Объясните шероховатость стенок труб? – Что такое число Рейнолдса? Для ответа на вопросы организует работу в парах. Проводит блиц-опрос.</p> <p>2.3. Последовательно излагает материал лекции по вопросам плана, использует визуальные материалы. Даёт понятие о гладких и шероховатых трубах. Как происходит потери напора в трубопроводах.</p> <p>Акцентирует внимание на ключевых моментах темы, предлагает их записать</p>	<p>2.1. Слушают. По очереди отвечают на вопросы. Слушают правильный ответ.</p> <p>2.3. Обсуждают содержание схем и таблиц, визуальные материалы, уточняют, задают вопросы. Записывают главное.</p>
3- этап. Заключительная (10 мин.)	<p>3.1. Проводит блиц-опрос. Делает итоговое заключение. Дает задание для самостоятельной работы.</p> <p>3.2 Сотавить кластер на слово «Падение давления». Ставить оценки.</p>	<p>3.1. Отвечают на вопрос.</p> <p>3.2. Слушают, записывают.</p>

7.1. Потери напора в трубопроводах.

Рассмотрим основные формулы, применяемые для определения потерь напора.

Для этого обратимся к основному выражению для потери напора при равномерном движении:

$$h_{1-2} = \frac{\tau}{\gamma} \cdot \frac{L}{R}$$

Если принять, как это было предложено Шези на основе его опытов, ещё в 1775 году, величину $\frac{\tau}{\gamma}$ пропорциональной квадрату скорости, с коэффициентом пропорциональности $\left(\frac{1}{C}\right)^2$, то получим:

$$h_{1-2} = \frac{v^2}{C^2} \cdot \frac{L}{R} \quad (7-1)$$

С учётом того, что $\frac{h_{1-2}}{L} = i$ (где i - гидравлический уклон), из последнего выражения получается следующая формула для скорости при равномерном движении жидкости:

$$v = C\sqrt{Ri} \quad (7-2)$$

называемая обычно формулой Шези.

Значения коэффициента C в формуле (7-2) определяются опытным путём; размерность этого коэффициента (i - безразмерная величина) будет:

$$C = \frac{v}{\sqrt{Ri}} = \frac{[L]}{[T][L]^{\frac{1}{2}}} = \sqrt{\frac{[L]}{[T^2]}}$$

Следовательно, величина C будет иметь размерность ускорения.

Для практического применения, однако, удобнее иметь эмпирические коэффициенты безразмерными. С этой целью впоследствии коэффициент C был заменён через

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}},$$

где: λ - безразмерная величина, обычно называемая коэффициентом гидравлического сопротивления.

Такая замена позволяет привести формулу (7-1) к очень удобному, для практического пользования, виду:

$$h_{1-2} = \lambda \frac{L}{4R} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (7-3)$$

Так как для круглых труб $4R=d$, то отсюда получается так называемая формула Дарси - Вейсбаха для определения потерь напора при равномерном движении жидкости в круглых трубах:

$$h_{1-2} = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (7-4)$$

Формулы (7-1) и (7-4) являются наиболее распространёнными формулами для определения потерь напора; первая из них (7-1) применяется, главным образом, при расчётах открытых потоков, а вторая (7-4) - напорных (в круглых трубах).

7.2. Понятие о гладких и шероховатых трубах.

Твёрдые стенки, ограничивающие поток жидкости, всегда в той или иной степени обладают известной шероховатостью. Шероховатость характеризуется величиной и формой различных, порой самых незначительных по размерам, выступов и неровностей, имеющих на стенках, и зависит от материала стенок и их обработки. Обычно с течением времени шероховатость изменяется от появления ржавчины, коррозии, отложения осадков и т.д.

В качестве основной характеристики шероховатости служит так называемая «абсолютная шероховатость» - k ,

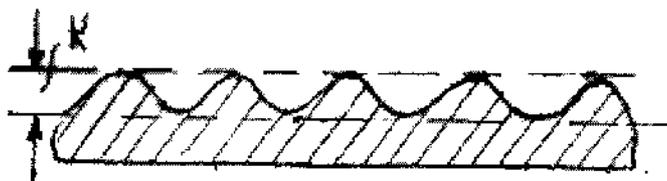


Рис. 7.1, а

представляющая собой среднюю величину указанных выступов и неровностей, измеренную в линейных единицах (рис. 7.1, а).

В таблице 7.1. приведены некоторые значения абсолютной шероховатости для труб, изготовленных из различных материалов.

Таблице 7.1.

Трубы	k , мм
Чистые, цельнотянутые трубы из латуни, меди и свинца	0.01
Новые цельнотянутые стальные трубы	0,05-0.15
Стальные трубы с незначительной коррозией	0,2-0.3
Новые чугунные трубы	0,3
Асбоцементные трубы	0.03-0,8
Старые стальные трубы	0,5-2,0

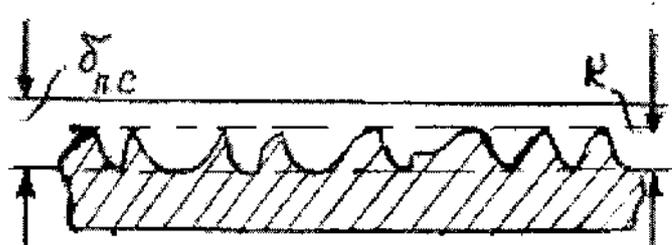


рис. 7.1.

Пусть (рис. 7.1, б) величина выступов шероховатости будет меньше, чем толщина ламинарного пограничного слоя. При этом неровности стенки будут полностью погружены в этом слое, турбулентная часть потока не будет входить в непосредственное соприкосновение со стенками и движение жидкости, а следовательно, и потери энергии, не будут зависеть от шероховатости стенок, а будут обуславливаться свойствами самой жидкости лишь такова, что они превышают толщину пограничного слоя, неровности стенок будут выступать в турбулентную область, увеличивать беспорядочность движения и в существенным образом влиять на величину потерь.

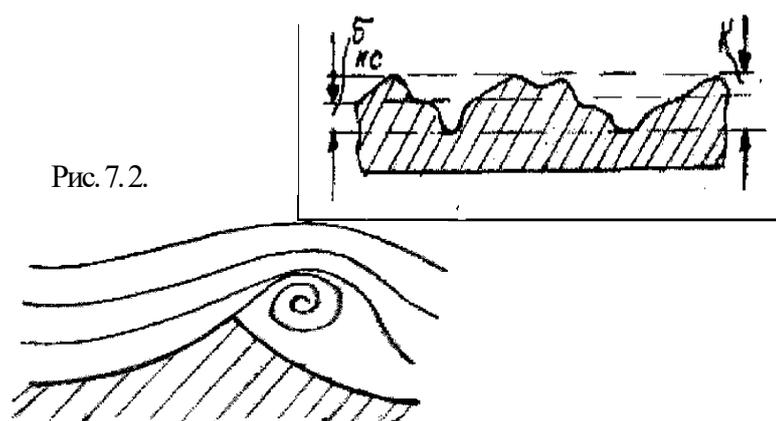


Рис. 7.2.

Рис. 7.3.

В этом случае каждый отдельный выступ можно уподобить плохо обтекаемому телу, помещённому в окружающем его потоке жидкости и являющемуся источником образования вихрей (рис. 7.3).

В соответствии со сказанным, в гидравлике различают поверхности *гидравлически гладкие* ($k < \delta_{nc}$) и *поверхности шероховатые* ($k > \delta_{nc}$). Конечно, такое деление является условным.

На самом деле толщина ламинарного пограничного слоя непостоянна и уменьшается с увеличением числа Рейнольдса. У гидравлически гладких с начала стенок с увеличением числа Рейнольдса также начинает проявляться их шероховатость, т.к. пограничный слой становится тоньше и выступы шероховатости, которые первоначально полностью располагались в пограничном слое, начинают выходить из этого слоя, выступая в турбулентную зону. Следовательно, одна и та же стенка в зависимости от величины числа Рейнольдса, может вести себя по-разному: в одном случае - как «гладкая», в другом - как «шероховатая». Поэтому «абсолютная шероховатость» не может полностью характеризовать влияние стенок на движение жидкости. Естественно, что стенки с одной и той же абсолютной шероховатостью в потоках небольших поперечных размеров должны будут вносить большие возмущения в поток жидкости и оказывать большее сопротивление движению, чем в потоках большого сечения.

Для характеристики влияния шероховатости на величину гидравлических сопротивлений, а также исходя из условий соблюдения подобия, в гидравлике вводится понятие «относительной шероховатости» s , под которой понимают безразмерное отношение абсолютной шероховатости к некоторому линейному размеру, характеризующему сечение потока таким образом;

$$\varepsilon = \frac{k}{r} \quad (7-5)$$

В действительности, однако, как показали последние исследования, на величину гидравлических сопротивлений влияет не только абсолютное значение шероховатости (высота выступов), но также в значительной степени их форма и густота. Учесть влияние этих факторов непосредственными измерениями шероховатости практически невозможно.

7.3. Потери напора при внезапном расширении потока.

При внезапном расширении (рис. 7.4) потеря напора может быть определена из формулы:

$$h_{MM} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}.$$

Вынося за скобку величину v_2 получим:

$$h_{M.n.} = \left(\frac{F_2}{F_1} - 1 \right)^2 \frac{v_2^2}{2g} = \zeta \frac{v_2^2}{2g}, \quad (7-7)$$

где $\zeta = \left(\frac{F_2}{F_1} - 1 \right)^2$, F_1 и F_2 - сечения трубы до расширения и за ним.

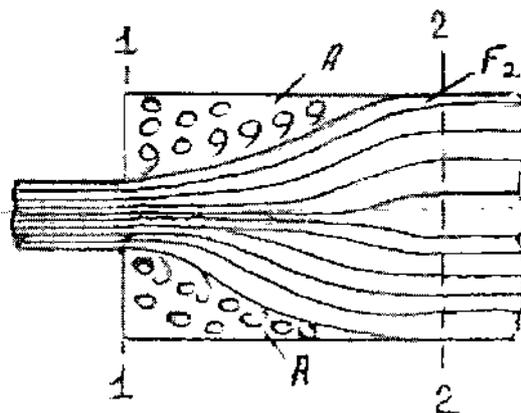


Рис.7.4.

Таким образом, формула (7-7) приводится к общему виду для выражения потерь на местные сопротивления. Значения коэффициента ζ могут быть в этом случае легко вычислены, исходя из заданных размеров трубы.

Потери напора при сужении потока.

Коэффициент сопротивления Q при внезапном сужении зависит от отношения $\frac{F_2}{F_1}$. Определенные опытным путём значения этого коэффициента содержатся в таблице 7.2.

Таблица 7.2.

F_2	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,00
-------	------	-----	-----	-----	-----	-----	------

	0,45	0,39	0,35	0,28	0.20	0,09	0.00
--	------	------	------	------	------	------	------

Постепенное сужение (конфузоры-рис. 7.4). Коэффициент сопротивления находится по формуле:

$$\zeta = \frac{\lambda}{8 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{n^2 - 1}{n^2} \quad (7-8)$$

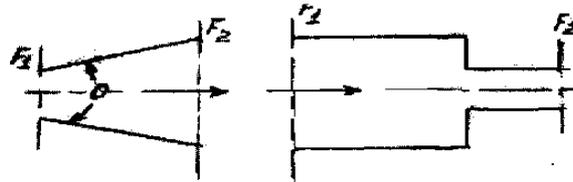


Рис. 7.5.

7.4. Зависимость коэффициента местного сопротивления от числа Рейнольдса.

Установлено, что величина коэффициента местного сопротивления ζ , зависит не только от вида самого местного сопротивления, но и от характера режима движения жидкости, т.е. от числа Рейнольдса Re .

Наибольшие изменения в зависимости от числа Рейнольдса Re коэффициент ζ , претерпевает в области *ламинарного режима*. При весьма малых значениях числа Рейнольдса ($Re < 10$) этот коэффициент обратно пропорционален Re :

$$\zeta = \frac{A}{Re}$$

При больших значениях числа Рейнольдса в области ламинарного режима зависимость коэффициента местного сопротивления от числа Рейнольдса имеет вид:

$$\zeta = \frac{B}{(Re)^n}$$

A и B -коэффициенты, зависящие от вида местного сопротивления. Ориентировочно (по Ф. П. Товстолесу) можно принять показатель степени $n = 0,285$. Тогда:

$$\zeta = \frac{B}{Re^{0,285}}$$

Значения коэффициента в данной формуле для некоторых частных случаев приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3.

Вид сопротивления	R
Шаровой вентиль	48,8
Тройник	32,5
Угловой вентиль	21,7
Колено (прямоугольное)	16,3

Обобщённой формулой, применимой как при ламинарном, так и при турбулентном режиме, является формула А.Д. Альтшуля:

$$\zeta = \frac{C}{\text{Re}} + \zeta_k$$

где: C — коэффициент, зависящий от вида местного сопротивления;

ζ_k — коэффициент местного сопротивления в квадратичной области турбулентного режима.

Значения коэффициентов C и ζ_k приведены в таблице 7.4

Таблица 7.4.

Вид сопротивления	C	
Колено с углом 90°	130	0,2
Задвижка	400-2500	0,36-2.5
Пробковый кран	150	0,40
Обыкновенный вентиль	3000	4,0
Угловой вентиль	400	0.80
Шаровой клапан	500	1,6

Для практических расчётов можно пользоваться также графиком Данфорса (рис. 7.5), на котором показаны в функции от числа Рейнольдса эквивалентные длины L , некоторых местных сопротивлений, выраженные в диаметрах трубы.

Установлено, что при *турбулентном режиме* изменения коэффициента местного сопротивления ζ , в зависимости от числа Рейнольдса настолько незначительны, что ими вполне возможно пренебречь. Поэтому при практических расчётах в области турбулентного режима этот коэффициент считают зависящим только от характера и конструктивного оформления местного сопротивления.

7.5. Обобщение потерь напора.

Во многих случаях при движении жидкостей имеют место одновременно как потери напора на трение по длине, так и местные потери напора. Полная потеря напора определяется в этих случаях как арифметическая сумма потерь всех видов.

Поэтому, например, полная потеря напора в трубопроводе длиной L , диаметром d , имеющем n местных сопротивлений, будет:

$$h_{1-2} = h_{л.н.} + \sum h_{M.н.} = \lambda \frac{Lv^2}{d2g} + \sum_{i=1}^{i=n} \zeta_i \frac{v^2}{2g}$$

$$h_{1-2} = \left(\lambda \frac{Lv^2}{d2g} + \sum_{i=1}^{i=n} \zeta_i \right) \frac{v^2}{2g}$$

Выражение, стоящее в скобках, называют *коэффициентом сопротивления системы* и обозначают через $\zeta_{сис}$ таким образом:

$$h_{1-2} = \zeta_{сис} \frac{Lv^2}{d2g}$$

Можно также заменить местные сопротивления эквивалентными им длинами; в рассматриваемом случае эквивалентная длина, соответствующая всем местным сопротивлениям, будет:

$$L = \frac{d}{\lambda} \sum_{i=1}^{i=n} \zeta_i$$

Тогда, обозначая $L + L_n - L_n$ можно определять сумму потерь по формуле Дарси-Вейсбаха, вводя в неё вместо действительной длины трубопровода L так называемую приведённую длину L_n . Таким образом,

$$h_{1-2} = \lambda \frac{L_n}{d} \cdot v^2 / 2g \quad (7-9)$$

Если трубопровод состоит из нескольких участков длиной L_1, L_2, \dots, L_k , различного диаметра d_1, d_2, \dots, d_k с n местными сопротивлениями, полная потеря напора находится аналогично предыдущему:

$$h_{1-2} = \sum_{i=1}^{i=k} h_{л.н.i} + \sum_{i=n}^{i=n} h_{M.g.i}$$

$$\sum_{i=1}^{i=k} h_{k.g.c} = \lambda_1 \frac{L_1 v_1^2}{d_1 2g} h_{1-2} = \lambda \frac{L_2 v_2^2}{d_2 2g} + \lambda_k \frac{L_k v_k^2}{d_k 2g}$$

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k, \zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, v_1, v_2, v_k \sim$ коэффициенты сопротивлений и средние скорости для отдельных участков.

Для упрощения подсчётов часто оказывается целесообразным выразить все скорости через какую-нибудь одну «основную» скорость на некотором «основном» участке трубопровода, который выбирается совершенно произвольно в зависимости от удобства решения и условий задачи. Предположим, что таким участком является первый. Тогда из уравнения постоянства расхода:

$$v_1 F = v_2 F_2 = \dots = v_k F_k$$

получаем: $v_2 = v_1 F_1 / F_2, \dots, v_k = v_1 F_1 / F_k$

Подставляя эти значения в выражения (b) и (c), а последние - в общее уравнение для полной потери напора (a), после преобразований находим:

$$h_{1-2} = \left[\lambda_1 \frac{L_1}{d_1} + \lambda_2 \frac{L_2}{d_2} \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^2 + \lambda_k \frac{L_k}{d_k} \left(\frac{F_1}{F_k} \right)^2 + \zeta_1 + \zeta_2 \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^2 + \dots + \zeta_n \left(\frac{F_1}{F} \right)^2 \right] \frac{v_1^2}{2g}$$

или - (коэффициент сопротивления системы) обозначено выражение, стоящее в квадратных скобках).

При суммировании потерь необходимо проверить, не оказывают ли отдельные местные сопротивления влияния друг на друга; этого влияния не будет, если сопротивления расположены на достаточно большом расстоянии между собой (равном от $20 d$ до $50 d$, в зависимости от вида местного сопротивления).

Контрольные вопросы:

1. Причины снижения давления в трубах.
2. Потери давления по длине трубопровода.

3. Объясните шероховатость стенок труб.
4. Понятие о гладких гидравлических трубах.
5. Местные гидравлические сопротивления. Их основные виды.
6. Потери давления при расширении трубопроводов.
7. Обобщение потерь напора.
8. Объясните зависимость меньшего коэффициента местного сопротивления от числа Рейнольдса.
9. Объясните зависимость большего коэффициента местного сопротивления от числа Рейнольдса.

Опорные слова: потери напора, в трубопроводах, о гладких и шероховатых трубах, местные потери, числа Рейнольдса, при сужении потока, коэффициент, величина, местного сопротивления.

Лекция 8.

Гидравлический расчёт трубопроводов. Технология обучения на лекцию № 8

Время - 2 час	Количества студентов: 20-30 чел
Форма учебного занятия	Введение, визуальная лекция
План учебного занятия	<ol style="list-style-type: none"> 1. Гидравлический расчёт трубопроводов. 2. Последовательное и параллельное соединение трубопроводов. 3. Гидравлический удар в трубах. 4. Теория гидравлического удара Жуковского. 5. Методы снижения гидравлического удара.
<i>Цель учебного занятия:</i> научить студентов делать гидравлический расчёт трубопроводов в различных режимах движения, ознакомить с последовательным и параллельным соединением трубопроводов.	
<i>Задачи преподавателя:</i> <ul style="list-style-type: none"> •научить вычислять гидравлические расчёты трубопроводов; •ознакомить с теорией гидравлического удара Жуковского; •Обобщит потерь напора; •Объяснить методы снижения гидравлического удара. 	<i>Результаты учебной деятельности:</i> Студент должен узнать: <ul style="list-style-type: none"> - гидравлический расчёт трубопроводов; - последовательное и параллельное соединение трубопроводов; - гидравлический удар в трубах; - теорию гидравлического удара Жуковского - методы снижения гидравлического удара;
Средства обучения	Лазерный проектор, визуальные материалы, информационное обеспечение.
Формы обучения	Коллективная, фронтальная работа, работа в парах. Графорганазеры
Условия обучения	Аудитория, приспособленная для работы с ТСО.

Технологическая карта лекции (8-е занятие)

Этапы, время	Деятельность	
	Преподавателя	студентов
1 этап. Введение (10 мин.)	1.1. Сообщает, тему, цель, планируемые результаты учебного занятия и план его проведения.	1.1. Слушают, записывают.
2 этап. Основной (60 мин.)	<p>2.1. С целью актуализировать знания студентов задает фокусирующие вопросы: – Объясните длинные и короткие трубы? – Что такое гидравлический удар в трубах? – Что такое последовательные и параллельные соединения? Для ответа на вопросы организует работу в парах. Проводит блиц-опрос.</p> <p>2.3. Последовательно излагает материал лекции по вопросам плана, использует визуальные материалы. Объясняет, как производится гидравлический расчёт трубопроводов. Даёт определение гидравлическому удару. Ознакомить методами снижения гидравлического удара.</p> <p>Акцентирует внимание на ключевых моментах темы, предлагает их записать</p>	<p>2.1. Слушают. По очереди отвечают на вопросы. Слушают правильный ответ.</p> <p>2.3. Обсуждают содержание схем и таблиц, визуальные материалы, уточняют, задают вопросы. Записывают главное.</p>
3- этап. Заключительная (10 мин.)	<p>3.1. Проводит блиц-опрос. Делает итоговое заключение. Дает задание для самостоятельной работы.</p> <p>3.2 Сотавить кластер на слово «Гидравлический удар». Ставить оценки.</p>	<p>3.1. Отвечают на вопрос.</p> <p>3.2. Слушают, записывают.</p>

8.1 Гидравлический расчёт трубопроводов.

Примеры гидравлического расчёта простых трубопроводов в условиях турбулентного режима движения.

При гидравлическом расчёте простых трубопроводов длина трубопровода L обычно известна. Коэффициент шероховатости λ принимается по данным табл. 8.1. Рассматривая основную расчётную формулу:

$$h_w = a \frac{LQ^2}{d^5}$$

отметим, что в условиях турбулентного режима движения при заданных L и λ она связывает между собой три величины h_w , d и Q . Следовательно, для получения определённых решений необходимо задаваться двумя из них, или заранее знать их.

На практике приходится определять:

- 1) расход Q в трубопроводе длиной L : заданы диаметр трубопровода d и потери напора в нём h_w ;
- 2) потери напора в трубопроводе, имеющем длину L : заданы расход трубопровода Q и его диаметр d ;
- 3) потребный диаметр трубопровода, имеющего длину L для пропуска заданного расхода Q : потеря напора h_w также задана.

Пример 1 (Угинчус). Вода из водопроводной башни подаётся к заводу по трубопроводу длиной $L = 3,5$ км, диаметром $d = 300$ мм. Определить расход трубопровода, если отметка земли в месте установки. Определить расход трубопровода, если отметка земли в месте установки башни $z = 130,0$ м, расстояние от земли до уровня воды в башне $H = 170,0$ м или отметка земли у завода $z_3 = 110,0$ м. Потребный напор воды у завода $H_{св} = 25,0$ м (рис. 8.1).

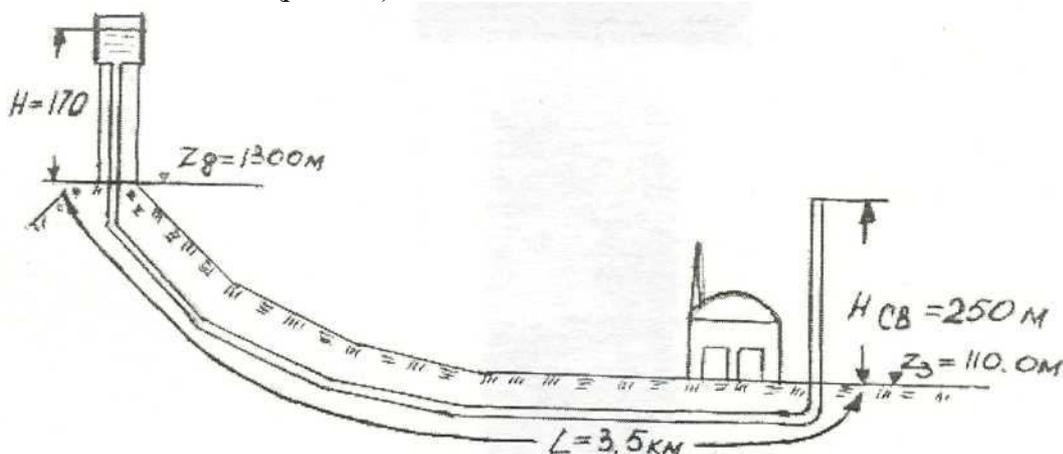


Рис.8.1

Таблица 8.1

Значения величин: C , λ , a , K и b ($b = \frac{a}{d^5} = \frac{h_H}{LQ^2}$) для круглых труб, подсчитанных по полной формуле акад. Н.Н. Павловского при $n = 0,012$.

d , м	C	λ	a	K , м ³ /сек ²	b
0,050	44,79	0,0391	0,00323	0,00987	10340,0
0,075	47,45	0,0349	0,00288	0,0287	1214,0
0,100	49,46	0,0321	0,00265	0,0614	265,0
0,125	51,07	0,0301	0,00249	0,111	81,60
0,150	52,42	0,0286	0,00236	0,179	31,18
0,200	54,62	0,0263	0,00217	0,384	6,78
0,250	56,40	0,0247	0,00204	0,692	2,11
0,300	57,90	0,0234	0,00193	1,121	0,794
0,350	59,18	0,0224	0,00185	1,684	0,354
0,400	60,31	0,0216	0,00178	2,397	0,174
0,450	61,35	0,0209	0,00172	4,259	0,0932
0,500	62,28	0,0202	0,00167	4,324	0,0532
0,600	63,91	0,0192	0,00159	6,999	0,0204
0,700	65,32	0,0184	0,00152	10,517	0,00904
0,800	66,58	0,0177	0,00146	14,965	0,00495
0,900	67,70	0,0171	0,00141	20,430	0,00239
1,000	68,72	0,0166	0,00137	26,485	0,00137

По таблице (8.1) для $n = 0.012$ и $d = 300$ мм находим расходную характеристику $K = 1,121$ м³/сек.

Расход определим по формуле:

$$Q = K \sqrt{\frac{h_H}{L}} = K \sqrt{\frac{z_6 + H - (z_3 + H_{св})}{L}} = 1,121 \sqrt{\frac{130,0 + 17,0 - (110,0 + 25,0)}{3500}} = 0,0656 \text{ м}^3 / \text{сек} = 65,6 \text{ л} / \text{сек}$$

Решение задач без помощи таблиц.

При отсутствии таблиц значений $b = \frac{1}{K^2} = f(d)$ и $a = f_1(d)$ основные задачи гидравлического расчёта простого трубопровода решают так:

1. Определение расхода трубопровода Q при заданных L , d и h_w

По формуле $a = \frac{64n^2}{\pi^2 (\frac{d}{4})^2}$ необходимо вычислить коэффициент

сопротивления a при заданном коэффициенте шероховатости n и затем определить расход по зависимости:

$$Q = \sqrt{\frac{h_w d^5}{aL}}$$

2. Определение потери напора h_w при заданных: L , Q и d

Определив коэффициент сопротивления a по формуле

$$a = \frac{64n^2}{\pi^2 (\frac{d}{4})^2}$$

вычислим потерю напора по формуле:

$$h_w = a \frac{LQ^2}{d^5}$$

3. Определение потребного диаметра трубопровода d при заданных: L , Q и h_w

В этом случае необходимо вычислить значение известной величины:

$$\frac{a}{d^5} = \frac{h_w}{LQ^2}$$

Затем, задаваясь различными диаметрами трубопровода, определяем для каждого из них значения $\frac{a}{d^5}$ и строим график $\frac{a}{d^5} = f(d)$. По данному графику и известной величине $\frac{a}{d^5} = \frac{h_w}{LQ^2}$ находим искомый диаметр.

Примеры гидравлического расчёта простых трубопроводов в условиях ламинарного режима движения.

Для выполнения гидравлических расчётов предварительно необходимо установить значение коэффициента сопротивления a в основной расчётной формуле:

$$h_w = a \frac{LQ^2}{d^5}.$$

Откуда

$$a = \frac{8Av\pi d^2}{v d g \pi^2}$$

Коэффициент сопротивления можно представить в другом виде

заменяя v через $\frac{4Q}{\pi d^2}$, тогда:

$$a = \frac{8Av\pi d^2}{4Q d g \pi^2} = \frac{2Avd}{Qg\pi} \quad (8.1)$$

Рассмотрим решение некоторых задач.

1. Определение расхода трубопровода Q при заданных L , d и h_w

Из основной расчётной формулы $h_w = a \frac{LQ^2}{d^5}$ определим расход трубопровода:

$Q\sqrt{a} = \sqrt{\frac{h_w d^5}{L}}$. Заменяем коэффициент сопротивления a его значением по зависимости:

$$Q\sqrt{\frac{2Avd}{Qd\pi}} = \sqrt{\frac{h_w d^5}{L}}.$$

откуда получим выражение для расхода:

$$Q = \frac{h_w d^4 g \pi}{2LA v} \quad (8.2)$$

2. Определение потери напора h_w при заданных: L , Q и d

Так как скорость v в данном случае известна, то, определив коэффициент сопротивления a по формуле (8.1), потерю напора находим по зависимости:

$$h_W = a \frac{LQ^2}{d^5}$$

3. Определение диаметра трубопровода d при заданных: L , Q и h_w

Для решения этой задачи воспользуемся зависимостью:

$$\frac{a}{d^5} = \frac{h_W}{LQ^2}$$

Заменим в ней коэффициент сопротивления a согласно равенству (8.1):

отсюда получим

$$\frac{2Avd}{Qd^5g\pi} = \frac{h_W}{LQ^2}$$

$$d = \sqrt[4]{\frac{2AvLQ}{g\pi h_w}} \quad (8.3)$$

8.2. Последовательное соединение трубопроводов.

Допустим, что трубопровод состоит из нескольких последовательно соединённых труб различного диаметра с отдельными местными сопротивлениями и отводами в узлах 1, 2, 3 – $q_{уз1}$, $q_{уз2}$, $q_{уз3}$ (рис.8.2). Если местные сопротивления расположены по длине трубопровода на достаточном расстоянии друг от друга, то потери напора по всей его длине можно определять простым суммированием потерь на отдельных участках. Потери напора исчисляются отдельно для участков водовода, имеющих постоянные диаметры и расходы, т.к. вода отводится только в узлах. Тогда общие потери напора будут:

$$\sum h_w = H = h_{w1} + h_{w2} + \dots + h_{wn} = \sum Q_i A_i l_i \quad (8.4)$$

где: h_{wi} — потери напора на отдельных участках; Q_i - расходы; A_i - удельные сопротивления.

Зависимость (8.4) применима в случае пропуска транзитного, не изменяющегося по всей длине трубопровода, расхода.

Для простого трубопровода без отводов расход Q выражается:

$$Q = \sqrt{\frac{H}{\sum l_i A_i}} = \Pi_n \sqrt{H} \quad (8.5)$$

где:

$$\Pi_n = \sqrt{\frac{1}{\sum l_i A_i}} = (\sum l_i A_i)^{-\frac{1}{2}}$$

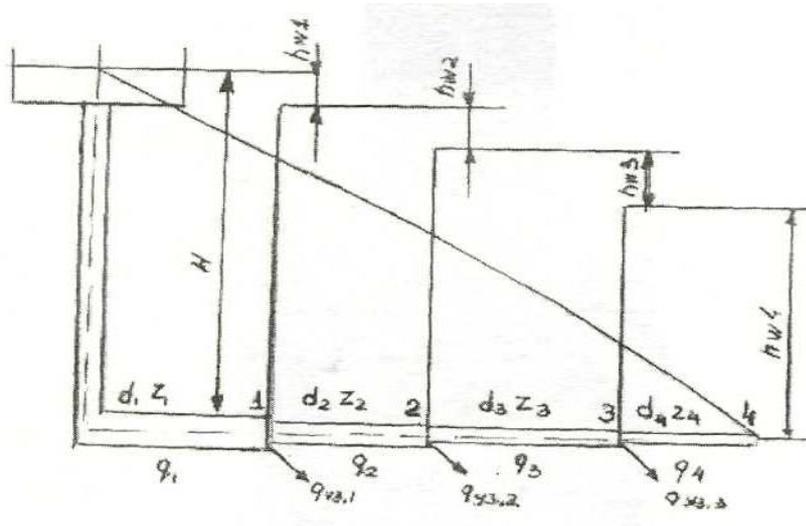


Рис. 8.2.

Последовательное соединение труб.

При последовательном соединении труб сопротивления на отдельных участках трубопровода во всех случаях можно складывать. Пьезометрическая кривая (без учёта местных сопротивлений) при последовательном соединении труб различного диаметра имеет вид ломаной линии (рис. 8.2).

Параллельное соединение трубопроводов.

Частный случай кольцевой системы водопроводной сети (рис. 8.3), когда практически получается как бы параллельное соединение серии простых трубопроводов, т.е. расход пропускается по нескольким отдельным линиям, также можно отнести к простым трубопроводам. Для каждой линии такой сети разность напора в конечных точках *A* и *B* должна быть одинаковой. Распределение же расхода между трубопроводами должно быть пропорциональным их пропускной способности. Для трубопровода на рис. 8.3 получаем систему уравнений:

$$\begin{aligned} H_1 - H_2 &= q_1^2 A_1 l_1 k_{n1} \\ H_1 - H_2 &= q_2^2 A_2 l_2 k_{n2} \\ &\dots\dots\dots \\ H_1 - H_2 &= q_n^2 A_n l_n k_{nn} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (A_1 l_1 k_{n1})^{-\frac{1}{2}} \sqrt{H_1 - H_2} &= q_1 \\ (A_2 l_2 k_{n2})^{-\frac{1}{2}} \sqrt{H_1 - H_2} &= q_2 \\ (A_n l_n k_{nn})^{-\frac{1}{2}} \sqrt{H_1 - H_2} &= q_n \end{aligned}$$

Или

Суммарный расход, проходящий по начальному участку трубопровода определяется:

$$\begin{aligned}
q_H &= q_1 + q_2 + \dots + q_n = \\
&= \sqrt{H_1 - H_2} \left[(A_1 l_1 k_{n1})^{-\frac{1}{2}} + (A_2 l_2 k_{n2})^{-\frac{1}{2}} + \dots + (A_n l_n k_{nn})^{-\frac{1}{2}} \right] = \\
&= \sqrt{H_1 - H_2} \sum (A_n l_n k_{ni})^{-\frac{1}{2}}
\end{aligned}
\tag{8.6}$$

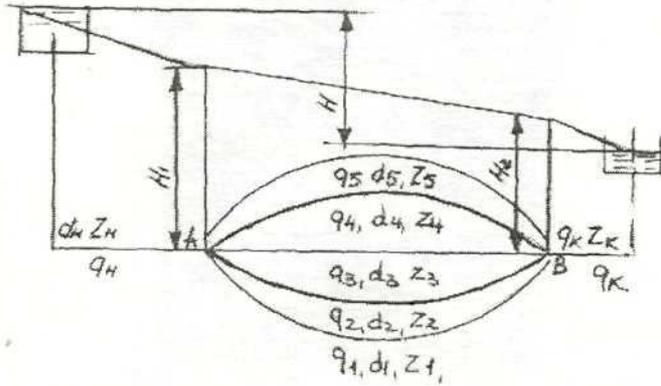


Рис.8.3

Следовательно, при параллельном соединении труб для получения полной проводимости всей системы надо сложить проводимости её отдельных элементов, т.е. определить

$$\sum (A_n l_n k_{ni})^{-\frac{1}{2}}.$$

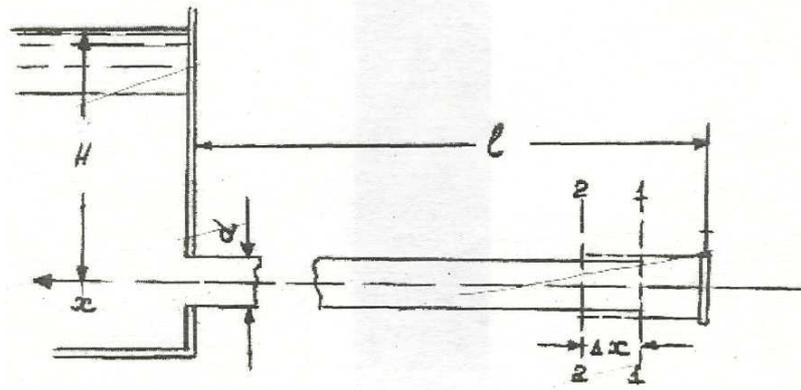
8.3. Гидравлический удар в трубах.

Гидравлическим ударом называется резкое изменение давления в напорном трубопроводе вследствие внезапного изменения скорости движения жидкости во времени.

Предположим, что в напорном трубопроводе движется жидкость. Прекратим внезапно её движение посредством закрытия задвижки. В результате остановки движения произойдёт резкое повышение давления в трубе вследствие перехода кинетической энергии остановившихся слоев жидкости в потенциальную энергию сжатой жидкости. При этом в первую очередь давление увеличится непосредственно у задвижки после остановки первых слоев жидкости. Затем, по мере остановки последующих слоев, увеличение давления будет быстро распространяться вверх по трубопроводу, создавая волну повышения давления. Повышение давления, распространяясь по трубопроводу с большой скоростью, вызывает сжатие жидкости и расширение стенок трубы. Указанная упругая деформация трубы происходит со скоростью распространения повышения давления по длине трубы. Скорость распространения упругих деформаций называется скоростью распространения ударной волны.

8.4. Теория гидравлического удара Жуковского.

Впервые явление гидравлического удара экспериментально и теоретически было изучено известным русским учёным, проф. Н.Е. Жуковским, который в 1898 г. создал теорию гидравлического удара, которая является основной теорией всех исследований в данной области. При выводе основных зависимостей гидравлического удара Жуковский пользовался теоремой о количестве движения.



Рассмотрим некоторый слой (отсек) остановившейся жидкости, в области которого произошло повышение давления и расширение стенок трубы. Предположим, что за время Δt между сечениями с 1-1 и 2-2 на длине Δx произошло расширение стенок трубы. Обозначим скорость распространения упругих деформаций (скорость распространения ударной волны) через c . Тогда: $\Delta x = c\Delta t$.

Предположим, что до расширения объём жидкости между сечениями находится под давлением p . При этом масса отсека составляет:

$$m = p\omega\Delta x = \frac{\gamma}{g}\omega\Delta x \quad (8.7)$$

Когда расширение стенок трубы закончилось, давление достигло значения, $p' = p + \Delta p$, объёмный вес жидкости увеличился до $\gamma' = \gamma + \Delta\gamma$ и площадь живого сечения до $\gamma' = \gamma + \Delta\gamma$. Значит, и масса жидкости в отсеке возросла

$$m' = m + \Delta m = \frac{\gamma + \Delta\gamma}{g}(\omega + \Delta\omega) * \Delta x$$

Таким образом, увеличение массы составляет:

$$\begin{aligned} \Delta m &= m' - m = \frac{\gamma + \Delta\gamma}{g}(\omega + \Delta\omega) * \Delta x - \frac{\gamma}{g}\omega\Delta x = \\ &= \frac{\Delta x}{g}(\gamma\omega + \gamma\Delta\omega + \omega\Delta\gamma + \Delta\gamma\omega - \gamma\omega). \end{aligned}$$

Пренебрегая произведением бесконечно малых величин $\Delta\gamma\Delta\omega$, окончательно получим:

$$\Delta m = \frac{\gamma}{g}\omega\Delta x\left(\frac{\Delta\gamma}{\gamma} + \frac{\Delta\omega}{\omega}\right) = m\left(\frac{\Delta\gamma}{\gamma} + \frac{\Delta\omega}{\omega}\right).$$

Применим к массе жидкости, находящейся в отсеке между сечениями 1-1 и 2-2, теорему о количестве движения. Проекция изменения количества движения массы жидкости на ось x (если пренебречь весьма малыми изменениями величин γ и ω) будет равна:

$$-m\Delta v = -\frac{\gamma}{g}\omega\Delta x\Delta v = -\frac{\gamma}{g}\omega c\Delta t\Delta v. \quad (8.8)$$

Проекция импульса сил давления за то же время равна:

$$(\omega + \Delta\omega) * (p + \Delta p) * \Delta t - \omega p \Delta t = (\omega p + \omega \Delta p + p \Delta \omega + \Delta p \Delta \omega - \omega p) \Delta t$$

Пренебрегая бесконечно малой величиной $\Delta p \Delta \omega$, а также выражением $p \Delta \omega$, которое мало по сравнению с величиной $\omega \Delta p$, получаем:

$$\omega \Delta p \Delta t = -\frac{\gamma}{g} \omega c \Delta t \Delta v \quad (8.9)$$

или

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = -\frac{c \Delta v}{g}. \quad (8.10)$$

Приравняв зависимости, $\frac{\Delta m}{m} = \Delta p \left(\frac{1}{E_0} - \frac{d}{E\delta} \right)$ и $\frac{\Delta m}{m} = -\frac{\Delta v \Delta t}{c \Delta t} = -\frac{\Delta v}{c}$ получаем:

$$\Delta p = \left(\frac{1}{E_0} - \frac{d}{E\delta} \right) = -\frac{\Delta v}{c}. \quad (8.10')$$

Помножим эту зависимость на уравнение (8.10)

$$\frac{\Delta v \Delta p}{c \gamma} = -\frac{\Delta p c \Delta v}{g} \left(\frac{1}{E_0} + \frac{d}{E\delta} \right) = -\frac{\Delta v}{c},$$

или

$$c = \frac{\frac{g}{\gamma}}{\frac{1}{E_0} + \frac{d}{E\delta}} = \frac{\frac{E_0 g}{\gamma}}{1 + \frac{E_0 d}{E\delta}}.$$

Извлекая из последнего выражения, квадратный корень, получим известную формулу Н.Е. Жуковского для скорости распространения ударной волны:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{E_0 g}{\gamma}}}{1 + \frac{E_0 d}{E\delta}} \quad (8.11)$$

Выражение $\sqrt{\frac{E_0 g}{\gamma}}$ представляет собой скорость распространения упругих деформаций в жидкости с плотностью ρ и модулем упругости E_0 . Для воды:

$$c = \sqrt{\frac{E_0 g}{\gamma}} = 1425 \text{ м / сек}$$

Следовательно, для случая, когда по трубопроводу движется вода, формула (8.11) получает такое выражение:

$$c = \frac{1425}{1 + \frac{E_0 d}{E\delta}} \quad (8.12)$$

Определим величину давления, возникающего при гидравлическом ударе, по выражению (8.10), в котором значения Δp и Δv - заменим их дифференциалами:

$$\frac{dp}{\gamma} = \frac{c dv}{g}; dp = -\frac{\gamma}{g} c dv.$$

Интегрируя это выражение, получим:

$$p - p_0 = -\frac{\gamma}{g} c(v - v_0) \quad (8.13)$$

где: p_0 и v_0 — давления и скорости, соответствующие начальному моменту перед ударом. Из формулы (8.13) следует, что максимальное давление при гидравлическом ударе имеет место в случае уменьшения скорости жидкости до нуля, т.е. при $v = 0$:

$$p - p_0 = \rho v_0 c \quad (8.14)$$

Полученная формула (8.14) есть известная формула Жуковского для определения наибольшего давления при гидравлическом ударе.

8.5 Методы снижения гидравлического удара.

Так как большие давления, возникающие при гидравлическом ударе, опасны для целостности труб, то существует много методов борьбы с гидравлическим ударом. Так, например, величину давления при гидравлическом ударе можно значительно уменьшить за счет медленного закрытия трубопровода. При этом величина давления определяется по следующей приближенной формуле:

$$p = \rho v_0 c \frac{T}{T_0}, \quad (8.15)$$

Где T - длительность фазы удара; T_0 – время закрытия.

Гидравлический удар может возникнуть в результате таких причин, влиять на которые не представляется возможным. Так, например, внезапное прекращение подачи энергии к насосам, включенным в систему напорных водопроводов, вызывает гидравлический удар, т.к. после внезапной остановки насоса движение в водопроводе резко падает по сравнению с рабочим, а затем быстро повышает до величины ударного. В настоящее время применяются специальные клапаны-гасители гидравлических ударов, которые автоматически открываются при повышении или понижении давления против нормального сбрасывают часть воды из трубопровода, тем самым снижая давление. Рассмотрим автоматический клапан-гаситель гидравлических ударов системы «Укрводгео» конструкции В.М. Папина, который устанавливается на водоводе после обратного канала.

Принцип действия гасителя (рис. 8.6) основан на том, что при нормальной работе водовода гаситель закрыт, т.к. рабочее давление, передающееся через трубки 1 и 4 и распределитель в 3 над поршневое пространство гасителя 8, прижимает клапан вниз. Это же давление действует на клапан K снизу, но так как площадь клапана меньше площади поршня 5, то гаситель находится в закрытом состоянии.

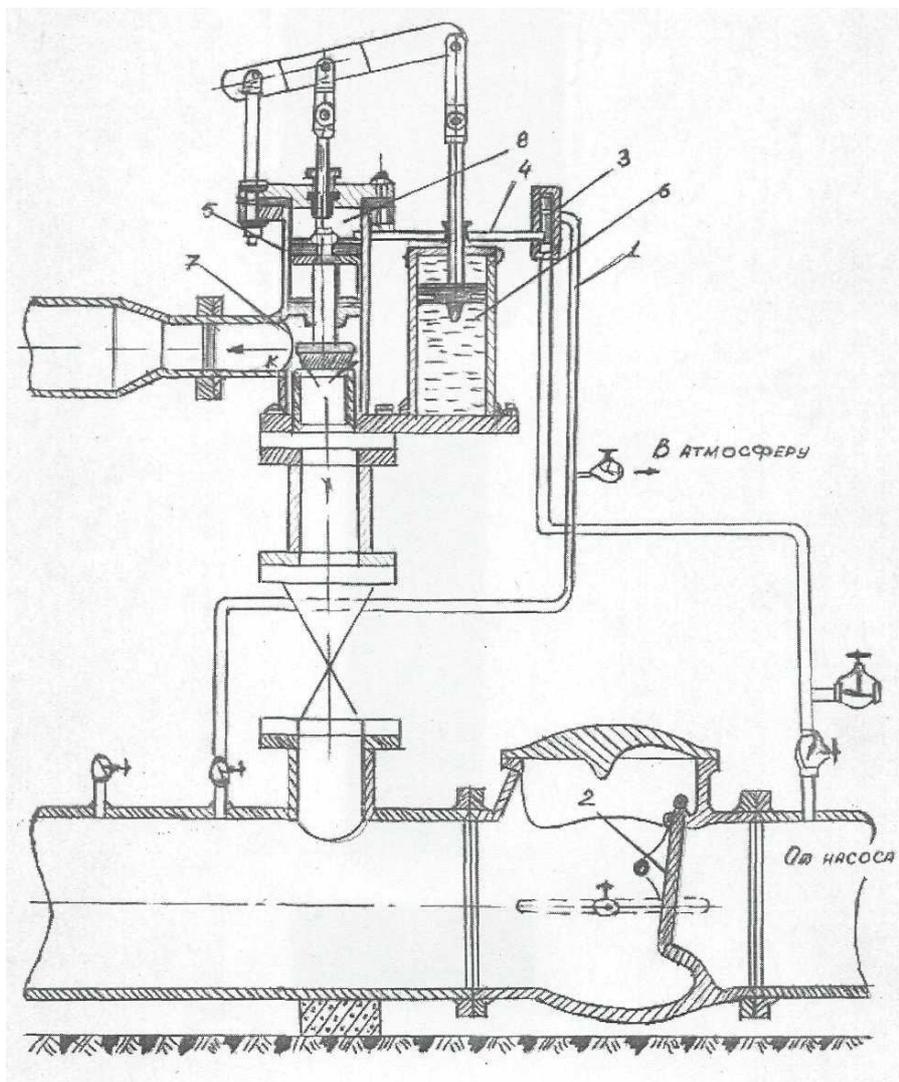


Рис. 8.6

При внезапном выключении насоса давление в водоводе до обратного клапана падает и последний закрывается. Падает также давление и в надпоршневом пространстве 8. Давление же после обратного клапана сначала падает, а затем в результате гидравлического удара начинает подниматься. Поднимающее давление открывает клапан К и соединяет водовод со сбросной трубой 7. Вследствие этого давление не может подняться выше заданной величины (обычно рабочего и статического давления), и удар ликвидируется. Затем поршни распределителя перемещаются в нижнее положение, и надпоршневое пространство гасителя соединяется с водоводом после обратного клапана. Давление водовода передается на поршень гасителя, и гаситель начинает медленно закрываться. Скорость регулируется масляным тормозом 6.

После закрытия гасителя и пуска насосов распределитель вновь переключается в верхнее положение, и гаситель вновь готов к действию.

Контрольные вопросы:

1. Как производится гидравлический расчёт трубопроводов?
2. Объясните длинные и короткие трубы.
3. Объясните сложные и простые трубы.
4. Приведите уравнение расчета простых гидравлических труб.
5. Расчет труб при последовательном соединении.
6. Расчет труб при параллельном соединении.
7. Понятие гидравлический удар в трубах?
8. В чём заключается теория гидравлического удара Жуковского?

Опорные слова: гидравлический расчёт трубопроводов, гидравлический расчёт простых трубопроводов в условиях ламинарного режима движения; последовательное и параллельное, потери напора, коэффициенте шероховатости, диаметра трубопровода, объём жидкости, скорость распространения упругих деформаций.

Лекция 9

Истечение жидкости через малое круглое отверстие и насадки

Технология обучения на лекцию № 9

Время - 2 час	Количества студентов: 20-30 чел
Форма учебного занятия	Введение, визуальная лекция

План учебного занятия	<p>1. Истечение жидкости через малое круглое отверстие и насадки.</p> <p>а) сжимаемость б) скорость и коэффициенты расхода жидкости в) истечение жидкости при переменном напоре</p> <p>2. Водосливы</p> <p>3. Классификация отверстий и основные характеристики истечения жидкости.</p>
<p><i>Цель учебного занятия:</i> ознакомить студентов с тем, как происходит истечение жидкости через отверстия, какова классификация отверстий через которые происходит истечение жидкости, а также с основными характеристиками истечения жидкости.</p>	
<p><i>Задачи преподавателя:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> •ознакомить с видами насадки; •ознакомить с сжимаемостью, скоростью и коэффициентом расхода жидкости; •объяснить классификацию отверстий и основные характеристики истечения жидкости; •Истечение жидкости при переменном напоре удара; 	<p><i>Результаты учебной деятельности:</i></p> <p>Студент должен узнать:</p> <ul style="list-style-type: none"> - истечение жидкости через малое круглое отверстие и насадки; - истечение жидкости через цилиндрические насадки; - классификация отверстий и основные характеристики истечения жидкости; - истечение жидкости при переменном напоре удара;
Средства обучения	Лазерный проектор, визуальные материалы, информационное обеспечение.
Формы обучения	Коллективная, фронтальная работа, работа в парах. Графорганазеры
Условия обучения	Аудитория, приспособленная для работы с ТСО.

Технологическая карта лекции (9-е занятие)

Этапы, время	Деятельность	
	Преподавателя	студентов
1 этап. Введение (10 мин.)	1.1. Сообщает, тему, цель, планируемые результаты учебного занятия и план его проведения.	1.1. Слушают, записывают.
2 этап. Основной (60 мин.)	<p>2.1. С целью актуализировать знания студентов задает фокусирующие вопросы: – Как происходит истечение жидкости через насадку? – Какие виды насадок вы знаете? – Как происходит истечение жидкости при переменном напоре? Для ответа на вопросы организует работу в парах. Проводит блиц-опрос.</p> <p>2.3. Последовательно излагает материал лекции по вопросам плана, использует визуальные материалы. Объясняет, что такое водослив, классификация отверстий, скорость и коэффициенты расхода жидкости, истечение жидкости при переменном напоре, сжимаемость, характеристики истечения жидкости.</p> <p>Акцентирует внимание на ключевых моментах темы, предлагает их записать</p>	<p>2.1. Слушают. По очереди отвечают на вопросы. Слушают правильный ответ.</p> <p>2.3. Обсуждают содержание схем и таблиц, визуальные материалы, уточняют, задают вопросы. Записывают главное.</p>
3- этап. Заключительная (10 мин.)	<p>3.1. Проводит блиц-опрос. Делает итоговое заключение. Дает задание для самостоятельной работы.</p> <p>3.2 Составить кластер на слово «Истечение жидкости через малое круглое отверстие». Ставить оценки.</p>	<p>3.1. Отвечают на вопрос.</p> <p>3.2. Слушают, записывают.</p>

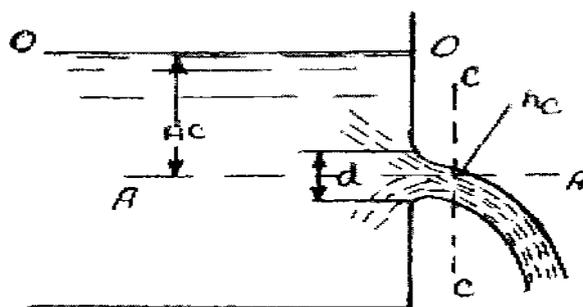


Рис. 9.1

9.1 Истечение жидкости через малое круглое отверстие и насадки.

Рассмотрим сначала случай истечения жидкости через малое круглое отверстие в вертикальной стенке при постоянном напоре (рис. 9.1). Здесь можно полагать, что напор во всех точках поперечного сечения отверстия одинаков.

Рис.9.1

Предполагая отверстие круглым, проведём плоскость сравнения $A-A$ через центр тяжести отверстия, имеющего диаметр d . Обозначим через H_c - геометрический напор над плоскостью сравнения; через h_c - толщину струи в сжатом сечении $C-C$. Напишем уравнение Бернулли для сечения $\theta-\theta$ (уровень свободной поверхности) и сжатого сечения струи $C-C$:

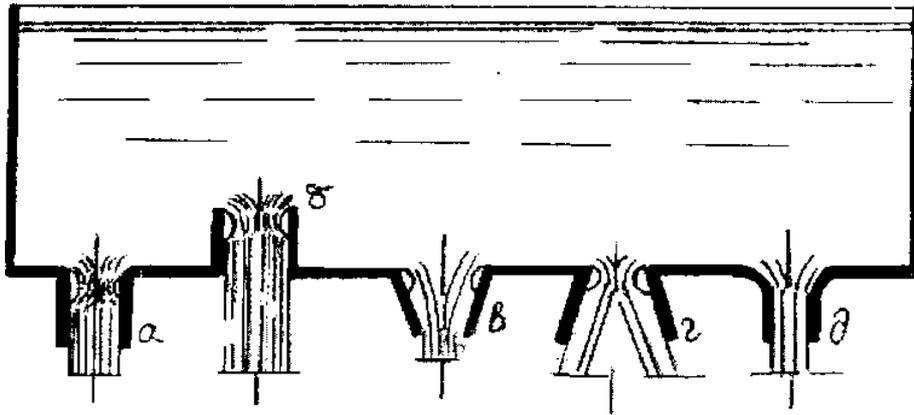


Рис. 9.2

$$H_c + \frac{p_{атм}}{\gamma} + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = \frac{p_{атм}}{\gamma} + \frac{\lambda v_0^2}{2g} + \zeta \frac{v_c^2}{2g},$$

где: v_0 и v_c — скорости в соответствующих сечениях;

ζ — коэффициент сопротивления, учитывающий местные потери энергии в пределах отверстия.

Здесь мы полагаем возможным ввиду малости сечения струи считать давление в сжатом сечении $C-C$ равным атмосферному давлению, т.е. принимать $p_c = p_c$. Обозначим через H_0 полный напор над центром тяжести отверстия:

$$H_0 = H_c + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g}$$

Тогда:

$$H_0 = \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} + \zeta \frac{v_c^2}{2g}.$$

Отсюда получаем выражение для средней скорости в сжатом сечении $C-C$:

$$v_c = \sqrt{\frac{1}{\alpha_c + \zeta} \cdot \sqrt{2gH_0}} = \varphi \sqrt{2gH_0},$$

где: $\varphi = \sqrt{\frac{1}{\alpha_1 + \zeta}}$ - коэффициент скорости отверстия.

Определим расход жидкости, проходящей через отверстие:

$$Q = \omega_c v_c = \omega \varepsilon \varphi \sqrt{2gH_0}$$

Обозначив: $\varepsilon \varphi = \mu$ получим окончательную формулу расхода жидкости при истечении через малое отверстие:

$$Q = \mu \varphi \sqrt{2gH_0},$$

где: μ - коэффициент расхода отверстия, определяемый опытным путём.

Для малых отверстий в тонкой стенке с совершенным сжатием коэффициент расхода μ является устойчивым и составляет:

$$\mu = 0.62 \div 0.60$$

Поэтому малые отверстия часто используются как водомеры. В случае несовершенного или неполного сжатия коэффициент расхода жидкости несколько повышается. Для учёта указанного повышения коэффициента расхода применяются специальные эмпирические формулы.

Истечение жидкости через насадки

Наиболее распространёнными типами насадок являются:

- 1) цилиндрические насадки: внешний (рис. 9.3, а) и внутренний (рис.9.3,б);
- 2) конические насадки, сходящийся (рис. 9.3. б) и расходящийся (рис.9.3, г);
- 3) коноидальные насадки криволинейного очертания, имеющие форму сжатой струи (рис. 9.3, д).

Рассмотрим случай: Рассмотрим сначала истечение жидкости из внешнего цилиндрического насадка, представляющего собой короткую, обычно длиной $l = (3-4) d$, цилиндрическую трубку, приставленную к отверстию в стенке сосуда (рис.9.3).

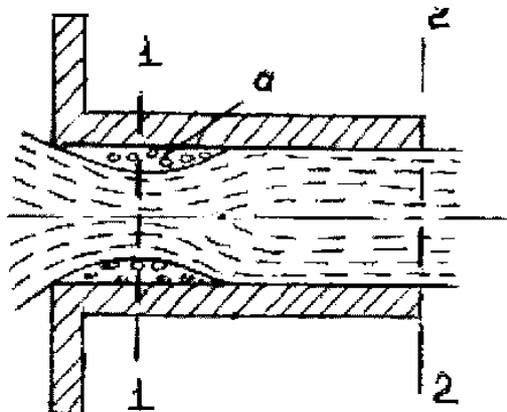


Рис. 9.3.

В этом случае струя жидкости по выходе из сосуда и входе в насадок подвергается некоторому сжатию ($d \approx 0,8 d$) затем постепенно расширяется и заполняет всё поперечное сечение насадка. Сжатие струи здесь происходит только внутри насадка (внутреннее сжатие), выходное же сечение насадка работает полностью, и поэтому коэффициент сжатия, отнесённый к выходному сечению, будет $a \approx 1$.

Цилиндрический насадок выполняется в виде трубки, приставленной к отверстию изнутри сосуда (рис. 9.4).

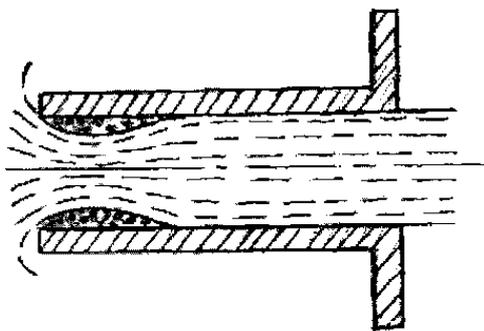


Рис. 9.4

В этом насадке, по сравнению с внешним, сопротивления, а следовательно, и потери напора оказываются большими, так как ухудшаются условия подхода жидкости к насадку.

При длине насадки $l > 2,5 d$ жидкость заполняет все выходное сечение насадка, коэффициент сжатия в этом сечении $a = 1$, а коэффициент скорости оказывается равным: $\varphi = 0,71$. При $l < 1,5d$ насадок работает неполным сечением, и жидкость вытекает из отверстия, не касаясь стенок насадка, что приводит к значительному уменьшению расхода ($\mu = 0,5$).

В коническом сходящемся насадке (рис. 9.5), кроме явления внутреннего сжатия струи, которое, однако, здесь сказывается меньше, чем в цилиндрическом насадке, при выходе из насадка происходит второе (внешнее) сжатие, после чего жидкость течёт параллельными струйками. Благодаря незначительности внутреннего сжатия потери напора в этом насадке оказываются меньшими, чем в цилиндрических насадках, коэффициент скорости - большим, а коэффициент сжатия, за счёт дополнительного сжатия в выходном сечении, - меньшим.

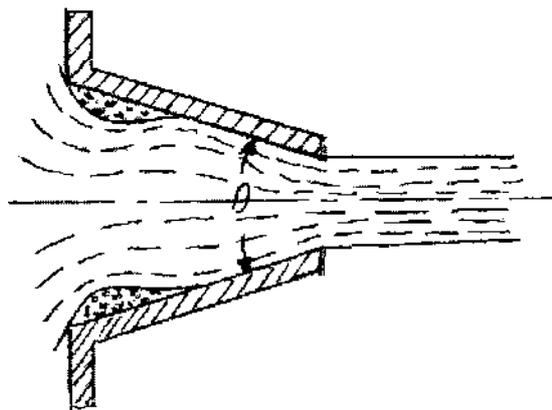


Рис.9.5.

Все коэффициенты истечения (a , φ , μ) для конических насадков зависят от угла конусности θ . Опыт показывает, что в коническом сходящемся насадке коэффициент скорости

φ всё время возрастает с увеличением этого угла; коэффициент же расхода сначала увеличивается, достигая наибольшего значения $\mu = 0,946$ при $\theta = 13$, а затем начинает убывать.

Следует иметь в виду, что здесь, как и везде при рассмотрении истечения из насадок, все коэффициенты относятся к выходному сечению насадка. Если же коэффициент расхода отнести к сечению отверстия в стенке, то в силу конусности самого насадка он окажется, конечно, значительно меньше; поэтому конические сходящиеся насадки при больших выходных скоростях вместе с тем характеризуются меньшими по сравнению с цилиндрическими насадками расходами жидкости.

В конических расходящихся насадках (рис. 9.6) струя жидкости при входе в насадок испытывает значительное сжатие, затем быстро расширяется и заполняет всё сечение. Внешнего сжатия при выходе из насадка здесь нет; и следовательно, коэффициент сжатия $a = 1$. Однако при угле конусности $\theta > 8^\circ$ этот насадок перестаёт работать полным сечением, струя вытекает, не касаясь стенок, и истечение происходит, как из отверстия в тонкой стенке. Коэффициенты истечения в расходящихся насадках, так же как и в сходящихся, изменяются в зависимости от угла конусности; в среднем (при $\theta > 8^\circ$) $\varphi = \mu = 0,45$.

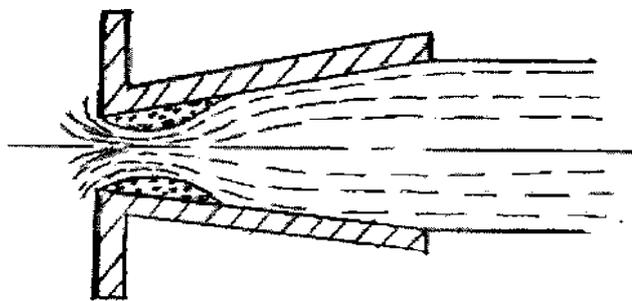


Рис.9.6

Таким образом, в конических расходящихся насадках скорость в выходном сечении оказывается значительно меньшей, чем во всех предыдущих случаях. Причиной этому являются большие потери напора при резком сжатии и расширении струи в самом насадке. Расход же жидкости здесь, наоборот, значительно увеличивается. На первый взгляд ввиду малости коэффициента расхода это может показаться несколько странным. Необходимо, однако, учесть, что этот коэффициент относится к большому выходному сечению насадка; если же его отнести к малому выходному сечению, т.е. к сечению отверстия в стенке, он окажется гораздо больше и достигнет величины, равной 2-3.

В конических расходящихся насадках в месте сжатия струи создаётся значительный вакуум, и поэтому они обладают свойством всасывания, причём ещё в большей степени, чем цилиндрические насадки.

Коноидальные насадки (рис. 9.7) имеют форму, близкую форме струи жидкости, которая вытекает из отверстия в тонкой стенке. Естественно, что поэтому в этих насадках внутреннее сжатие оказывается наименьшим, внешнее сжатие отсутствует ($a \approx 1$) и коэффициенты скорости и расхода должны быть больше, чем во всех остальных случаях.

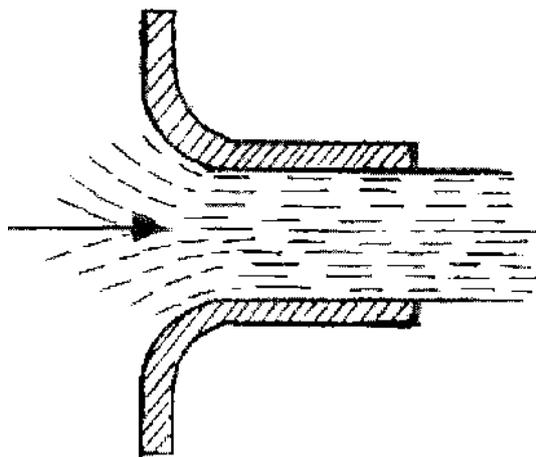


Рис. 9.7

Опыты показывают среднее значение этих коэффициентов: $\varphi = 0,45$ $\mu = 0,97$, а при особой тщательности выполнения и гладких стенках - даже до 0,995.

Сжимаемость. Сжимаемостью называется свойство жидкости изменять свой объём при изменении давления и температуры. Капельные жидкости характеризуются очень малой сжимаемостью, вследствие чего коэффициент объёмного сжатия β_w , т.е. число, определяющее относительное уменьшение объёма жидкости при увеличении давления на одну атмосферу:

$$\beta_w = \frac{dW}{W_0 dp}$$

очень мал. Здесь: W_0 — начальный объём, m^3 ; dW — элементарное изменение объёма, m^3 ; dp — элементарное изменение давления, $кг/м^2$.

Так, например, для пресной воды коэффициент объёмного сжатия при температуре от 0 до 20°C составляет в среднем:

$$\beta_w = 0.0000475 = \frac{1}{21000} \text{ см}^2 / \text{кг}$$

В случае повышения температуры и давления сжимаемость жидкостей несколько уменьшается. В частности, коэффициент объёмного сжатия для воды при достижении температуры 100°C и давлениях до 500 ат уменьшается с $\frac{1}{21000}$ до $\frac{1}{24000}$ $\text{см}^2 / \text{кг}$. При повышении давления с 500 до 1000 ат и сохранении обычной температуры коэффициент объёмного сжатия воды уменьшается $\frac{1}{21000}$ до $\frac{1}{24000}$ $\text{см}^2 / \text{кг}$. Имеющиеся данные о сжимаемости различных капельных жидкостей позволяют определить значения их модулей нормальной упругости, т.е. значения величин, обратных коэффициенту объёмного сжатия:

$$E = \frac{1 \text{ кг}}{\beta_w \text{ см}^2}$$

Для пресной воды модуль нормальной упругости обычно принимается равным $E = 21000 \text{ кг/см}^2$. Для нефти и ртути соответствующие значения составляют:

	B_W кГ/см ²	E кГ/см ²
Нефть	0.000 0740 = 1/13 500	13 500
Ртуть	0,000 003 13 = 1/330 000	330 000

Скорость и коэффициенты расхода жидкости. В обычных условиях истечения, при большой площади поперечного сечения сосуда и малом отверстии, скорости движения жидкости в самом сосуде по сравнению со скоростью истечения из отверстия будут весьма малы.

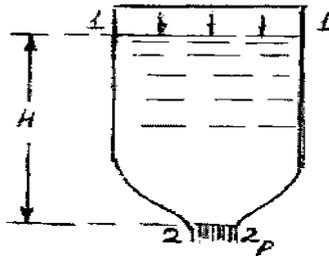


Рис. 9.8

Поэтому при истечении реальной (вязкой) жидкости будут незначительны и потери напора при движении жидкости по сосуду, которые будут возрастать лишь при приближении к отверстию, в непосредственной близости от него, и, особенно, в самом отверстии. Всё это говорит о том, что в рассматриваемом случае потери напора могут быть отнесены к категории местных потерь. Имея в виду это обстоятельство и составляя уравнение Бернулли для сечений 1 и 2 (рис. 9.8), получим:

$$H + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{\gamma} = \frac{p}{\gamma} + \frac{v_D^2}{2g} + \zeta \frac{v_D^2}{2g},$$

где: v_D — действительная скорость истечения;

ζ - коэффициент сопротивления при истечении.

Отсюда находим:

$$v_D = \sqrt{\frac{2g \left(H + \frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} \right)}{1 + \zeta - \left(\frac{f}{F} \right)^2}} \quad (9.1)$$

В частном случае, когда $p_1 = p = p_{атм.}$:

$$v_D = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta}} \cdot \sqrt{2gH} \quad (9.2)$$

Из полученных формул для действительной скорости истечения видно, что эта скорость, как и следовало, ожидать, оказывается всегда несколько меньше теоретической скорости истечения. Объясняется это тем, что некоторая часть энергии, которой обладает находящаяся в сосуде жидкость, затрачивается на преодоление возникающих при её движении гидравлических сопротивлений, и на создание скорости идёт меньший напор, чем это было принято ранее. Отношение действительной скорости истечения к теоретической называется коэффициентом скорости и обычно обозначается через φ ; следовательно:

$$\varphi = \frac{v_D}{v_T} = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta}},$$

откуда коэффициент сопротивления ζ , выражается через коэффициент скорости следующим образом:

$$\zeta = \frac{1}{\varphi^2} - 1.$$

Истечение жидкости при переменном напоре.

Задача об истечении жидкости при переменном напоре обычно сводится к определению времени опорожнения или наполнения всего или некоторой части сосуда в зависимости от начального наполнения, формы и размеров сосуда и отверстия.

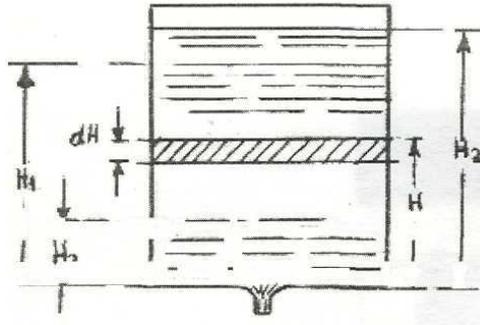


Рис.9.9

Рассмотрим в качестве простейшего, случай истечения в атмосферу через донное отверстие площадью/ из открытого вертикального цилиндрического сосуда, одинакового по всей высоте поперечного сечения F (рис. 9.9.). Элементарный объём жидкости dQ , прошедший через отверстие за бесконечно малый промежуток времени dT , в течение которого уровень жидкости в сосуде можно приближённо принимать постоянным, будет равен:

$$dQ = \mu f v dT = \mu f \sqrt{2gH} dT,$$

где: H — глубина жидкости в сосуде для некоторого положения её уровня;

μ — коэффициент расхода (изменяющийся в зависимости от напора и от формы и размеров отверстия).

С другой стороны, за это же время уровень жидкости в сосуде опустится на величину dH и объём жидкости в нём изменится на:

$$dV = -F dH$$

В силу неразрывности движения:

$$dQ = -F dH'$$

или:

$$\mu f \sqrt{2gH} dT = -FdH,$$

откуда:

$$dT = -\frac{FdH}{\mu f \sqrt{2gH}}.$$

Полное время опорожнения сосуда определяется в результате интегрирования последнего уравнения:

$$\int_0^T dT = -\int_{H_0}^0 \frac{FdH}{\mu f \sqrt{2gH}},$$

где: H_0 — глубина жидкости в сосуде до начала истечения.

Меняя пределы интегрирования в правой части, делая допущение $\mu = \text{const}$ и вынося постоянные за знак интеграла, будем иметь:

$$T = \frac{F}{\mu f \sqrt{2g}} \int_0^H \frac{dH}{\sqrt{H}}$$

что после интегрирования приводит к окончательному выражению:

$$T = \frac{2F}{\mu f \sqrt{2g}} \sqrt{H}. \quad (9.3)$$

9.3. Классификация отверстий и основные характеристики истечения жидкости.

В гидравлике различают истечения через отверстия в тонкой и толстой стенке (насадки); в зависимости от условий сжатия струи бывают отверстия с совершенным и несовершенным, а также с полным и неполным сжатием.

Отверстием в тонкой стенке называется такое отверстие, края которого имеют острую кромку, причём толщина стенки не влияет на форму и условия истечения струи.

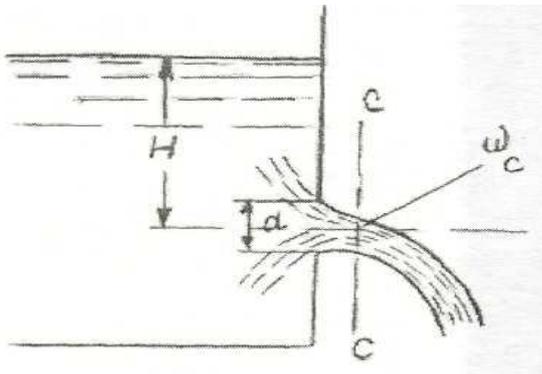


Рис.9.10

Имеет место так называемое сжатое сечение, имеющее наименьшую площадь и практически параллельно-струйное течение; далее, струя падает под действием силы тяжести. На рис. 9.11 показано в большом масштабе сжатое сечение С-С.

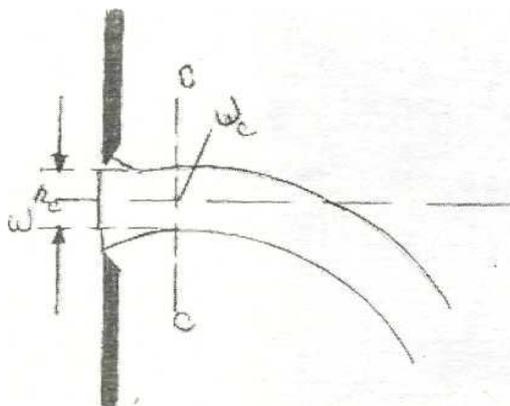


Рис.9.11

Струя, вытекающая из отверстия, не сохраняет его форму, а вследствие действия сил поверхностного натяжения постепенно деформируется. Это явление носит название инверсии струи. Так например, струя, вытекающая из треугольного отверстия, принимает форму треугольной звезды, а струя, вытекающая из круглого отверстия, постепенно приобретает сечение эллипса.

Отверстием с совершенным сжатием называется такое отверстие, границы которого достаточно удалены от границ жидкости в резервуаре, причём стенки резервуара не влияют на условия сжатия струи. Опытом установлено, что стенки резервуара влияют на сжатие струи только тогда, когда расстояние отверстия от боковой стенки или дна меньше трёх диаметров для круглого отверстия или трёхкратной величины стороны - для прямоугольного отверстия.

Отверстием с несовершенным сжатием называется такое отверстие, одна или несколько сторон которого находятся на близком расстоянии от поверхности жидкости или стенки резервуара. На рис. 9.12 отверстие I - с совершенным сжатием, а отверстие II - с несовершенным.

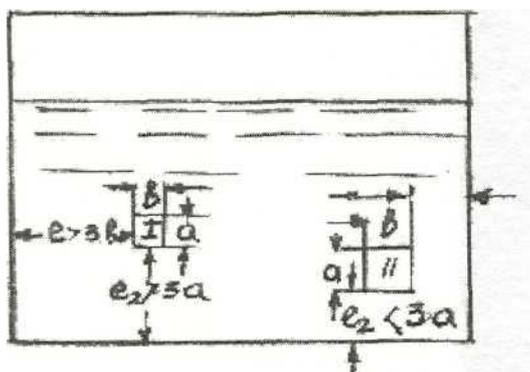


Рис. 9.12.

Отверстием с полным сжатием называется такое отверстие, в котором струя испытывает сжатие со всех сторон.

Отверстием с неполным сжатием называется такое отверстие, в котором струя не имеет сжатия с одной или нескольких сторон. Отверстием с неполным сжатием называется такое отверстие, в котором струя не имеет сжатия с одной или нескольких

сторон. Примером его может служить донное отверстие, в котором по дну сжатие отсутствует, а струя сжимается только с трёх сторон (рис. 9.20).

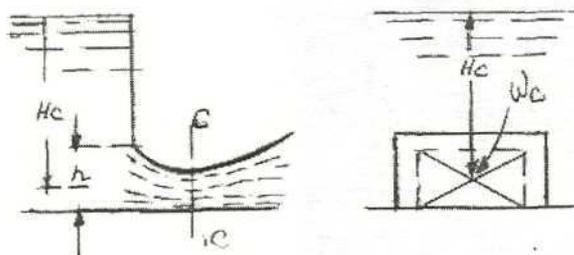


Рис. 9.13

Для оценки степени сжатия струи в гидравлике применяется понятие о коэффициенте сжатия струи. Коэффициентом сжатия струи ε называется отношение площади сжатого сечения к площади отверстия.

$$\frac{\omega_c}{\omega} = \varepsilon$$

Установлено, что для отверстий небольших размеров с острыми кромками: $\varepsilon = 0,64-0,60$

В малых отверстиях (с размером стороны по вертикали не более 0,1 Н) коэффициент сжатия ε является достаточно постоянным, тогда как в больших отверстиях он изменяется в зависимости от ряда факторов, в том числе от напора H и размеров отверстия.

Контрольные вопросы:

1. Как происходит истечение жидкости через малое круглое отверстие и насадки?
2. Приведите практическую и теоретическую формулу скорости и расхода жидкости при ее истечении через малое отверстие.
3. Понятие сжимаемость? Расскажите о скорости и коэффициенты расхода жидкости?
4. Как происходит истечение жидкости через насадку?
5. Какие виды насадок вы знаете?
6. Принцип работы конических расходящихся насадок?
7. Где применяются конические сходящиеся насадки?
8. Принцип работы коноидальных расходящихся насадок?
9. Как происходит истечение жидкости при переменном напоре?

Опорные слова: водослив, классификация отверстий, скорость и коэффициенты расхода жидкости, истечение жидкости при переменном напоре, сжимаемость, характеристики истечения жидкости.

Лекция 10
Взаимодействие потока ствердым телом и расчёт газопроводов
Технология обучения на лекцию № 10

Время - 2 час	Количества студентов: 20-30 чел
Форма учебного занятия	Введение, визуальная лекция
План учебного занятия	1.Сложные трубопроводы. 2. Взаимодействие потока с твёрдым телом. 3. Движение газов в трубопроводах. 4.Расчёт газопроводов.
<i>Цель учебного занятия:</i> ознакомить студентов методы снижения гидравлического удара, сложные трубопроводы, движение газов в трубопроводах, научить производить расчёт коротких трубопроводов и и сифонов и сложных трубопроводов, газопроводов.	
<i>Задачи преподавателя:</i>	<i>Результаты учебной деятельности:</i> Студент должен узнать: -гидравлические расчёты коротких трубопроводов и сифонов; -гидравлические расчёты сложных трубопроводов; -активные и реативные взаимодействие между струей и твёрдой преградой; -движение газов в трубопроводах;
Средства обучения	Лазерный проектор, визуальные материалы, информационное обеспечение.
Формы обучения	Коллективная, фронтальная работа, работа в парах. Графорганазеры
Условия обучения	Аудитория, приспособленная для работы с ТСО.

Технологическая карта лекции (10-е занятие)

Этапы, время	Деятельность	
	преподавателя	студентов
1 этап. Введение (10 мин.)	1.1. Сообщает, тему, цель, планируемые результаты учебного занятия и план его проведения.	1.1. Слушают, записывают.
2 этап. Основной (60 мин.)	<p>2.1. С целью актуализировать знания студентов задает фокусирующие вопросы:</p> <p>2.3. Последовательно излагает материал лекции по вопросам плана, использует визуальные материалы.</p> <p>Акцентирует внимание на ключевых моментах темы, предлагает их записать</p>	<p>2.1. Слушают. По очереди отвечают на вопросы. Слушают правильный ответ.</p> <p>2.3. Обсуждают содержание схем и таблиц, визуальные материалы, уточняют, задают вопросы. Записывают главное.</p>
3- этап. Заключительная (10 мин.)	<p>3.1. Проводит блиц-опрос. Делает итоговое заключение. Дает задание для самостоятельной работы.</p> <p>3.2 Составить кластер на слово «лопастные гидромашины». Ставить оценки.</p>	<p>3.1. Отвечают на вопрос.</p> <p>3.2. Слушают, записывают.</p>

Взаимодействие потока с твёрдым телом.

Активное и реактивное взаимодействие между струёй и твёрдой преградой.

Активное взаимодействие между струёй и твёрдой преградой имеет место в случае, когда струя, вытекающая из сопла, наталкивается на неподвижную или подвижную преграду, например, в виде выпуклой изогнутой пластинки (рис.10.1). После удара о пластинку струя растекается по её поверхности со скоростью c . В центре пластинки вихревая зона. При этом струя отклонится от своего первоначального направления на угол ε , вследствие чего пластинка будет испытывать силу давления X в направлении оси сопла $S-S$. Сила X является силой активного давления струи на неподвижную пластинку.

Силу активного давления струи на преграду определим, применив теорему об изменении количества движения к отсеку жидкости между сечениями $0-0$, $1-1$, $1-1$. Примем за ось проекций ось сопла $S-S$.

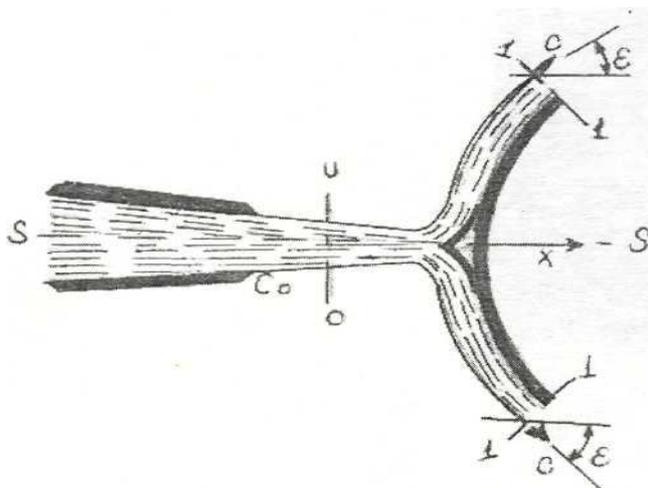


Рис. 10.1

Составим проекцию на эту ось изменения количества движения за время Δt , которая должна быть равна проекции импульса силы за то же время:

$$mc_0\Delta t - \frac{m}{2}c \cdot \cos \varepsilon\Delta t - \frac{m}{2}c \cdot \cos \Delta t = X\Delta t$$

где: m — масса жидкости, вошедшей в отсек через сечение $0-0$ за время Δt .

Принимая $c_0 = c$ (потерями энергии на участке потока между сечениями $0-0$ и $1-1$ можно пренебречь), имеем:

$$X\Delta t = mc_0(1 - \cos \varepsilon)\Delta t$$

Полагая $\Delta t = 1$ сек, окончательно получим:

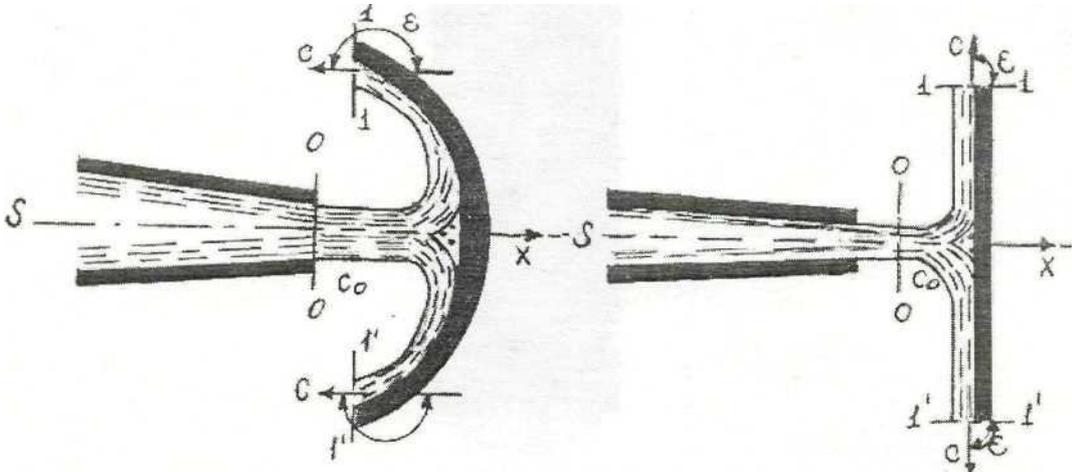
$$X = pQc_0(1 - \cos \varepsilon) \tag{10-1}$$

где: Q — расход сопла.

Если пластинка вогнутая (рис. 10.2). то угол ω больше 90° , а $\cos \varepsilon$ имеет отрицательное значение. Поэтому. Согласно зависимости (10-1), активное давление для

вогнутой пластинки будет больше, чем для выпуклой. В частном случае, когда $\varepsilon = 90^\circ$ и $\cos \varepsilon = 0$ (рис. 10.3),

$$X = pQc_0 = \frac{\rho}{g} Qc_0^2 \quad (10-2)$$



Предположим, что площадь сечения сопла равна ω и сопло закрыто плоской задвижкой. Тогда давление на задвижку равно:

$$P = \gamma \omega H.$$

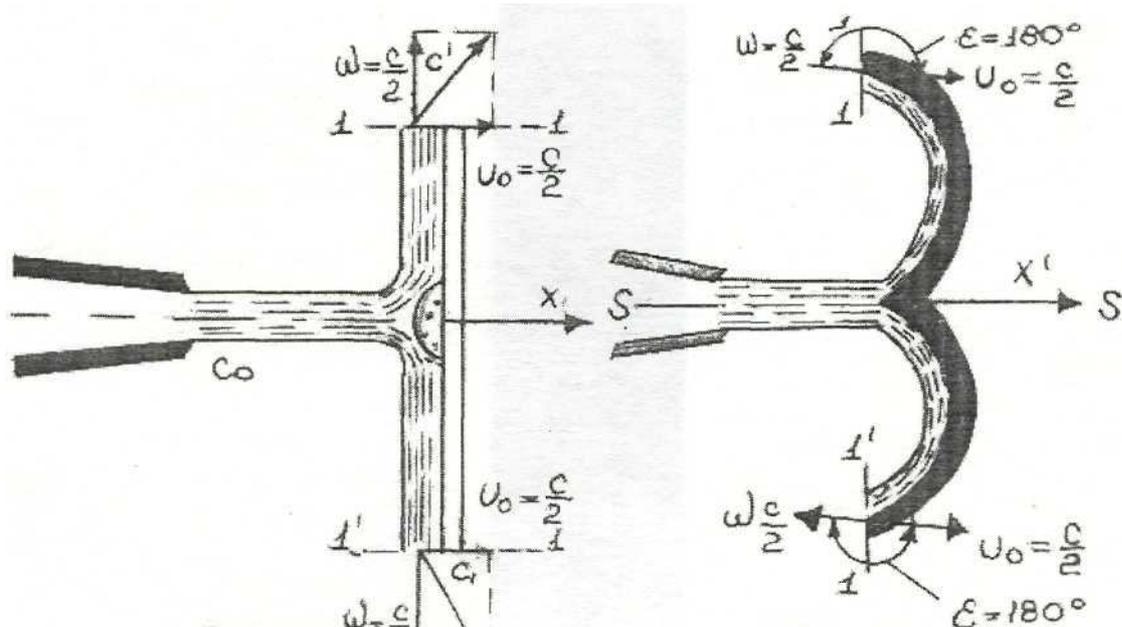
где: H — напор над центром тяжести сопла.

С другой стороны, $c_0 = \sqrt{2gH}$ (если $\varphi \cong 1$) и $Q = \omega c_0$. Тогда активное давление X может быть представлено такой зависимостью:

$$X = \frac{\gamma}{g} Qc_0^2 = \frac{\gamma}{g} \omega c_0^3 = 2\gamma \omega H.$$

Следовательно, активное давление потока на плоскую пластинку в 2 раза больше того гидростатического давления, которое действовало бы на закрытую задвижку сопла при напоре H , соответствующем скорости.

Рассмотрим взаимодействие струи и системы пластинок, движущихся со скоростью и (примером такого взаимодействия может служить схема



ковшовой турбины, показанная на рис. 10.5. Обозначим через X активное давление струи на движущуюся пластинку (рис. 10.4). В этом случае жидкость будет двигаться вместе с пластинкой со скоростью u и одновременно передвигаться по пластинке с относительной скоростью w . Так как скорости имеют одно направление, то относительная скорость движения струи по пластинке будет равна $w=c_0-u$ и активное давление выразится зависимостью:

$$X' = \frac{\gamma}{g} Q \omega = \frac{\gamma}{g} Q (c_0 - u). \quad (10-3)$$

Мощность равна произведению силы на путь за 1 сек

$$N = X'u = \frac{\gamma}{g} Q (c_0 - u) u = \frac{\gamma}{g} Q c_0 u - \frac{\gamma}{g} Q u^2. \quad (10-4)$$

Уравнение (10-4) представляет собой функцию $N = f(u)$ при $Q = \text{const}$ и $c_0 = \text{const}$. Если пластинка неподвижна, то активное давление будет максимальным, но мощность равна нулю. При $u = c_0$ активное давление X и мощность равны нулю:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{du} &= \frac{\gamma}{g} Q c_0 - 2 \frac{\gamma}{g} Q u = \frac{\gamma}{g} Q (c_0 - 2u) = 0, \\ u &= \frac{c_0}{2}. \end{aligned} \quad (10-5)$$

Таким образом, в результате взаимодействия струи и систем вертикальных плоских пластинок, движущихся со скоростью и используется только половина энергии, которой обладает струя, вытекающая из сопла.

Определим, где сосредоточена оставшаяся неиспользованная кинетическая энергия. Вода при сходе с пластинок имеет относительную скорость:

$$w = c_0 - u_0 = c_0 - \frac{c_0}{2} = \frac{c_0}{2}.$$

Абсолютная скорость при сходе струи с пластинок c' равна (рис. 10.4), а кинетическая энергия составляет величину:

$$\frac{mc_0^2}{2} = \frac{\frac{\gamma}{g} \cdot Qc_0^2}{4} = \frac{\gamma Qc_0^2}{4g}.$$

Таким образом, неиспользованная часть энергии заключена в струе, сходящей с пластинок. Если вместо пластинок установить лопасти в виде ковшей (рис. 10.5), то можно увеличить использование энергии. В этом случае струя разделяется на две равные части, из которых каждая обтекает своё полушарие, и угол поворота струи равен $\varepsilon = 180^\circ$. Сила давления на неподвижную лопасть такой конфигурации будет равна:

$$X = \frac{\gamma}{g} Qc(1 - \cos 180^\circ) = \gamma g Qc 2 = 2 \frac{\gamma}{g} Qc, \quad (10-6)$$

т.е. в два раза больше, чем на вертикальную; плоскую пластинку. Можно показать, что и для лопастей ковшовой турбины наибольшая мощность получится при абсолютной (переносной) скорости. и $u = \frac{c_0}{2}$ чему

соответствует

$$N_0 = X'u_0 = X' \frac{c_0}{2} \quad (10-7)$$

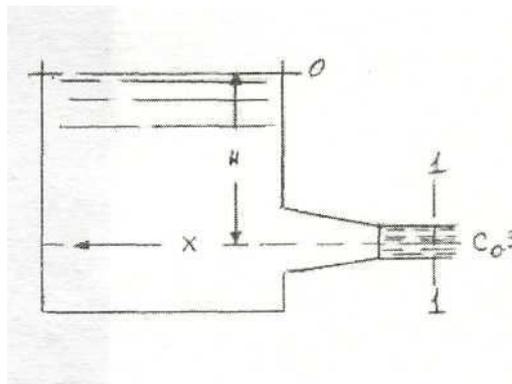
наибольшая возможная мощность:

С другой стороны,

$$X' = 2 \frac{\gamma}{g} Qw = 2 \frac{\gamma}{g} Q \frac{c_0}{2} \left(c_0 - \frac{c_0}{2} \right) = 2 \frac{\gamma}{g} Q(c_0 - u_0) = \frac{\gamma}{g} Qc_0.$$

Таким образом, при взаимодействии струи с движущимися лопастями ковшовой турбины теоретически используемая мощность равна полной кинетической энергии струи, вытекающей из сопла. В действительности она несколько меньше из-за наличия потерь энергии при обтекании лопастей.

Реактивное взаимодействие между струей и твёрдым телом имеет место в случае вытекания струи из какого-либо сосуда. При этом на стенку сосуда по оси отверстия действует реактивная сила, которая стремится переместить сосуд в сторону, противоположную движению струи (рис. 10.6).



Реактивную силу определим, применив закон количества движения к объёму жидкости между сечениями 0-0 и 1-1. За ось проекции примем линию $S-S$, проходящую через центр тяжести отверстия. Так как жидкость в сосуд не поступает, а вытекает через отверстие, то проекция изменения количества движения между сечениями 0-0 и 1-1 на ось $S-S$, равная проекции импульса сил, выразится зависимостью:

$$0 - mc_0 = X$$

откуда:

$$X = \frac{\gamma}{g} Q c_0 = \frac{\gamma}{g} \omega c_0^2 \quad (10-9)$$

Но так как

$$c_0 = \sqrt{2gH} \quad \text{при} \quad \varphi \approx 1,0$$

$$X = -\frac{\gamma}{g} w 2gH = -2\pi wH.$$

Следовательно, реактивная сила, возникающая при вытекании жидкости из сосуда, направлена в сторону, противоположную движению струи. При этом реактивная сила в два раза больше силы гидростатического давления, которая действовала бы на плоскую задвижку в случае закрытия отверстия. В этом отношении мы имеем полную аналогию с активным давлением.

Предположим, что сосуд будет перемещаться под действием реактивной силы. Тогда в результате взаимодействия струи и сосуда будет произведена работа. На этом принципе основано действие реактивных турбин, в которых струи, вытекая из каналов (сосудов), образованных лопастями рабочего колеса, создают реактивную силу. Сила же реактивного давления обуславливает образование в турбине вращающего момента, приводящего в движение рабочее колесо щего

10.2. Движение газов в трубопроводах.

В промышленности и коммунальном хозяйстве весьма широко применяется (для различных технических и бытовых целей) перекачка по трубам газообразных жидкостей - газов, воздуха и перегретого пара. Транспортировка этих жидкостей (газов) по трубопроводам по сравнению с движением обычных капельных жидкостей характеризуется рядом существенных особенностей, обусловливаемых различиями физических свойств капельных и газообразных жидкостей.

При движении газа по трубопроводу постоянного поперечного сечения, ввиду неизбежных потерь напора, давление газа, обычно превышающее атмосферное давление в начальном сечении, в дальнейшем по длине трубопровода непрерывно снижается. При этом происходит расширение газа, удельный объём газа увеличивается, а удельный вес, наоборот, уменьшается; указанное изменение удельного веса газа, в отличие от случая капельных жидкостей, оказывается весьма существенным и должно учитываться при расчёте.

В случае установившегося движения весовое количество газа, проходящего через любое поперечное сечение трубопровода в единицу времени (весовой расход газа G), в силу неразрывности движения остаётся неизменным; объёмный же расход газа $Q = \frac{G}{\gamma}$ будет увеличиваться, а следовательно, будет возрастать по длине трубопровода и величина средней скорости течения газа

$$v = \frac{Q}{F} .$$

В общем случае вследствие расширения газа и явления теплообмена будет иметь место также и непрерывное изменение температуры газа по длине трубопровода. Однако в ряде случаев оказывается вполне возможным принять температуру постоянной, считая, таким образом, что процесс расширения газа происходит изотермически.

При изотермическом процессе, ввиду постоянства температуры, будет сохранять постоянное значение по длине трубопровода также и величина абсолютной вязкости газа (изменение вязкости с изменением давления становится ощутимым лишь при весьма больших колебаниях давления и при расчётах для обычных условий не принимаются во внимание). При этом, как нетрудно убедиться, останется постоянным и число Рейнольдса.

В самом деле: $Re = \frac{vd}{\nu}$

но так как: $\nu = \frac{\mu}{\rho}, \nu = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4G}{\gamma \pi d^2}$

то число Рейнольдса можно представить также следующим образом:

$$Re = \frac{4G}{\mu g \pi d}$$

$$\frac{\rho}{\gamma} = \frac{1}{g}$$

Учитывая, что:

получим окончательно: $Re = \frac{4G}{\mu g \pi d}$

В правую часть полученного выражения входят лишь такие величины, которые сохраняют постоянное значение по длине трубопровода; следовательно, постоянным по длине трубопровода будет и число Рейнольдса, а также, следовательно, являющийся

функцией этого числа и коэффициент гидравлического сопротивления λ ,. Исходным уравнением

для определения падения давления и расхода газа в газопроводе является обычное уравнение Бернулли. Однако, учитывая отмеченные выше особенности, наблюдающиеся при движении газа в газопроводе (изменение удельного веса газа и средней скорости его течения по длине газопровода), это уравнение в рассматриваемом случае необходимо писать в дифференциальной форме.

$$dz + \frac{dp}{\gamma} + \frac{dv^2}{2g} = -\lambda \frac{dL}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

или

$$-\frac{dp}{\gamma} = \lambda \frac{dL}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} + dz + \frac{dv^2}{2g} \quad (10-11)$$

Подсчёты показывают, что второй и третий члены правой части этого уравнения в обычных на практике условиях движения газов (при горизонтальном расположении трубопровода и малых дозвуковых скоростях течения) оказываются малыми по сравнению с первым членом, учитывающим сопротивление движению, и поэтому ими можно пренебречь.

Тогда вместо уравнения (10-11) будем иметь:

$$-\frac{dp}{\gamma} = \lambda \frac{dL}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Выражая далее среднюю скорость течения газа через весовой расход:

$$v = \frac{G}{\gamma F}$$

получим

$$-\frac{dp}{\gamma} = \lambda \frac{dL}{d} \cdot \frac{G^2}{2g\gamma^2 F^2}$$

или

$$-\gamma dp = \lambda \frac{dL}{d} \cdot \frac{G^2}{2gF^2} \quad (10-12)$$

Для изотермического течения газа по закону Бойля:

$$\gamma = \frac{p\gamma_1}{p_1}$$

где: p_1 и γ_1 - давление и удельный вес газа в начале трубопровода.

Подставим полученное значение γ в уравнение (10-12) и проинтегрируем это уравнение в пределах от p_1 до p_2
 где: p_2 — давление в конце трубопровода, длиной L ;

$$-\frac{\gamma_1}{p_1} \int_{p_1}^{p_2} p dp = \frac{\lambda G^2}{d 2g F^2} \int_0^L dL$$

Контрольные вопросы:

1. От каких показателей зависит сила потока действующие на преграды?
2. Чему равна сила реакции?
3. Объясните силу потока действующего на стенки под разными углами.
4. Применение в технике силы действующей на стенки.
5. Объясните разницу уравнения Бернулли.

Опорные слова: прижимает клапан, гаситель, приемный резервуар, реактивная сила, потери напора, активное и реактивное взаимодействие, энергия струи, **движение газов в трубопроводах**, расчёт газопроводов, твёрдая преграда.

**ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС» в г. Алмалык**

***МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЕ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ***

по предмету

«Гидравлика»

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ
НА ПРИБОРЕ РЕЙНОЛЬДСА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Визуальное наблюдение ламинарного и турбулентного режимов движения.
2. Определение значений числа Рейнольдса при ламинарном и турбулентном режимах движения.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

При движении жидкости в трубопроводе (канале) возможны два режима течения - ламинарный и турбулентный.

Ламинарный режим характеризуется параллельно-струйным движением, при котором отдельные слои жидкости перемещаются, не смешиваясь между собой. Такое движение возникает при малых скоростях и малых живых сечениях потока жидкости, при движении по капиллярам, при движении вязких жидкостей (нефть, мазут, масла), при движении в порах грунта и т.д.

Для турбулентного режима характерно неупорядоченное, хаотическое движение, когда частицы жидкости перемещаются по сложным, всё время изменяющимся, траекториям. Вследствие наличия в турбулентном потоке поперечных к направлению движения составляющих скорости, в жидкости происходит интенсивное перемешивание. В инженерной практике при движении воды и др. жидкостей малой вязкости (керосин, бензин, спирт и др.), в системах отопления, вентиляции, газоснабжения, теплоснабжения, водоснабжения чаще всего наблюдается турбулентный режим.

Существование двух режимов движения жидкости было наглядно показано английским физиком О. Рейнольдсом. Опыты Рейнольдса, подтверждённые позднее др. учёными, показали, что критерием для определения режима движения жидкости в круглой трубе является выражение:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} ,$$

где Re - безразмерный критерий, называемый числом Рейнольдса:

V - средняя скорость движения жидкости, см/с;

d - диаметр трубы, см;

ν - кинематический коэффициент вязкости, см²/с.

Значение числа Рейнольдса, опыты Рейнольдса при котором происходит переход от ламинарного режима к турбулентному, называется критическим числом Рейнольдса - $Re_{кр}$

При $Re < Re_{кр}$ режим движения является ламинарным, при $Re > Re_{кр}$ турбулентным.

В определенном диапазоне чисел Re существует неустойчивая область, где возможны оба режима в зависимости от характера изменения скоростей. Величина критического числа $Re_{кр}$ зависит от ряда обстоятельств: условий входа в трубу, шероховатости стенок трубы, отсутствия или наличия первоначальных возмущений и т.д. и может принимать в каждом отдельном случае различные значения.

Для круглых труб обычно принимают $Re_{кр} = 2320$. Скорость, при которой турбулентный режим переходит в ламинарный режим движения жидкости, называется критической скоростью.

При $Re \leq 2320$ – режим ламинарный.

При $Re > 2320$ - режим турбулентный.

ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Опытная установка (рис. 1.1) состоит из напорного бака /1/, в который по трубопроводу /2/ поступает вода из водопроводной сети. Для поддержания постоянного уровня воды в баке имеется водослив /4/. Внутри бака установлена решётка /5/, служащая для успокоения поступающей в него воды, и термометр /8/ для измерения температуры воды.

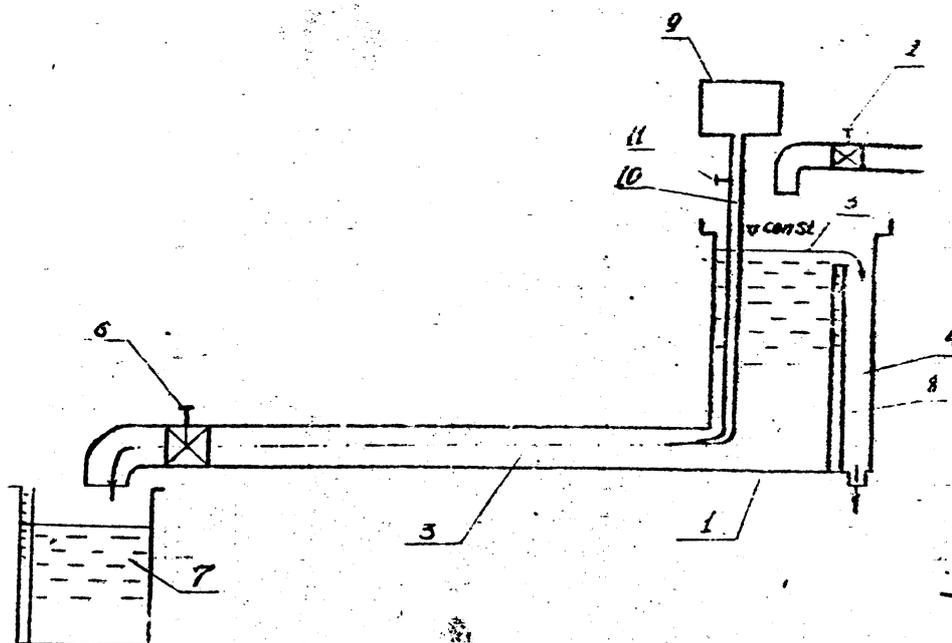


Рис.1.1.

Схема опытной установки

К баку /1/ присоединена стеклянная трубка /3/, в конце которой установлен кран /6/ для регулирования скорости движения воды. Расход воды определяется с помощью мерного бака /7/. Установка имеет небольшой бачок /9/ для красителя с трубкой /10/ и краником /11/.

В опыте режим движения наблюдается в основной стеклянной трубе /3/ при введении в основной поток красителя. Изменение режима достигается путём регулирования расхода жидкости через трубу с помощью крана /6/.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

1. При закрытых краниках /6/ и /11/ заполняют напорный бак /1/ водой.
2. Незначительным открытием крана /6/ устанавливают в трубе /3/ расход жидкости, при котором имеет место медленное течение.
3. Приоткрыв кран /11/, вводят в основной поток краситель. Наблюдают характер движения жидкости в стеклянной трубе. Струйчатое движение краски будет свидетельствовать о наличии ламинарного режима. Постепенно увеличивают открытие крана /6/ и наблюдают изменение режима движения с увеличением скорости. Сначала подкрашенная струйка приобретает волнистый характер и ламинарный режим становится неустойчивым. При дальнейшем увеличении скорости цветная струйка исчезает, вся жидкость равномерно окрашивается – ламинарный режим движения перешёл в турбулентный.
4. При установившемся движении определяется расход воды в трубе. Для каждого режима движения определяется объём поступившей в мерный бак воды W за время t , одновременно регистрируется температура воды.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Кинематический коэффициент вязкости ν определяют из таблицы.

Таблица 1.1

Температура воды в град. С ⁰	0	5	10	15	20	25
Кинематический коэф. вязкости ν , см ² /с	0,0173	0,015	0,0131	0,0114	0,0102	0,0090

1. Расход воды:

$$Q = \frac{W}{t} \text{ (см}^3\text{/с),}$$

где W – объём воды в мерном баке, см³.

t – время заполнения бака, с.

Средняя скорость движения жидкости в трубе $V = \frac{Q}{\omega}$ (см/с);

где ω – площадь живого сечения, трубы, см²

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

d – диаметр стеклянной трубы, см.

2. По известным d , v , ν вычисляется для каждого опыта значение числа Рейнольдса

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

Результаты измерений и вычислений заносятся в таблицу.

Таблица 1.2

№№	Данные измерений		Данные вычислений			Режим движения	Постоянные величины $d=2,0$ см
	W	t	Q	V	Re		
	см ³	с	см ³ /с	см/с			
1	2	3	4	5	6	7	8

Контрольные вопросы

1. Назовите основные элементы движения жидкости?
2. Что такое траектория, линия тока, элементарная струйка, поток?
3. Назовите гидравлические элементы потока?
4. Что такое расход жидкости?
5. Что такое средняя скорость потока?
6. Какие режимы наблюдается при движении жидкости в трубопроводах?
7. Чем характеризуется ламинарный режим течения?
8. Чем характеризуется турбулентный режим течения?
9. Изобразите графики распределения скоростей по сечению потока при различных режимах сечения?
10. Какой вид должен подкрашенная струйка при ламинарном режиме?
11. Какой вид имеет подкрашенная струйка при турбулентном режиме?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Определение опытным путём значений потенциальной энергии (пьезометрического напора), удельной кинетической энергии (скоростного напора) и полной удельной энергии (гидродинамического напора) в различных сечениях потока.

2. Построение на основе опытных данных пьезометрической и напорной линий для трубопровода переменного сечения.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Уравнение Бернулли для установившегося потока реальной жидкости является частным случаем закона сохранения энергии. Любой движущийся поток жидкости обладает определённой энергией. Эта энергия может быть проявлена в трех формах: в виде энергии положения, энергии давления и кинетической энергии. Соотношение между отдельными видами энергии для движущегося потока устанавливается уравнением Бернулли.

Для потока реальной жидкости при установившемся движении уравнение Бернулли имеет следующий вид для двух произвольных сечений:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_w \quad (1)$$

где z_1, z_2 – вертикальные координаты центров тяжести сечений;
 P_1, P_2 – давление в центрах тяжести;
 V_1, V_2 – средние скорости потока;
 α_1, α_2 – коэффициенты кинетической энергии, учитывающие неравномерности распределения скоростей по живому сечению потока.

В практических расчётах при турбулентном движении коэффициент кинетической энергии можно принимать равным 1,0 - 1,1.

Первый член приведённого уравнения определяет высоту положения центра тяжести живого сечения потока над произвольной горизонтальной плоскостью сравнения $0 - 0$ (рис.2-1) и называется геометрической высотой или геометрическим напором; он характеризует удельную потенциальную энергию положения.

Второй член $\frac{P}{\rho g}$ представляет собой высоту столба жидкости,

соответствующую гидродинамическому давлению в данной точке живого сечения потока и называется пьезометрической высотой, величина его характеризует удельную потенциальную энергию давления.

Сумма геометрической и пьезометрической высот $z + \frac{P}{\rho g}$ называется пьезометрическим напором, величина которого определяет общий запас удельной потенциальной энергии.

Третий член уравнения $\frac{\alpha V^2}{2g}$ называется скоростным напором, который определяет запас удельной кинетической энергии.

Сумма $z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g}$ представляет величину полной удельной энергии потока и называется гидродинамическим напором H .

Последний член в правой части уравнения h_w выражает суммарную потерю напора (энергии) на преодоление гидравлических сопротивлений при движении жидкости между рассматриваемыми сечениями. Изменение гидродинамического напора (полной энергии) в живых сечениях по длине потока относительно произвольно выбранной плоскости сравнения характеризуется напорной линией. Напорная линия строится по сумме трёх членов уравнения Бернулли. Так как часть полной удельной энергии затрачивается на преодоление гидравлических сопротивлений, то напорная линия может также понижаться от сечения к сечению.

Для трубопровода постоянного сечения (рис.2.1а) кинематические характеристики потока постоянны по его длине $\alpha_1 = \alpha_2$, $V_1 = V_2$, поэтому скоростной напор имеет одинаковую величину во всех сечениях $\frac{\alpha V^2}{2g} = \text{const}$. Тогда из уравнений Бернулли получим:

$$h_w = \left(z_1 + \frac{P_1}{\rho g}\right) - \left(z_2 + \frac{P_2}{\rho g}\right)$$

то есть потеря напора на трение равна уменьшению удельной потенциальной энергии (пьезометрического напора) потока и выражается перепадом пьезометрических уровней начальном и конечном сечениях трубопровода.

Поскольку потери на трение пропорциональны длине участка, то напорная и пьезометрическая линии в этом случае представляют собой параллельные опускающиеся прямые.

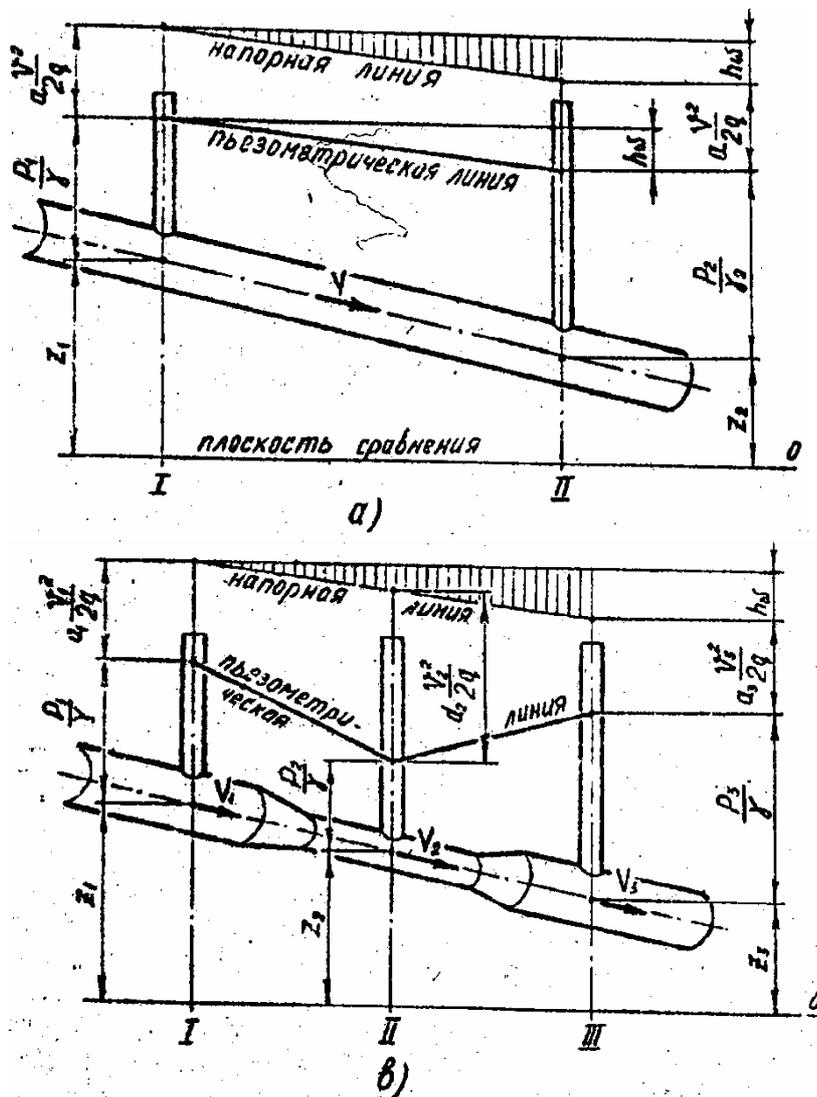


Рис. 2.1 График напоров в трубопроводе:

а) постоянного сечения

б) переменного сечения

В трубопроводе переменного сечения (рис.2.1 б) при движении жидкости происходит преобразование одного вида энергии жидкости в другой, которое сопровождается изменением скорости вдоль потока. Пьезометрическая линия в этом случае может понижаться (при увеличении скорости). Если живое сечение уменьшается по направлению движения, то кинетическая энергия растёт за счёт уменьшения потенциальной энергии. И наоборот, если живое сечение потока увеличивается, то кинетическая энергия уменьшается, а потенциальная – растёт.

ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Опытная установка для изучения уравнения Бернулли (рис.2.2) состоит из напорного бака /1/, заполняемого из водопроводной сети через кран /5/, трубопровода с горизонтальной осью /2/ переменного сечения с диаметрами D и d и мерного бака /7/. Постоянный горизонт воды в баке поддерживается с помощью водослива /4/. Благодаря постоянству уровня в баке /1/ движение жидкости в трубе будет

установившимся. В шести характерных сечениях трубопровода установлены пьезометры /3/, нуль шкалы которых совпадает с осью трубы. По показаниям пьезометров определяются пьезометрические напоры в сечениях I – VI. Регулирование расхода через трубу производится краном /6/. Расход определяется объёмным способом по уровню воды в мерном баке.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

1. Напорный бак /1/ заполняется водой.
2. Проверяется отсутствие воздуха в пьезометрах.
3. При некотором открытии крана /6/ добиваются установившегося движения жидкости в трубе, свидетельством чего является неизменность уровня воды в пьезометрах.
4. Для данного режима движения измеряют объём жидкости W , поступивший в мерный бак /7/ за время опыта t /
5. Одновременно с замером объёма жидкости снимают показания пьезометров /3/.
6. Результаты замеров заносятся в таблицу 2.1.

Вертикальное расстояние z от оси трубопровода до плоскости сравнения принимают в расчётах $z=0,7$ м.

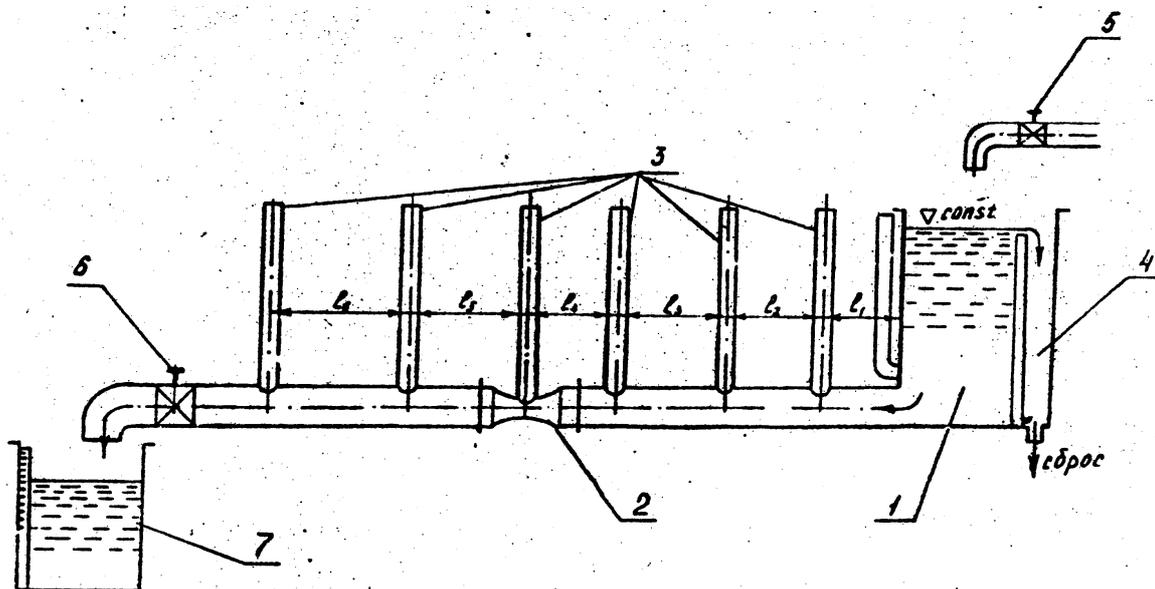


Рис.2.2 Схема опытной установки

Таблица 2.1.

№№	Показания пьезометров						W	t	Постоянные величины D=2,0 см, d=1,0 см z=0,7 м, L=1,0
	$\frac{P_1}{\rho g}$	$\frac{P_2}{\rho g}$	$\frac{P_3}{\rho g}$	$\frac{P_4}{\rho g}$	$\frac{P_5}{\rho g}$	$\frac{P_6}{\rho g}$			
	см	см	см	см	см	см	см ³	с	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Таблица 2.2

№№	Показатели	Единицы измерений	Номера живых сечений					
			I	II	III	IV	V	VI
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Диаметр трубы	см						
2.	Живое сечение	см ²						
3.	Средняя скорость	см/с						
4.	Удельная кинематическая энергия	см						
5.	Удельная потенциальная энергия	см						
6.	Полная удельная энергия	см						
7.	Потери напора	см						

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Расход жидкости

$$Q = \frac{W}{t} \text{ (см}^3\text{/с)}$$

2. Средние скорости в каждом сечении потока:

$$V = \frac{Q}{\omega} \text{ (см/с)}$$

Где ω – площадь живого сечения трубопровода

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4} \text{ (см}^2\text{)}$$

3. Удельная потенциальная энергия

$$E_{п} = Z + \frac{P}{\rho g} \text{ (см)}$$

4. Удельная кинетическая энергия

$$E_{к} = \frac{\alpha V^2}{2g} \text{ (см)}$$

5. Полная удельная энергия

$$Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g} \text{ (см)}$$

6. Потери энергии

$$h_w = E_1 - E_i$$

где E_1 – полная удельная энергия в 1 - ом сечении,

E_i - полная удельная энергия в i - ом сечении.

Контрольные вопросы

1. Что такое установившееся движения жидкости. Назовите другие виды движения и дайте их характеристику?
2. Какой основной смысл уравнения неразрывности?

3. Какой смысл уравнения Д. Бернулли?
4. Условия применения Д. Бернулли?
5. Что такое гидродинамический напор?
6. Что такое пьезометрический напор?
7. Как изменяется пьезометрический и гидравлический уклоны по длине потока?
8. Что такое потери напора?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ТАРИРОВАНИЕ РАСХОДОМЕРА ВЕНТУРИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Освоение методики измерения расхода воды трубой Вентури
2. Тарировка расходомера и построение тарировочного графика

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Для измерения расхода жидкости (газа), равномерно движущего в напорном трубопроводе, используют специальные устройства – сопла, диафрагмы, трубы Вентури.

Применение этих устройств основано на существовании определённой зависимости между перепадом давления (создаваемым в потоке в результате сужения проходного сечения трубы) и расходом жидкости. Для каждого конкретного сужающего устройства эта зависимость может быть найдена из основных уравнений гидравлики: уравнения Бернулли и уравнения неразрывности потока.

Расходомер Вентури представляет собой трубу переменного сечения, состоящую из двух участков – плавно сужающегося и постепенно расширяющегося. Скорость потока в суженном месте возрастает, а давление падает. Возникает разность (перепад) давлений, которая измеряется парой пьезометров, устанавливаемых в начале конуса и на цилиндрическом участке.

Теоретический расход жидкости в трубопроводе может быть определен по формуле:

$$Q = V_4 \omega_4 = \frac{2gh}{\omega_1} \cdot \omega_4 \sqrt{1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}}$$

где

$$\Delta h = \frac{P_3}{\rho g} - \frac{P_4}{\rho g}$$

или

$$Q = C \sqrt{\Delta h}$$

где C -величина, постоянная для данного расходомера и равная

$$C = \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{1 - \frac{\omega_4}{\omega_3}}} \cdot \omega_4$$

Зная величину C и наблюдая за показаниями пьезометров, можно определить расход в трубопровода для любого момента времени по формуле:

$$Q = C\sqrt{\Delta h}$$

Для стандартных расходомеров коэффициенты сопротивлений и постоянные расходомеров приводятся в специальных справочниках. Константу C также можно подсчитать теоретически, но точнее она определяется из эксперимента, т. е. в результате тарировки расходомера. При тарировании результаты опытов удобно представить в виде графика зависимости

$$\Delta h = f(Q).$$

В этом случае можно определять расход непосредственно по графику, не прибегая к расчётам.

ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ.

Установка (рис.3.1) включает: напорный бак /1/, трубопровод /2/, в конце которого установлен кран /6/, мерный бак /7/. В средней части трубопровода смонтирована труба Вентури. Для замера перепада давления к расходомеру присоединены пьезометры /3/ и /4/. Постоянный напор в баке поддерживается с помощью водослива /5/.

Труба Вентури

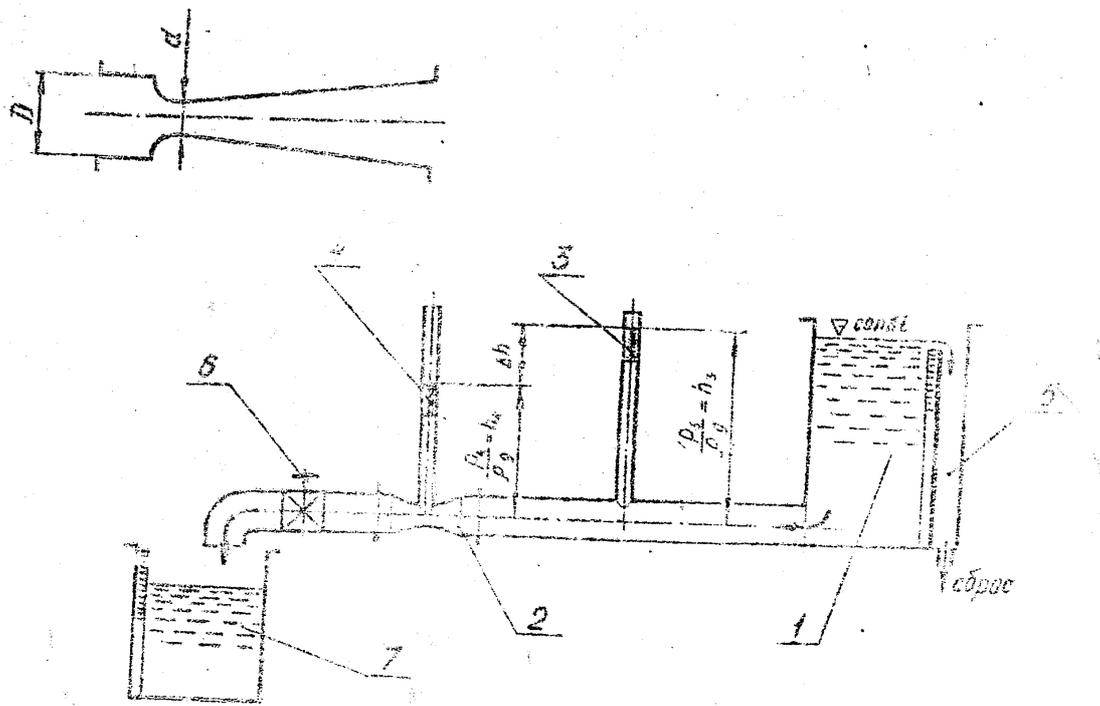


Рис. 3.1. Схема установки для тарирования
расходомера Вентури

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ.

1. Напорный бак /1/ заполняется водой.
2. Проверяется отсутствие воздуха в пьезометрах.
3. С помощью вентиля /6/ в трубопроводе устанавливаются разные расходы воды и для каждого опыта замерыются показания пьезометров.

$$h_3 = \frac{P_3}{\rho g};$$

$$h_4 = \frac{P_4}{\rho g};$$

Всего проводят не менее 5 замеров.

4. Одновременно определяется количество поступившей в мерный бак воды W за время опыта t .

Данные измерений заносятся в таблицу 3.1.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ.

1. Вычисляется действительный расход жидкости

$$Q = \frac{W}{t} \text{ (см}^3\text{/с)}$$

2. Определяется разность показаний пьезометров /3/ и /4/

$$\Delta h = h_3 - h_4$$

3. Вычисляется постоянная расходомера

$$C = \frac{Q}{\sqrt{\Delta h}}$$

4. По результатам опытов строится тарировочный график

$$\Delta h = f(Q).$$

Результаты вычислений заносятся в таблицу.

Таблица 3.1

№	Данные измерений				Расчёты			
	W	T	h ₃	h ₄	Q	Δh	C	C _{ср}
1	2	3	4	5	6	7	8	9

По результатам опытов строится тарировочный график $\Delta h = f(Q)$.

Контрольные вопросы:

1. Для каких потоков применяется трубка Вентури для измерения расхода жидкости.
2. Что себе представляет расходомер Вентури?

Каким способом определяется постоянные коэффициенты для данного расходомера?

ЛАБОРОТОРНАЯ РАБОТА № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО

ТРЕНИЯ ПО ДЛИНЕ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ.

1. Определение опытным путем коэффициента гидравлического трения λ для различных режимов движения жидкости.
2. Определения области сопротивления, выбор расчётных формул для вычисления величины коэффициентов гидравлического трения в зависимости от режима движения жидкости.
3. Сравнение результатов экспериментального определения коэффициентов гидравлического трения с вычисленными по расчётным формулам.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Равномерно движущийся в трубе поток жидкости теряет часть энергии вследствие трения о поверхности трубы, а также внутреннего трения в самой жидкости. Эти потери носят название потерь напора на трение по длине потока.

В соответствии с уравнением Бернулли потери напора по длине определяются как разность полных удельных энергий в двух сечениях рассматриваемого участка трубопровода и для горизонтальной трубы постоянного диаметра могут быть выражены в виде:

$$h_e = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} \quad (1)$$

где $\frac{P_1}{\rho g}$ и $\frac{P_2}{\rho g}$ - пьезометрические напоры в соответствующих сечениях потока.

Уравнение (1) является основным при опытном определении потерь напора на трение.

Для расчета потерь напора на трение при движении жидкости по трубам пользуется формулой Дарси-Вейсбеха:

$$h_e = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения;

V – средняя скорость движения жидкости;

l – длина трубопровода;

d – диаметр трубопровода;

g - ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$,

Формула (2) справедлива для различных режимов движения жидкости. Однако значения коэффициентов λ для ламинарного и турбулентного режимов будут различны и в общем случае λ будет также зависеть от относительной шероховатости стенок трубы, то есть

$$\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{\Delta}{d}\right)$$

где Δ - абсолютный размер выступов шероховатости.

Коэффициент λ определяется на основе опытных данных или по известным эмпирическим зависимостям. Опытном установлено, что при ламинарном течении шероховатость не оказывает влияния на сопротивление движению. Коэффициент λ в этом случае зависит только от числа Рейнольдса и может быть вычислен по формуле:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3)$$

Потери напора при ламинарном потоке пропорциональны скорости в первой степени: $h_e = kV$

В турбулентном потоке у стенок образуется тонкий слой жидкости с ламинарным режимом. Основная масса жидкости (ядро потока), в котором движение турбулентное, связан с этим слоем переходной зоной. Совокупность ламинарного слоя и переходной зоны называют пограничным слоем. Толщина пограничного слоя измеряется долями мм, обозначается δ и зависит от числа Рейнольдса.

Пока средняя величина выступов, образующих шероховатости поверхности трубы (абсолютная эквивалентная шероховатость Δ , меньше толщины пограничного слоя $\Delta < \delta$), турбулентный поток не входит в непосредственный контакт с выступами, шероховатость не влияет на величину потерь напора. Такие поверхности называются гидравлически гладкими.

С увеличением Re толщина пограничного слоя уменьшается и становится меньше выступов шероховатости ($\Delta > \delta$). Выступа входят в турбулентное ядро потока и увеличивает потери напора. Такие поверхности называют гидравлически шероховатыми.

Для характеристики влияния шероховатости на величину потерь вводится понятие эквивалентной относительной шероховатости $\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{d}$,

где d - диаметр трубы.

Зависимость коэффициента гидравлического трения от шероховатости и Re для труб с естественной шероховатостью (технические трубы) представлена на рис. 4.1 (график Никурадзе).

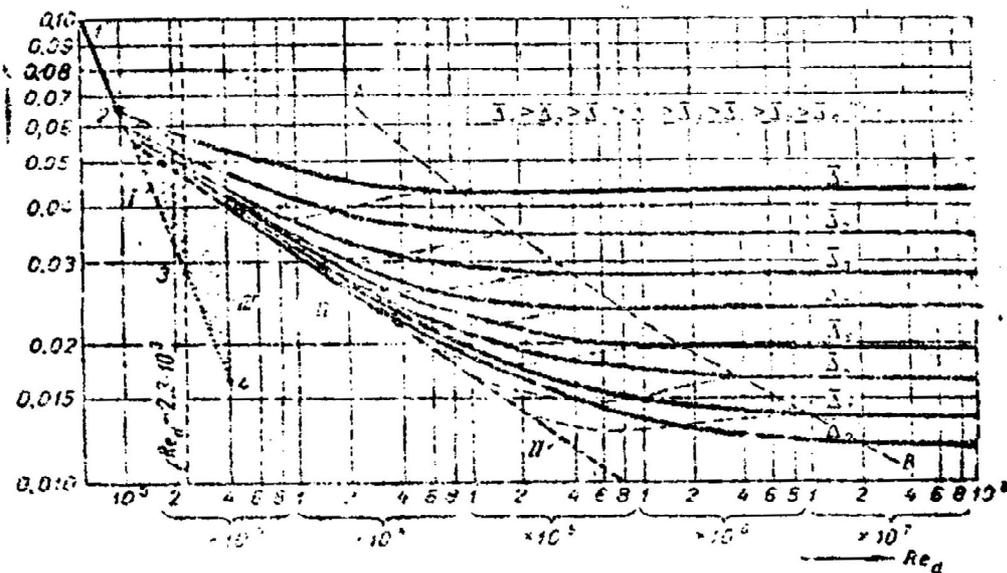


Рис. 4.1 График Никурадзе

Первая зона – зона ламинарного режима, она представлена прямой 1-2-3 (смотри формулу (3)).

Вторая зона – зона, покрытая наклонной штриховкой, является зоной неустойчивого режима. Здесь числа Рейнольдса лежат в пределах от 1000 -2300 до 4000.

Третья зона – зона турбулентного режима. Эта зона располагается правая вертикали III, отвечающей $Re=4000$. Данная зона в свою очередь разбивается на три области сопротивления:

- 1) Область гидравлически гладких труб – прямая с постепенным переходом в кривую для относительной шероховатости $\Delta=0,000005$ при $Re=10^5$. В этой области λ зависит только от числа Рейнольдса и определяется по формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$$

- 2) Область квадратичного сопротивления на графике располагается между линиями I и II. Для определения используется формула Альтшуля:

$$\lambda = 0,11\left(\bar{\Delta} + \frac{68}{Re}\right)^{0,25}$$

- 3) Область квадратичного сопротивления (автомодельная) на графике эта область располагается правее линии II. В этой области потери напора на трение пропорциональны и коэффициент гидравлического трения вычисляется по формуле Шифринсона:

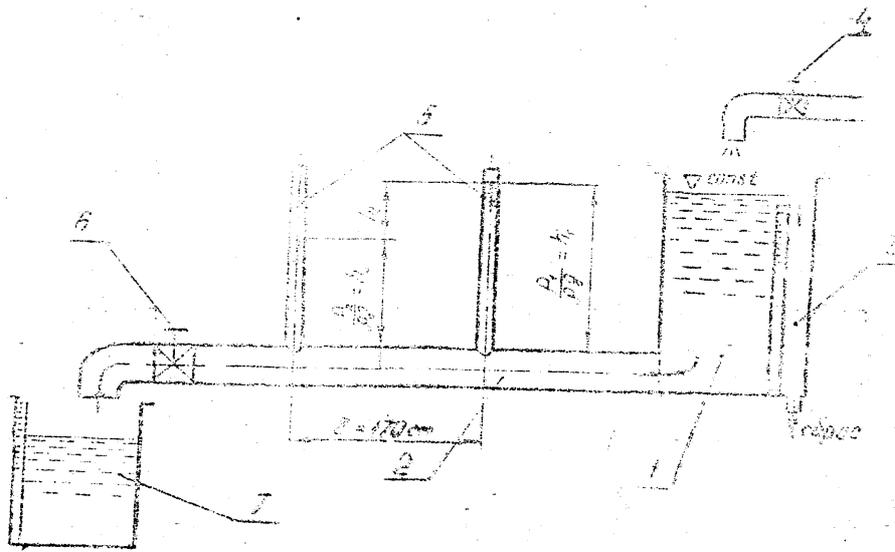
$$\lambda = 0,11(\bar{\Delta})^{0,25}$$

Всё изложенное выше удобно обобщить в таблице 4.1

ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Опытная установка (рис.4.2) состоит из бака /1/ от которого отходит трубопровод /2/ диаметром $d=2,5$ см. Трубопровод имеет прямолинейный участок длиной $l = 170$ см. В начале и конце участка установлены пьезометры /5/.

В баке установлен водослив /3/, поддерживающий постоянный напор. В конце трубы установлен мерный бак /7/. Регулирование расхода воды производится кранами /4/ и /6/.



**Рис. 4.2 Схема установки для определения потерь
напора по длине трубы**

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Напорный бак заполняется водой до постоянного уровня.

Открытием вентиля /6/ в трубопроводе устанавливается режим течения, соответствующий минимальному в опыте расходу жидкости. Рекомендуется провести опыты не менее трех раз при разных открытиях крана /6/.

Для каждого режима определяется:

- А) объем, поступивший в мерный бак W за время опыта t .
- Б) Показания пьезометров h_1 и h_2 .

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Потеря напора на выделенном участке определяется из уравнения Бернулли, составленного для сечений 1-1 и 2-2.

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_e$$

$$\text{т.к. } z_1 = z_2, \quad V_1 = V_2, \quad h_l = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}$$

2. Расход и скорость средняя, движения жидкости в трубопроводе.

$$Q = W/t \quad (\text{см}^3/\text{с}), \quad V = Q/\omega \quad (\text{см}/\text{с}).$$

3. Для определения коэффициента сопротивления λ применяется формула Дарси-Вейсбаха:

$$\lambda = h_l \frac{d}{l} \cdot \frac{2g}{V^2}$$

4. Для определения области сопротивления подчитываются числа Re

$$Re = \frac{Vd}{\nu}$$

5. В зависимости области сопротивления выбирается формула для определения теоретического значения коэффициента гидравлического трения по длине.
 6. Результаты замеров и расчетов заносятся в таблицу 4.2.

Таблица 4.1

Режим Область сопротивления	Турбулентный		
	Гидравлически гладких труб	До квадратичного сопротивления	Квадратичного сопротивления
Общая зависимость коэффициент гидравлического трения	$\lambda = f(Re)$	$\lambda = f(Re, \bar{\Delta})$	$\lambda = f(\bar{\Delta})$
Критерий определения области сопротивления	$Re < Re'_{кр} = \frac{20}{\bar{\Delta}}$	$Re'_{кр} < Re < Re''_{кр}$	$Re > Re_{кр} = \frac{500}{\bar{\Delta}}$
Пример расчетной формулы	$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$	$\lambda = 0,11(\bar{\Delta} + \frac{68}{Re})^{0,25}$	$\lambda = 0,11(\bar{\Delta})^{0,25}$

Таблица 4.2

№	Определение потерь напора по длине			Определение средней скорости				Определение коэффициент гидравлического трения			
	$\frac{P_1}{\rho g}$	$\frac{P_2}{\rho g}$	h_e	W	t	Q	V	$\lambda_{сп}$	Re	Обл. сопр.	λ_T
	См	См	См	см ³	с	см ³ /с	см/с				

Контрольные вопросы:

1. Как определяется потери напора по длине трубопровода с помощью уравнение Д.Бернулли?

2. Приведите формулу потери напора по длине для горизонтального трубопровода с постоянным диаметром?
3. Запишите формулу Дарси - Вейсбаха и покажите область применимость этих формул?
4. Покажите значения коэффициента гидравлического трения для различных режимов движения жидкости?

ЛАБОРОТОРНАЯ РАБОТА № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ.

1. Определить опытным путём значения коэффициентов местных сопротивлений.
2. Сравнить полученные значения коэффициентов с результатами вычислений по теоретическим формулам или приведёнными в справочниках.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.

Одним из важнейших вопросов прикладной гидравлики является определение потерь энергии при движении жидкостей. Частным случаем потери энергии при движении жидкости по трубопроводу является потеря энергии в местных сопротивлениях.

Местные гидравлические сопротивления – это такие элементы трубопроводов, в которых вследствие изменения размеров или конфигурации русла происходит изменение скорости потока, отрыв транзитной струи от стенок русла и возникает вихреобразование. Местные сопротивления встречаются во всех гидравлических системах. Чаще всего это различная запорная арматура (краны, задвижки и т.д.), расширение и сужение сечений потока, повороты, колена и др.

Потери энергий в конечном счёте обусловлены вязкостью жидкости, а следовательно, теряемая механическая энергия рассеивается и переходит в тепловую.

Для вычисления потерь напора, вызванных местными сопротивлениями, используют формулу:

$$h_m = \xi \frac{V^2}{2g},$$

где h_m – потеря напора на местное сопротивление, см;
 V – средняя скорость движения потока, см/с;
 ξ – коэффициент местного сопротивления.

Коэффициент местного сопротивления существенно зависит от вида местного сопротивления, его геометрической формы, скорости течения жидкости, её плотности, вязкости, а также от диаметра трубы, по которой движется поток. Этот коэффициент обычно определяют опытным путём.

1. Для резкого расширения потока (рис. 5 а) величина потерь напора может быть получена теоретически по формуле Борда:
- 2.

$$h_{pp} = \frac{V_d - V_D}{2g}$$

где h_{pp} - потеря напора при резком расширении, см;

V_d – средняя скорость движения жидкости до расширения, см/с;

V_D – то же после расширения.

После преобразования эта формула имеет вид : $h_{pp} = \xi_{pp} \frac{V^2}{2g}$

где - $\xi = \left(\frac{\omega_D}{\omega_d} - 1\right)^2$

ω_d – площадь живого сечения до расширения, см²;

ω_D - площадь живого сечения после расширения.

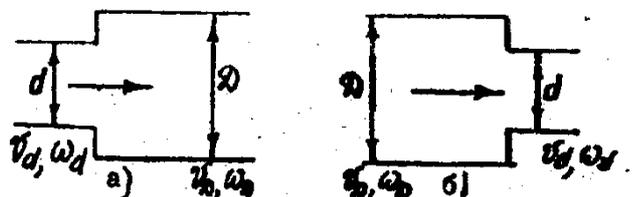


Рис. 5.

3. Для резкого сужения потока (рис.4)

$$h_{pc} = \xi_{pc} \frac{V^2}{2g}$$

Значение коэффициента местного сопротивления при резком сужении теоретически определяется по формуле

$$\xi_{pc} = 0.5 \left(1 - \frac{\omega_D}{\omega_d}\right)$$

4. Для пробкового крана коэффициент местного сопротивления зависит от его конструкции и степени открытия. Значения коэффициентов $\xi_{кр}$ в зависимости от угла поворота пробкового крана приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Угол поворота	5	10	20	30	40	50	60	65
Коэф. сопр.	0,05	0,029	1,56	5,47	17,3	52,6	206	485

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Опытная установка (рис.5.1) состоит из бака /1/, от которого отходит труба /2/. Уровень воды в баке поддерживается постоянным с помощью водослива. На трубопроводе находятся местные сопротивления в виде резкого расширения /5/, резкого сужения /6/, крана /7/. До и после каждого местного сопротивления установлены пьезометры /3/. В конце трубопровода устанавливается мерный бак /4/

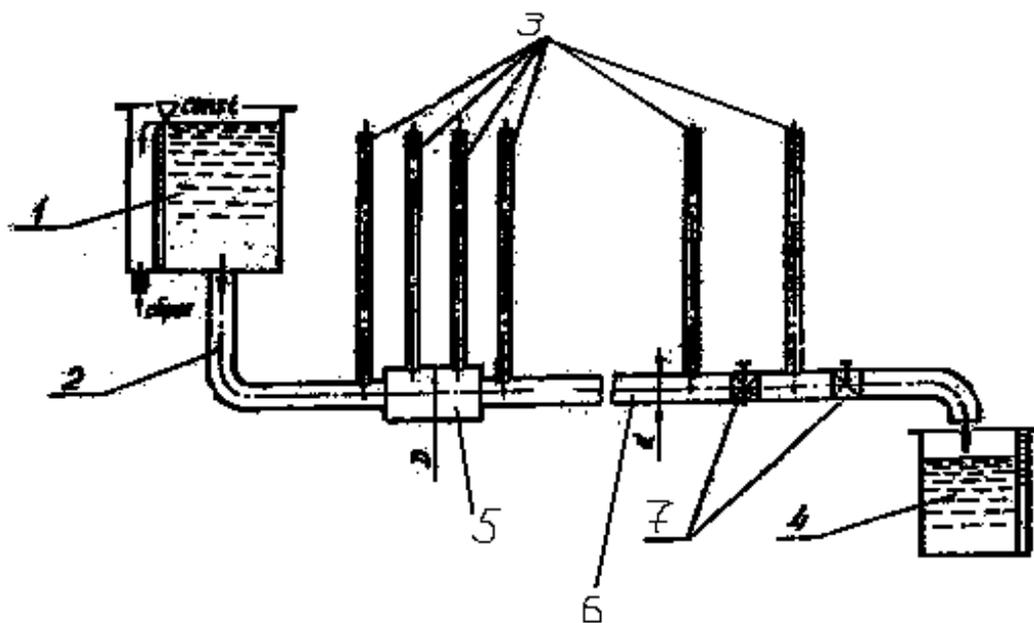


Рис.

5.1
Схема

установки для исследования местных сопротивлений

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

При открытии крана /7/ устанавливают расход жидкости в трубопроводе. По достижении установившегося движения жидкости до и после местного сопротивления измеряют пьезометрический напор, а также определяют объем воды в мерном баке /4/ и время его наполнения. Результаты записывают в таблицу. Опыты проводят не менее трёх раз при различном расходе жидкости, который регулируют краном /7/.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ.

Расход воды и среднюю скорость ее движения определяют следующим способом:

$$Q = \frac{W}{t}, V_d = \frac{Q}{\omega_d}; V_D = \frac{Q}{\omega_D},$$

где
$$\omega_d = \frac{\pi d^2}{4}, \omega_D = \frac{\pi D^2}{4}$$

Здесь d – диаметр трубопровода до расширения;

D – то же самое после расширения.

Затем определяют потери напора в местных сопротивлениях. Для этого применяют уравнение Бернулли:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{w_{1-2}}$$

$z_1 = z_2$ так как трубопровод горизонтальный, то

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{w_{1-2}}$$

Потери напора между сечениями: $h_{w_{1-2}} = h_l + h_m$

где h_l – потери напора по длине;

h_m – то же на местное сопротивление.

Так как потери по длине очень малы, то

$$h_{w_{1-2}} = h_m = \left(\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) - \left(\frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right)$$

здесь $E = \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g}$ – полная удельная энергия потока.

Поскольку для крана $V_1 = V_2 = V_d$, то $h_{кр} = \frac{P_5}{\rho g} + \frac{P_6}{\rho g}$

Потери напора при расширениях и сужениях трубопровода определяются разностью полных удельных энергий до местного сопротивления и после.

$$h_{p.p} = E_1 - E_2 = \left(\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_d^2}{2g} \right) - \left(\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_D^2}{2g} \right)$$

$$h_{pc} = E_3 - E_4 = \left(\frac{P_3}{\rho g} + \frac{V_D^2}{2g} \right) - \left(\frac{P_4}{\rho g} + \frac{V_d^2}{2g} \right)$$

Производят расчёт опытных значений коэффициентов местных сопротивлений по формуле:

$$\xi = \frac{h_M 2g}{V^2}$$

Рассчитывают теоретические значения коэффициентов местных сопротивлений и сравнивают с опытными. Результаты заносят в таблицу.

Таблица 5.2

№	Показания пьезометров						W	T	Постоянные величины d=2 см; D=50 см
	Резкое расш.		Резкое суж.		кран				
	$\frac{P_1}{\rho g}$	$\frac{P_2}{\rho g}$	$\frac{P_3}{\rho g}$	$\frac{P_4}{\rho g}$	$\frac{P_5}{\rho g}$	$\frac{P_6}{\rho g}$			
	см	см	см	см	см	см	см ³	с	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Таблица 5.3

№	Q	V _d	V _D	h _{pp}	h _{pc}	h _{кр}	ξ _{pp}	ξ _{рк}	ξ _{кр}	ξ _{ppт}	ξ _{рст}	ξ _{крт}
	см ³ /с	см/с	см/с	см	см	см						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

Контрольные вопросы

1. Что такое местные гидравлические сопротивления?
2. Что такое запорная арматура?
3. Приведите формулу определения потери напора вызванных местными сопротивлениями?
4. Приведите формулу Бордо и объясните область применимости этих формул?

ЛАБОРОТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ МАЛОЕ ОТВЕРСТИЕ

В ТОНКОЙ СТЕНКЕ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследовать характеристики истечения, определить опытным путем значения коэффициентом сжатия E , скорости φ , местного сопротивления ξ , расхода μ , характеризующих истечений жидкости через малое отверстие в тонкой стенке (рис.6.1 а).

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.

Отверстие считается малым, если диаметр его $d \leq 0.1H$,

где H - напор над центром отверстия.

Тонкой стенкой считается такая, толщина которой $\delta < 3d_{отв}$ не влияет на характер истечения жидкости из отверстия, а также стенка, края которой в отверстии имеют острую кромку.

Вследствие того, что жидкость подходит к круглому отверстию со всех сторон, линии тока в начале струи оказываются криволинейными и, пройдя плоскость отверстия, продолжает приближаться к оси струи. По этой причине струя на выходе из отверстия сжимается и на расстоянии, разном $(0,5 \div 0,1) d_{отв}$, приобретает сжатие, это сечение называется сжатым сечением (рис.6.1б).

Степень сжатия струи определяется коэффициентом сжатия

$$\varepsilon = \frac{\omega_{сж}}{\omega}$$

где $\omega_{сж}$ -площадь сжатого сечения,

ω – площадь отверстия.

Средняя скорость в сжатом сечении струи определяется по формуле.

$$V = \varphi \sqrt{2gH}, \quad \varphi = \sqrt{\frac{1}{\alpha + \xi_j}},$$

где φ – коэффициент скорости, учитывающий уменьшение теоретического значения скорости $V_T = \sqrt{2gH}$ вследствие наличия сопротивлений при истечении и представляет собой отношение действительной скорости к теоретической

$$\varphi = \frac{V}{V_T};$$

ξ_j - коэффициент местного сопротивления,

α - коэффициент Кориолиса в сжатом сечений, $\alpha=1.0$

Действительная скорость V определяется из уравнения траектории падения струи, (параболы).

$$V = X \sqrt{\frac{y}{2Y}},$$

«X» и «Y» - координаты произвольных точек струи относительно начала координат, совпадающего с центром тяжести сжатого сечения. Зная коэффициент скорости φ , можно определить коэффициент местного сопротивления.

$$\xi_j = \frac{1}{\varphi^2} - 1$$

Расход жидкости через малое отверстие в тонкой стенке

$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2gH},$$

где ω - площадь отверстия,

μ - коэффициент расхода равный отношению действительного расхода к расходу теоретическому, т.е. полученному без учета сопротивления и сжатия струи:

$$\mu = \frac{Q}{Q_T} \text{ или } \mu = \varepsilon \cdot \varphi$$

где $Q_T = \omega \cdot \sqrt{2gH}$

По данным опытов для малых отверстий в тонкой стенке при совершенном сжатии.

$$\varepsilon = 0.64; \quad \xi_j = 0.06; \quad \varphi = 0.95; \quad \mu = 0.62.$$

ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ.

Опытная установка (рис.6.1а) состоит из напорного бака /1/, в котором поддерживается постоянный уровень с помощью водослива. Напорный бак соединен вертикальной трубой с баком меньшего объема /3/, в стенке которого имеется отверстие $d_{отв}=1,1$ см с острыми кромками. Напор над центром отверстия измеряется пьезометром /4/.

Меняя открытия крана /2/, устанавливают различные напоры над центром отверстия. Для определения действительной скорости измеряют координаты падающей струи. Для определения горизонтальной координаты «X» установлена рейка с делениями /5/. При помощи шпигельмасштаба /6/ определяется вертикальная координата струи «Y». Объем воды измеряется мерным сосудом /7/.

1.										
2.										

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ.

1. Открывают кран /2/ и по показаниям пьезометров устанавливают желаемый напор над центром отверстия.
2. Наблюдают форму поперечного сечения струи и штангенциркулем измеряют сжатого сечения струи.
3. Для определения действительной скорости измеряют координаты «Х» и «У». Рейка /5/ смещена относительно оси «У» на величину «У₀» (рис.7.1а), определяемую шпигельмасштабом по оси струи в сжатом сечении. Для трех точек траектории падающей струи производят замеры ее координат.
4. Измеряют объем воды в мерном сосуде /7/ и время его наполнения.

Результаты замеров заносятся в таблицу 6.1, 6.2, 6.3.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ.

По диаметру струи в сжатом сечении определяется площадь сжатого сечения струи

$$\omega_{сж} = \frac{\pi d_{сж}^2}{4}$$

И коэффициент сжатия струи

$$\varepsilon = \frac{\omega_{сж}}{\omega}$$

Подсчитывают действительный и теоретический расход жидкости через малое отверстие и коэффициент расхода.

$$Q = \frac{W}{t}; \quad Q_T = \omega \sqrt{2gH}; \quad \mu = \frac{Q}{Q_T}$$

Расчетное значение координаты «у» определяется по формуле

$$Y = Y_0 - Y,$$

«Y₀» - координата струи в сжатом сечении, которая во время опытов не измеряется.

Определяют действительную скорость

$$V = X \sqrt{\frac{g}{2Y}};$$

теоретическую скорость

$$V_T = \sqrt{2gH};$$

коэффициенты скорости и местного сопротивления

$$\varphi = \frac{V}{V_T}; \xi_{кр} = \frac{1}{\varphi_{cp}^2} - 1.$$

Контрольные вопросы:

1. Какие отверстия называется малыми?
2. Дайте определения для тонкой стенки?
3. Приведите формулу для определения коэффициента сжатия струя?
4. Приведите формулу определения средней скорости в сжатом потоке?
5. Как определяется действительная скорость в сжатом сечении струи?

$$W_{om} = EW_2 = E\varphi\sqrt{2gH} = \alpha\sqrt{2gH}$$

Или объёмный расход: $V_x = \alpha F_{om} \sqrt{2gH}$,

где $E = F_2/F_{от}$ – коэффициент сжатия;

$\alpha = \varphi E$ - коэффициент расхода;

$F_{от}$ – площадь поперечного сечения, м²

Коэффициент расхода определяется экспериментально. Коэффициент расхода жидкостей по свойствам, не сильно отличающимся от воды равен:

- $\alpha = 0,62$ при истечении через отверстие;

- $\alpha = 0,82$ при истечении через насадки.

Из выше рассмотренной формулы видно, что расход жидкости, тонкой стенке сосуда с постоянным уровнем жидкости зависит от уровня жидкости и от размеров отверстия, но не зависит от формы сосуда.

Теперь найдём время, затрачиваемое на изменение расхода жидкости от H_1 до H_2 . Для этого напишем расход жидкости за очень короткое время dt :

$$dV = V_x d\tau = \alpha F_{om} \sqrt{2dH} d\tau \quad (4)$$

За это время $d\tau$ уровень жидкости также изменяется на dH и т.к. площадь поперечного сечения сосуда постоянная, то

$$dV = -Fdh,$$

где F - площадь поперечного сечения сосуда, m^2 .

Знак минус в правой части уравнения указывает на уменьшение уровня жидкости в сосуде.

Приравниваем два вышерассмотренных уравнения:

$$\alpha F_{om} \sqrt{2dH} d\tau = -Fdh \quad (5)$$

$$d\tau = -\frac{FdH}{\alpha F_{om} \sqrt{2gH}}.$$

Проинтегрируя, получим:

$$\tau = -\frac{2F(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})}{\alpha}$$

Схема опытной установки: Подача воды в сосуд (1) через трубопровод (5) идёт из городского водопровода и регулируется вентилем для подвода воды (2). Наполнение сосуда водой до определённой высоты фиксируется по шкале (3), установленной сбоку сосуда. А снизу же сосуда есть четыре отверстия – насадки разного диаметра.

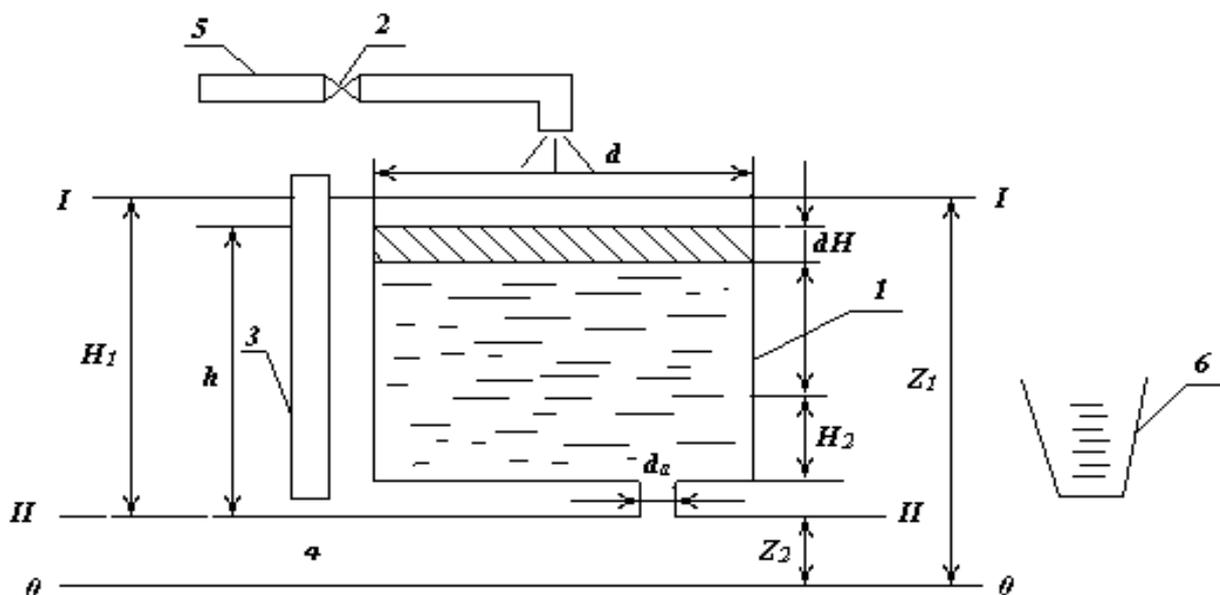


Рисунок 7.1 Схема установки, предназначенной для изучения истечения жидкости из отверстия в сосуде.

Работа состоит из двух частей. В первой части - уровень воды в сосуде (1) постоянный. Каждый раз перед началом опыта сосуд (1) при помощи вентиля (2) заполняется водой до определённого уровня, затем вентиль (2) закрывается.

Во второй части работы – находится коэффициент расхода при постоянном и переменном уровне жидкости. Для поддержания постоянного уровня воды в сосуде, в нём установлена водосливная труба (7) для перелива лишних жидкостей. При этом для дальнейшего проведения опыта вентиль (2) должен быть открыт. Расход истекающей жидкости измеряется при помощи мерного бака (6). При выполнении второй части работы пользуются только одним из отверстий (самым большим), установленных в днище сосуда. Только при условии, что днище сосуда будет гладким и ровным при установленном к нему отверстию – насадке (часть трубы) находится коэффициент расхода.

Порядок выполнения работы.

В первой части работы открывают вентиль (2) сосуд (1) заполняется водой до определённого уровня H , при этом все отверстия в днище сосуда (1) должны быть закрыты, а вентиль (8) под мерным баком (6) должен быть открыт. Выбранный уровень H_1 записывается в тетради. Затем открывается одно из отверстий в днище сосуда (1) и запускается секундомер. После некоторого истечения жидкости отверстие закрывается затычкой и секундомер останавливается. Следующий выбранный уровень воды (H_2) в сосуде (1) и показания секундомера также записываются в тетрадь. Для каждого отверстия опыт надо повторить как минимум два раза.

После завершения всех измерений начинаются вычисления.

После истечения жидкости из отверстия в днище сосуда; время снижения уровня воды в сосуде от высоты H_1 до высоты H_2 находится по следующей формуле:

$$\tau = -\frac{2F(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})}{\alpha F_{от} \sqrt{2g}},$$

где F – площадь поперечного сечения сосуда, m^2 .

Все измеренные и вычисленные величины заносятся в расчётную таблицу 7.1.

Таблица 7.1.

№	Измерения			Вычисления	
	Первоначальный уровень жидкости: H_1 (м)	Конечный уровень жидкости: H_2 (м)	Опытное время: $\tau_{оп}$ (сек)	Площадь поперечного сечения сосуда: F (m^2)	Площадь поперечного сечения отверстия: $F_{от}$ (m^2)
1					
2					

Перед началом опыта все 4 отверстия в днище сосуда (1) закрываются, а вентиль (2) – открывается. При этом насадку самого большого отверстия надо убрать. Первоначально опыт проводится для переменного уровня воды в сосуде (1). Для этого вентиль (2) открывается и сосуд (1) заполняется водой до определённого уровня H_1 , затем вентиль (2) закрывается. Высота H_1 записывается в тетрадь.

После этого самое большое отверстие в днище сосуда (1) открывается и запускается секундомер. После снижения уровня воды до высоты H_2 отверстие закрывается и секундомер останавливается. Время затраченное на изменение уровня воды от H_1 до H_2 записывается в тетрадь. Сосуд (1) снова заполняется до уровня воды H_1 и опыт проводится 3 – 4 раза.

Затем опыт проводится для постоянного уровня воды в сосуде (1). Перед началом опыта вентиль (8) и все отверстия сосуда (1) закрываются, и открыв вентиль (2) сосуд (1) заполняется водой до уровня водосливной трубы (7).

В продолжении опыта вентиль (3) должен быть открыт настолько, чтобы расход жидкости истекающей из трубопровода (5) должен быть немного больше расхода жидкости, истекающей из отверстия в днище сосуда. Потом открывается самое большое отверстие в днище сосуда (1). Вытекший из отверстия и поступивший в мерный бак (6) объём жидкости открытием вентиля (8) освобождает мерный бак, и измерения повторяются. И здесь опыт проводится.

Теперь установив насадку на проверенное отверстие в днище сосуда (1) опыты повторяются 6 – 8 раз в вышеперечисленном порядке.

После проведения повторных измерений начинают использоваться их результаты.

Обобщение результатов опыта и построение расчета:

При переменном уровне воды коэффициент расхода находится из уравнения (5), а при постоянном уровне воды – из уравнения (3). Объёмный расход находится из уравнения:

$$V_x = V / \tau,$$

где V – объём жидкости, истекающий из отверстия, м³;

τ - время истечения жидкости, сек.

Измеренные и вычисленные величины при переменном уровне воды заносятся в таблицу 7.2., а при постоянном уровне – в таблицу 7.3.

Таблица 7.2.

№	Измерения			Коэффициент расхода	Дополнения
	Первоначальный уровень воды	Конечный объём	Опытное время,		

	H_1 (м)	H_2 (м)	τ (сек)		
1					
2					
3					

Таблица 7.3.

№	Измерения			Вычисления		
	Первоначальный объём воды; H_1 (м)	Время истечения воды; τ (сек)	Конечный объём воды; H_2 (м)	Расход воды; V_x м ³ /сек	Коэффициент расхода;	дополнения
1						
2						
3						

Контрольные вопросы:

- 1) Какие трубки называют насадками?
- 2) Для каких целей используются насадки?
- 3) При каких размерах и видах насадок через них проходит наибольший расход жидкости?
- 4) Какие виды насадок существуют?
- 5) С помощью какой формулы определяется время истечения жидкости из сосуда большого объёма через насадку?
- 6) Приведите и определите формулу теоретического расхода жидкости, истекающей из насадки.

Лабораторная работа № 8

ХАРАКТЕРИСТИКА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Цель работы:

Насосы используются во многих отраслях народного хозяйства. Все насосы подразделяются на две основные группы: динамические и объёмные.

Динамическими называются насосы, в которых сообщение энергии жидкости осуществляется путем воздействия гидродинамических сил на незамкнутый объём жидкости при постоянном сообщении входа и выхода насоса.

Объёмными называются насосы в которых сообщение энергии жидкости осуществляется периодически изменением замкнутого объёма при по переменном сообщении его со входом и выходом насоса.

Лопастными называются насосы, в которых сообщение энергии жидкости осуществляется при обтекании лопастей рабочего колеса. Лопастные насосы объединяют в свою очередь две группы насосов: центробежные и осевые.

Центробежными называются лопастные насосы с движением жидкости через рабочее колесо от центра к периферии, а осевыми - лопастные насосы с движением жидкости через рабочее колесо в направлении его оси.

Насосы трения и инерции – эта группа динамических насосов, в которых перемещение жидкости осуществляется силами трения и инерции. В эту группу входят вихревые, шнековые, лабиринтные, червячные и струйные насосы.

Группа объемных насосов объединяет поршневые, плунжерные, диафрагмовые, роторные, шестеренчатые, винтовые.

Рассмотрим рабочую схему центробежного насоса (рис 8.1)

Достоинства центробежных насосов – компактность, сравнительно небольшой вес, малые габариты при высокой производительности возможность непосредственно соединения с электродвигателем, плавная и непрерывная подача жидкости, простота пуска и регулировки.

Недостатки: неустойчивость напора – с увеличением производительности (при $n=\text{const}$) напор, создаваемый насосом уменьшается, невысокий к.п.д. для малых производительностей.

Внутри неподвижного корпуса 1 помещено рабочее колесо 2, закрепленное на валу 3. Корпус насоса патрубками 4 и 5 соединен с всасывающим и напорным трубопроводами.

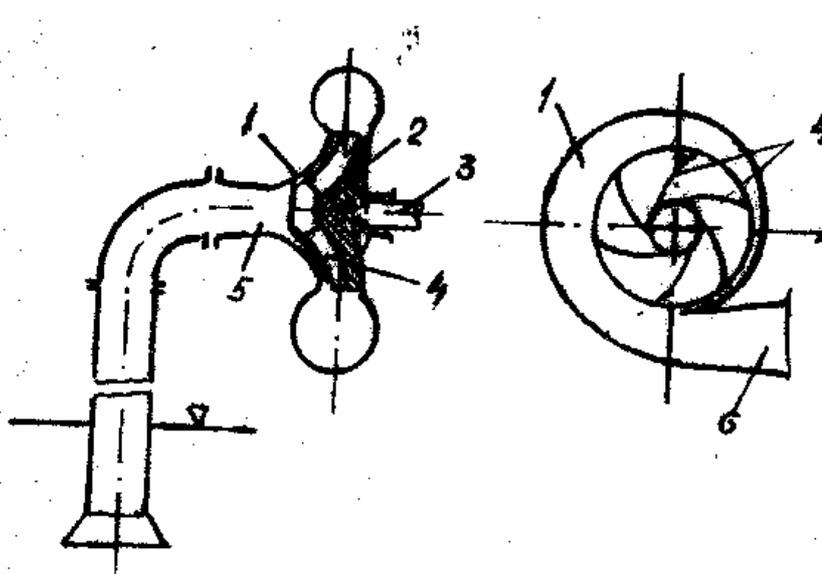


Рисунок 8.1

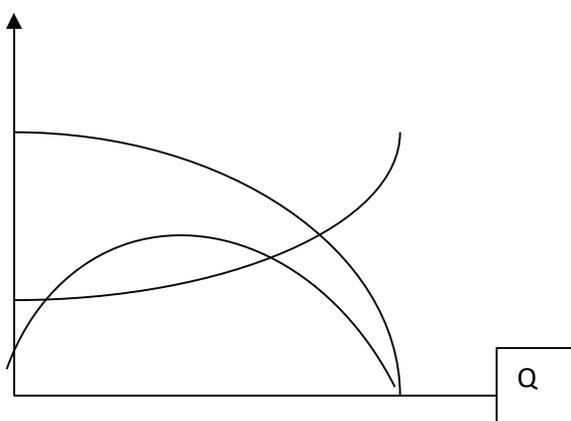
Если всасывающий трубопровод и корпус насоса наполнить жидкостью, а затем привести во вращение рабочее колесо, то жидкость, заполняющая каналы между лопастями, под действием центральной силы будет отбрасываться от центра колеса к

периферии. Выйдя из колеса, жидкость поступает в спиральную камеру и далее в нагнетательный трубопровод. При этом перед входом жидкости в рабочее колесо образуется разрежение, под действием которого жидкость из приемного резервуара поступает через всасывающий трубопровод в насос.

Центробежные насосы могут быть не только одноступенчатыми, но и многоступенчатыми, однако принцип их действия во всех случаях остается одним и тем же – перемещение жидкости осуществляется под действием центробежной силы, развиваемой вращающимся рабочим колесом.

У центробежного насоса с изменением производительности изменяются и другие параметры его работы – напор, мощность,

Рисунок 8.2.



Характеристика центробежного насоса.

Перед пуском центробежные насосы заливают перекачиваемой жидкостью. При изменении в небольших пределах число оборотов n центробежного насоса, его подача Q , напор H и потребляемая мощность N изменяются в следующих соотношениях:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2; \quad \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

Зависимости $Q-H$; $Q-N$; $Q-\eta$ называются характеристиками насоса и устанавливаются опытным путем.

Описание установки.

Центробежный насос (3) установлен на одном валу с электродвигателем переменного тока. Число оборотов замеряется. Вода всасывается насосом из расходного бака (5). На всасывающем трубопроводе установлены приемный клапан (6), препятствующий выходу воды при заливе насоса через всасывающую трубку(7). На нагнетательном трубопроводе (8) установлены манометр (9) и вентиль для

регулирования расхода (подачи) воды (10) Вода из нагнетательного трубопровода поступает в один из мерных баков (11). Каждый из баков имеет водомерную шкалу (4), которая проградуирована в единицах объема (л), а также в баке смонтировано сливная труба во избежания переполнения . В дне баков расположены патрубки с вентилями (1), через которые вода из мерного бака сливается (1) в расходный бак, откуда вновь всасывается насосом..

Методика проведения работы.

При испытании насоса установки определяют величины необходимые для построения характеристик насоса: $Q-H$, $Q-N$, $Q-\eta$. Испытания проводят при постоянном числе оборотов, но при разных, всё увеличивающихся расходах (подачах) Q насоса. Изменение подачи Q производят постепенным открытием вентиля (12). Первое наблюдение проводят при полностью закрытом венбтиля, последующие при постепенном открытии на четверть оборота. При этом необходимо производить замеры: подачи насоса, разрежения во всасывающей трубе, давления на нагнетательной трубе, напряжения силы электрического тока на двигателе.

Замер показателей работы насосной установки производят следующим образом.

Подача: закрывает в одном из мерных баков спускной вентиль и включает секундомер. Количество воды, замеренное по водомерному шкалу, и время замера записывают в таблицу. Напор, выраженный в.м. столба подаваемой жидкости (воды) определяют следующим образом:

$$H = P_m + P_b + \frac{W_H^2 - W_b^2}{2g} + h$$

P_m и P_b – показание манометра и вакуумметра в м.столба подаваемой жидкости;

W_m и W_b – скорость воды в местах присоединения трубок манометра и вакуумметра.

h – Расстояние между уровнями присоединения вакуумметра и манометра.

Всасывающий и нагнетательный трубопроводы одинакового диаметра, поэтому W_m и W_b одинакова и тогда $H = P_m + P_b + h$.

Обработка опытных данных и составления отчета.

Производительность (подача) насоса (m^3/c); $Q = \frac{Q^1}{1000\tau}$ где

Q^1 – объем воды, определенный по водомерному стеклу, дм (или л);

τ – продолжительность замера, с.

Мощность, потребляемая насосов установкой

$$N = \frac{WJ}{1000}$$

V - напряжения тока, J – сила тока, А.

Коэффициент полезного действия насоса определяют из формулы

$$N = \frac{QHg\rho}{1000\eta} \text{ откуда } \eta = \frac{QHg\rho}{1000N}$$

где Q – производительность (подача насоса), м³/с

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – ускорения свободного падения, м/с²;

H – полный напор, создаваемый насосом, в м. столба подаваемой жидкости.

Заканчивается работа построением графиков: $Q-N$, $Q-\eta$, $Q-H$.

Таблица 8.1

№	Число оборотов об/мин	Продолжительность замера, с	Кол-во воды, дм ³	Давление P_M		Разрежение P_B		Полный напор H	Мощность кВт	К П Д %
				$\frac{кгс}{см^2}$ или мм. рт. ст.	м.в. ст	$\frac{кгс}{см^2}$	м.вод ст			
	n	τ	Q	P_M	H_M	P_C	H_B	H	N	η
1										
2										

Для каждой подачи (Q) производить 3 замера. В таблицу вносить среднюю величину из 3-х замеров.

Схема установки

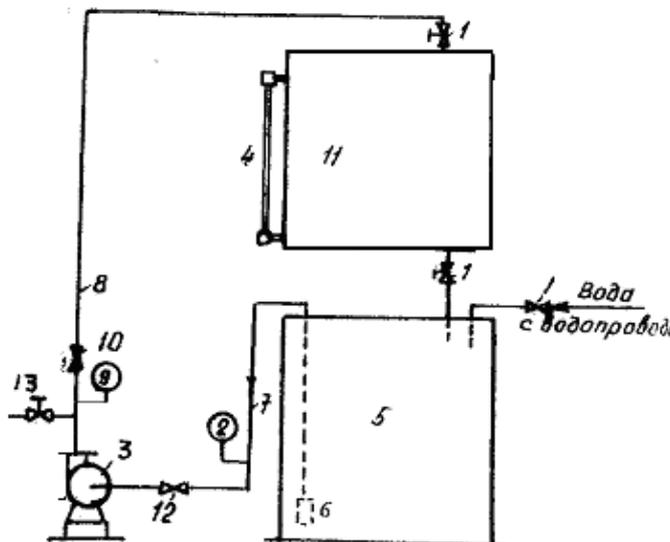


Рисунок 8.3

1. Вентили 2. Вакуумметр. 3. Насос 4. водомерное стекло 5. Расходный бак. 6. Обратный клапан 7. Всасывающий трубопровод 8. Нагнетательный трубопровод 9. Манометр 10., 12, Регулирующий вентили 11. Мерные баки. 13 Сбросный вентиль.

Контрольные вопросы:

- 1) Устройство центробежного насоса.
- 2) Характеристика центробежного насоса.
- 3) Высота всасывания и явление кавитации.
- 4) Напор, развиваемый насосом.
- 5) Зависимость основных параметров работы центробежного насоса от числа оборотов рабочего колеса.

Типы и конструкции центробежных и поршневых насосов

**ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС» в г. Алмалык**

ГЛОССАРИЙ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ:

«ГИДРАВЛИКА»

Безнапорное движение – движение жидкости, при котором поток не со всех сторон ограничен твёрдыми стенками, а имеет свободную поверхность.

Вакуум - разность между атмосферным и абсолютным давлением, характеризующая недостаток давления до окружающего атмосферного.

Внутренние жидкости — это силы взаимодействия между отдельными частицами рассматриваемого объёма жидкости.

Водослив – это любая перегораживающая поток стенка, через которую происходит перелив жидкости.

Волновое давление - отклонение гидродинамического давления при наличии волн от условного гидростатического давления в той же точке пространства.

Вязкость - это свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигающим касательным усилиям.

Гидравлика - прикладная техническая наука, занимающаяся изучением законов равновесия и движения капельных жидкостей и рассматривающая приложение этих законов к решению конкретных технических задач.

Гидравлический аккумулятор – прибор, служащий для аккумулярования, т.е. накапливания, собирания энергии.

Гидравлический диаметр D_z – размерная величина, равная учетверенному гидравлическому радиусу: $D_z = 4 * R_z$

Гидравлические машины – машины, служащие для преобразования механической энергии двигателя в энергию перемещаемой жидкости (насосы) или гидравлической энергии потока жидкости в механическую энергию (гидравлические двигатели).

Гидравлически наивыгоднейшее сечение – это такое поперечное сечение, которое при заданных площади живого сечения ω , уклоне i , коэффициенте шероховатости n имеет наибольшую пропускную способность.

Гидравлический пресс – гидравлическая машина, применяемая для получения больших сжимающих усилий.

Гидравлический радиус сечения - отношение площади живого сечения к смоченному периметру $R=F/A$.

Гидравлический удар - резкое изменение давления в напорном трубопроводе вследствие внезапного изменения скорости движения жидкости во времени.

Гидравлический привод (передача) – состоит из лопастных гидромашин – насосного и турбинного колес, предельно сближенных друг с другом и расположенных соосно.

Гидравлический прыжок - переход транзитного потока из бурного состояния в спокойное.

Гидравлическое сопротивление - сопротивление, появляющееся в движущейся жидкости за счет действия сил внешнего или внутреннего трения, и проявляющееся в потерях напора.

Гидродвигатели - гидравлические машины для преобразования энергии давления жидкости в механическую энергию.

Гидродинамика - раздел гидравлики, в котором изучаются законы движения жидкости.

Гидромеханика - наука изучающая законы равновесия и движения жидкостей, в которой применяются лишь строго математические методы, позволяющие получать общие теоретические решения различных задач, связанных с равновесием и движением жидкостей.

Гидропривод – совокупность устройств – гидромашин и гидроаппаратов, предназначенных для передачи механической энергии и преобразования жидкости.

Гидростатическое давление - сжимающее напряжение, возникающее внутри покоящейся жидкости.

Глубина в сжатом сечении - минимальная глубина потока в течении за водосливом, на гребне водослива с широким порогом или при стечении из отверстия, где движение жидкости можно считать плавно изменяющимся.

Глубина потока – расстояние от дна потока до его верхней границы (как правило, свободной поверхности), измеряемое в вертикальной продольной плоскости по нормали к линии дна.

Давление насыщенных паров или давление парообразования – давление, при котором жидкость закипает при данной температуре. Величина давления зависит от рода жидкости и ее температуры.

Живое сечение потока - площадь сечения потока, проведенная нормально к направлению линий тока, т.е. нормально к направлению скоростей элементарных струек

Жидкие тела, или жидкости - физические тела, легко изменяющие свою форму под действием самых незначительных сил.

Идеальная жидкость – жидкость, характеризующаяся абсолютной подвижностью, т.е. отсутствием в жидкости касательных напряжений, и абсолютной неизменяемостью в объеме при изменении температуры или под действием каких-либо сил, т.е. отсутствием деформаций сжатия и растяжения.

Избыточное давление $P_{изб}$ - разность между абсолютным давлением P и атмосферным давлением P_a . $P_{изб} = P - P_a$

Избыточная пьезометрическая высота - высота, на которую под действием давления в данной точке может подняться жидкость, на свободную поверхность которой действует давление внешней газообразной среды (атмосферное давление).

Испарение – парообразование, происходящее лишь на поверхности капельной жидкости.

Кавитация (от латинского слова «кавитас» - полость) - образование в движущейся жидкости полостей, заполненных паром или воздухом (газом).

Кавитационный запас – превышение полного напора жидкости во всасывающем патрубке насоса над давлением $P_{н.п.}$ насыщенных паров этой жидкости.

Кавитационный режим насоса – режим работы насоса в условиях кавитации, вызывающей изменение основных технических показателей.

Капельные жидкости - это жидкости, встречающиеся в природе и применяемые в технике: вода, нефть, бензин и т.д.

Кипение – парообразование по всему объему жидкости. Оно происходит при определенной температуре, зависящей от давления.

Короткие трубопроводы - трубопроводы, в которых потери напора в основном складываются из местных потерь.

Коэффициент неравномерности подачи - отношение максимальной ординаты графика к средней.

Коэффициент сжатия - отношение площади сжатого сечения $\omega_{сж}$ к площади отверстия ω .

Коэффициент скорости - коэффициент φ , учитывающий потери напора.

Кривая подпора - кривая свободной поверхности потока, глубина которого возрастает вдоль направления течения.

Кривая свободной поверхности - линия пересечения свободной поверхности потока с вертикальной поверхностью, проведенной через ось потока.

Кривая спада - кривая свободной поверхности потока, глубина которого уменьшается вдоль направления течения.

Ламинарный режим движения жидкости - жидкость движется слоями без поперечного перемешивания, причем пульсации скорости и давления отсутствуют. Критерием для определения режима движения является безразмерное число Рейнольдса.

Линия тока – направление движения различных частиц, принадлежащих этой линии.

Местная потеря напора на трение - снижение полного напора, обусловленное работой сил внутреннего трения жидкости при местной деформации потока.

Местное сопротивление - сопротивление вызывающие резкую деформацию потока.

Напор – высота столба жидкости над рассматриваемым уровнем.

Напорное движение - движение жидкости в потоке без свободной поверхности; оно обычно наблюдается в закрытых трубопроводах или иных гидравлических системах.

Напор насоса - энергия, сообщаемая насосом каждому килограмму перекачиваемой жидкости.

Насадка или патрубком - весьма короткая напорная (на всем своем протяжении) труба, при гидравлическом расчете которой следует пренебрегать потерями напора по длине h_l , необходимо учитывать только местные потери напора h_j .

Насосы - гидравлические машины, служащие для преобразования механической энергии двигателя в энергию перемещаемой жидкости.

Невязкая (идеальная) жидкость - некоторая условная жидкость с абсолютной подвижностью частиц, считающаяся абсолютно несжимаемой, не обладающая вязкостью - не сопротивляющаяся касательным напряжениям.

Неравномерное (ускоренное и замедленное) движение – это движение, при котором по длине потока изменяются его поперечное сечение и, следовательно, средняя скорость.

Неустановившееся движение - такой вид движения, при котором все перечисленные выше компоненты являются функцией не только координат, но и времени.

Номинальный режим насоса – режим работы насоса, обеспечивающий заданные технические показатели.

Обратная ударная волна - понижение давления, передающееся от слоя к слою и распространяющееся по направлению к задвижке.

Объемная подача насоса – объем жидкости, подаваемой насосом в единицу времени.

Объемные насосы – гидравлические машины, служащие для подачи жидкости под давлением.

Оптимальный режим насоса – режим работы насоса при наибольшем значении к.п.д.

Парообразование – свойство капельных жидкостей изменять свое агрегатное состояние на газообразное.

Плавно изменяющееся движение – движение, при котором кривизна линии тока и угол расхождения между ними весьма малы и в пределе стремятся к нулю.

Поверхностное натяжение (капиллярность) - это свойство жидкости, которое обусловлено силами взаимного притяжения, возникающими между частицами поверхностного слоя и вызывающими напряженное его состояние.

Поверхностные силы - это силы, действующие на поверхности исследуемых объемов жидкости, например, силы давления поршня на поверхность жидкости.

Поток – совокупность элементарных струек.

Полный напор - сумма пьезометрического и скоростного напоров.

Потеря напора на трение по длине - снижение полного напора на определенной длине водотока, обусловленное работой сил трения на внешней границе потока.

Производительность насоса - объем жидкости, подаваемый насосом в трубопровод в единицу времени.

Пьезометрическая высота - высота поднятия жидкости в пьезометрической трубке, которая характеризует избыточное давление в сосуде и может служить мерой для определения его величины.

Пьезометрический напор - сумма пьезометрической высоты в данной точке пространства, занятого покоящейся или движущейся жидкостью, и высоты расположения этой точки относительно условной горизонтальной плоскости (плоскости сравнения).

Равномерное движение - такой вид установившегося движения, при котором все компоненты движения - скорость, давление, форма русла, глубина - не меняются по длине (ось x) потока.

Расход – количество жидкости, протекающей через живое сечение потока в единицу времени.

Свободная поверхность жидкости – поверхность раздела между жидкостью и внешней газообразной средой.

Свободная струя – поток вовсе не ограничен твердыми стенками.

Сжимаемость – свойство жидкости изменять свой объем под действием давления.

Сифон - короткий трубопровод, по которому жидкость движется из питающего резервуара А в приемный резервуар В.

Скоростной напор - высота, на которую может подняться жидкость над данной точкой пространства под действием скорости потока этой точке.

Смоченный периметр - длина части периметра живого сечения, по которой поток соприкасается с ограничивающими его стенками.

Сплошное (непрерывное) движение - такое движение, при котором жидкость занимает все пространство своего движения без образования внутри потока пустот (разрывов).

Совершенное сжатие - сжатие, возникающее, когда боковые стенки и дно сосуда практически не оказывают влияние на степень сжатия струи (не влияют на истечение).

Средняя скорость течения жидкости – условная скорость, равная отношению расхода к площади живого сечения.

Трубопроводы – это системы напорных труб.

Турбулентное движение - движение, при котором все частицы жидкости движутся хаотично, т.е нарушается слоистость.

Удельный вес жидкости – вес единицы её объёма.

Удельный объём – объём, занимаемый единицей массы жидкости.

Удельный расход жидкости – расход жидкости, приходящийся на единицу ширины живого сечения.

Удельная энергия жидкости – мера механической энергии жидкости, равная энергии, принадлежащей единице массы этой жидкости, отнесенной к ускорению свободного падения.

Установившееся движение - такой вид движения, при котором скорости, ускорения, давления, глубины не меняются с течением времени, а зависят только от положения в потоке жидкости рассматриваемой точки, являясь функцией координат.

**ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС» в г. Алмалык**

РАБОЧАЯ УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Рабочая программа дисциплины (модуля)

Гидравлика

Закреплена за кафедрой Кафедра горного оборудования, транспорта и машиностроения
Направление подготовки 21.05.04 ГОРНОЕ ДЕЛО
Профиль Горные машины и оборудование

Квалификация **Горный инженер (специалист)**
Форма обучения **очная**
Общая трудоемкость **5 ЗЕТ**
Часов по учебному плану 180
в том числе: **Формы контроля в семестрах:**
аудиторные занятия 136 **зачет с оценкой 6**
самостоятельная работа 44

Распределение часов дисциплины по семестрам					
Семестр (<Курс>.<Семестр на курсе>)	6 (3.2)		Итого		
	17				
Вид занятий	УП	РП	УП	РП	
Лекции	34	34	34	34	
Лабораторные	51	51	51	51	
Практические	51	51	51	51	
Итого ауд.	136	136	136	136	
Контактная работа	136	136	136	136	
Сам. работа	44	44	44	44	
Итого	180	180	180	180	

Программу составил(и):

к.тн, доцент, Губанов Сергей Геннадьевич

Рабочая программа

Гидравлика

Разработана в соответствии с ОС ВО:

Самостоятельно устанавливаемый образовательный стандарт высшего образования Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по специальности 21.05.04 ГОРНОЕ ДЕЛО (приказ от 02.12.2015 г. № 100/2015-ОС)

Составлена на основании учебного плана:

21.05.04 ГОРНОЕ ДЕЛО, 21.05.04-ГЭМ-15-1.PLX Горные машины и оборудование, утвержденного Ученым советом ФГАОУ ВО НИТУ "МИСиС" 21.05.2020, протокол № 10/зг

Рабочая программа одобрена на заседании кафедры

Кафедра горного оборудования, транспорта и машиностроения

Протокол от 09.06.2020 г., №10

Зав. кафедрой Каххаров Сергей Каримович

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ	
1.1	Сформировать у студентов знания, умения и навыки об основных законах гидравлики, их приложений в инженерных задачах, применительно к гидроприводам горных машин, гидросистемам шахтного оборудования и систем гидро-пневмоавтоматики.

2. МЕСТО В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	
Цикл (раздел) ОП:	Б1.Б
2.1	Требования к предварительной подготовке обучающегося:
2.1.1	Физика
2.1.2	Математика
2.1.3	Теоретическая механика
2.2	Дисциплины (модули) и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:
2.2.1	Государственный экзамен
2.2.2	Оборудование для монтажа горных машин (эксплуатационная направленность)
2.2.3	Гидропневмопривод горных машин
2.2.4	Техническое обслуживание и ремонт карьерного оборудования (эксплуатационная направленность)
2.2.5	Механическое оборудование карьеров
2.2.6	Горные машины и оборудование подземных горных работ
2.2.7	Подготовка к защите и защита выпускной квалификационной работы
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫЕ С ФОРМИРУЕМЫМИ КОМПЕТЕНЦИЯМИ	

УК-6.1 : демонстрировать глубокое знание и понимание фундаментальных наук, а также знания в междисциплинарных областях профессиональной деятельности

Знать:

УК-6.1 -31 общие законы гидравлики; перспективы развития гидравлики; методологические проблемы в гидравлике; значение гидравлики и гидроприводов в транспортных, транспортно-технологических машинах, их агрегатах и технологическом оборудовании.

Уметь:

УК-6.1 -У1 использовать научно-техническую и справочную литературу, в том числе и зарубежную, для решения конкретных задач по гидравлике; применять методы анализа для расчета гидравлических систем и их элементов.

Владеть:

УК-6.1 -В1 различными методиками расчета гидравлических систем транспортно-технологических машин; методами обеспечения работоспособности и эффективности гидравлических систем.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ								
Код занятия	Наименование разделов и тем /вид занятия/	Семестр / Курс	Часов	Компетенции	Литература и эл. ресурсы	Примечание	Контрольные мероприятия	Выполнение
	Раздел 1. Раздел 1. Физические свойства жидкости							
1.1	Основные понятия /Лек/	6	2	УК-6.1 - 31	Л1.1Л2.2 Э1 Э2 Э3			
1.2	Физические свойства жидкости /Лек/	6	2	УК-6.1 - 31	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3			
1.3	Нагревание жидкости в трубопроводе /Пр/	6	2	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.2Л3.2 Э1 Э2 Э3			
1.4	Определение объемного модуля упругости /Пр/	6	2	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.2Л3.2 Э1 Э2 Э3			

1.5	Определение допустимого нагрева заполненного жидкостью сосуда /Пр/	6	3	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.2Л3.2 Э1 Э2 Э3			
1.6	Определение зависимости коэффициента динамической вязкости от температуры /Пр/	6	3	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.2Л3.2 Э1 Э2 Э3			
1.7	Экспериментальное исследование зависимости вязкости жидкости от температуры /Лаб/	6	4	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.2Л3.1 Э1 Э2 Э3			
1.8	Проработка лекционного материала. Самостоятельное изучение литературы. Самостоятельное изучение рекомендованных открытых источников. Подготовка к лабораторным работам. /Ср/	6	12	УК-6.1 - 31	Л1.1Л2.2Л3.3 Э1 Э2 Э3			
Раздел 2. Раздел 2. Гидростатика								
2.1	Математическая модель идеальной жидкости. Гидростатическое давление /Лек/	6	4	УК-6.1 - 31	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3			
2.2	Передача давления через жидкость. Закон Паскаля /Лек/	6	4	УК-6.1 - 31	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3			
2.3	Передача силы через жидкость /Лек/	6	2	УК-6.1 - 31	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3			
2.4	Сила давления жидкости на плоскую боковую стенку /Лек/	6	2	УК-6.1 - 31	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3			
2.5	Взаимодействие жидкости с твердым телом, погруженным в нее /Лек/	6	2	УК-6.1 - 31	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3			
2.6	Передача усилия через рычаг /Пр/	6	6	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.1Л3.2 Э1 Э2 Э3			
2.7	Определение необходимого веса твердого тела для погружения его на заданную глубину /Пр/	6	4	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.1Л3.2 Э1 Э2 Э3			
2.8	Определить равнодействующую силу давления жидкости на наклонную плоскую боковую стенку емкости и место положения на ней центра давления /Пр/	6	4	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.1Л3.2 Э1 Э2 Э3			
2.9	Определение давления жидкости, которое необходимо подать в поршневую полость гидроцилиндра, чтобы преодолеть нагрузку на штоке /Пр/	6	4	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.1Л3.2 Э1 Э2 Э3			
2.10	Проработка лекционного материала. Самостоятельное изучение литературы. Самостоятельное изучение рекомендованных открытых источников. Подготовка к лабораторным работам. /Ср/	6	12	УК-6.1 - 31	Л1.1Л2.1Л3.2 Э1 Э2 Э3			

	Раздел 3. Раздел 3. Гидродинамика							
3.1	Модель идеальной жидкости /Лек/	6	2	УК-6.1 - 31	Л1.1Л2.2 Э1 Э2 Э3			
3.2	Уравнение Бернулли /Лек/	6	2	УК-6.1 - 31	Л1.1Л2.2 Э1 Э2 Э3			
3.3	Гидравлические сопротивления /Лек/	6	4	УК-6.1 - 31	Л1.1Л2.2 Э1 Э2 Э3			
3.4	Определение давления в сечении потока идеальной жидкости при заданных условиях /Пр/	6	4	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.2Л3. 2 Э1 Э2 Э3			
3.5	Определение уровня жидкости при помощи расходомера Вентури /Пр/	6	4	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.2Л3. 2 Э1 Э2 Э3			
3.6	Определить давление в гидродинамике с заданными параметрами /Пр/	6	3	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.2Л3. 2 Э1 Э2 Э3			
3.7	Изучение методов определения расходов жидкости. Сравнение ручного и полуавтоматического способов /Лаб/	6	4	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.2Л3. 1 Э1 Э2 Э3			
3.8	Иллюстрация уравнения Бернулли. Диаграмма напоров /Лаб/	6	4	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.2Л3. 1 Э1 Э2 Э3			
3.9	Иллюстрация уравнения Бернулли с помощью прибора «Капелька» /Лаб/	6	4	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.2Л3. 1 Э1 Э2 Э3			
3.10	Определение потерь напора в заданном потоке жидкости с помощью прибора «Капелька» /Лаб/	6	4	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.2Л3. 1 Э1 Э2 Э3			
3.11	Исследование потерь давления (напора) при течении жидкости через местное сопротивление в виде диафрагмы /Лаб/	6	5	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.2Л3. 1 Э1 Э2 Э3			
3.12	Исследование потерь давления (напора) при течении жидкости через местное сопротивление в виде задвижки /Лаб/	6	5	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.2Л3. 1 Э1 Э2 Э3			
3.13	Изучение силового воздействия незатопленной струи на механическую преграду /Лаб/	6	5	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.2Л3. 1 Э1 Э2 Э3			
3.14	Проработка лекционного материала. Самостоятельное изучение литературы. Самостоятельное изучение рекомендованных открытых источников. Подготовка к лабораторным работам /Ср/	6	9	УК-6.1 - 31	Л1.1Л2.2Л3. 3 Э1 Э2 Э3			
	Раздел 4. Раздел 4. Гидравлический расчет трубопроводов							
4.1	Гидравлический расчет трубопроводов /Лек/	6	4	УК-6.1 - 31	Л1.1Л2.2 Э1 Э2 Э3			
4.2	Расчет типового трубопровода /Пр/	6	6	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.2Л3. 2 Э1 Э2 Э3			

4.3	Определение напорных характеристик насоса /Лаб/	6	5	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.2Л3.1 Э1 Э2 Э3			
4.4	Исследование характеристик насос при их параллельном соединении /Лаб/	6	5	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.2Л3.1 Э1 Э2 Э3			
4.5	Проработка лекционного материала. Самостоятельное изучение литературы. Самостоятельное изучение рекомендованных открытых источников. Подготовка к лабораторным работам. /Ср/	6	6	УК-6.1 - 31	Л1.1Л2.1Л3.2 Э1 Э2 Э3			
Раздел 5. Раздел 5. Истечение жидкости из отверстий и насадков								
5.1	Истечение жидкости из отверстия в тонкой стенке /Лек/	6	2	УК-6.1 - 31	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3			
5.2	Истечение жидкости из насадков /Лек/	6	2	УК-6.1 - 31	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3			
5.3	Истечение жидкости из емкости через отверстие и насадок /Пр/	6	6	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.1Л3.2 Э1 Э2 Э3			
5.4	Проработка лекционного материала. Самостоятельное изучение литературы. Самостоятельное изучение рекомендованных открытых источников. Подготовка к лабораторным работам /Ср/	6	5	УК-6.1 - 31	Л1.1Л2.1Л3.2 Э1 Э2 Э3			
5.5	Истечение жидкости из емкости через отверстие и насадок /Лаб/	6	6	УК-6.1 - У1 УК-6.1 -В1	Л1.1Л2.1Л3.1 Э1 Э2 Э3			

5. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

5.1. Вопросы для самостоятельной подготовки к экзамену (зачёту с оценкой)

Вопросы к текущему контролю

1. Поверхностные силы, действующие на жидкость. Понятие давления в жидкости. Основные единицы измерения и их размерность
2. Явление кавитации в жидкости. Физическая сущность явления, условия возникновения, последствия, методы борьбы с кавитацией
3. Основное уравнение гидростатики. Его вывод и частные случаи
4. Понятие давления в жидкости. Единицы измерения, их соотношение в различных системах единиц, указать размерность
5. Полный дифференциал давления по Эйлеру. Математическое выражение, применение в гидромеханики
6. Свойство вязкости жидкости. Формула Петрова. Коэффициент динамической вязкости μ , его физический смысл и размерность
7. Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости. Математическое выражение. Физический смысл членов уравнения, их размерность. Какие параметры движущегося потока математически увязывает это уравнение?
8. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Физический смысл каждого члена уравнения и их размерность. Практическое значение уравнения
9. Приборы для измерения давления в жидкости. Типы, область применения, класс точности, погрешность при измерении. Правила выбора манометра
10. Геометрия потоков жидкости. Понятия: живое сечение, смоченный периметр, гидравлический радиус, расход жидкости. Математическое выражение, размерность
11. Коэффициент гидравлических сопротивлений λ . От чего он зависит. Графики Никурадзе-Мухина.
12. Взаимодействие жидкости с наклонной твердой стенкой
13. Формула Торичелли, как следствие уравнения Бернулли

14. Гидравлические сопротивления. Понятие линейных потерь напора. Формула Дарси, коэффициент гидравлического сопротивления λ , его выражение для гидравлически гладких труб
15. Турбулентный режим движения жидкости. Эпюра скоростей частиц жидкости по сечению потока. Коэффициент Кориолиса
16. Турбулентный режим движения жидкости. Понятие гидравлически гладкой и гидравлически шероховатой трубы. Где используются эти понятия?
17. Истечение жидкости из отверстий. Понятие отверстия в тонкой стенке. Совершенное и несовершенное сжатие струи, явление инверсии струи. Расход жидкости в отверстии
18. Гидравлический удар в трубе. Физическая сущность. Фазы удара. Скорость ударной волны. Формула Н.Е. Жуковского. Понятия полного и неполного гидравлического удара. Методы борьбы с гидравлическим ударом
19. Местные гидравлические потери напора. Формула Вейсбаха. Основные виды местных сопротивлений. Эквивалентная длина местных потерь. Понятие коротких трубопроводов
20. Свойство сжимаемости жидкости. Математическое выражение, критерии оценки. На что влияет свойство сжимаемости жидкости в гидросистемах машин?

5.2. Перечень работ, выполняемых по дисциплине (модулю, практике, НИР) - эссе, рефераты, практические и расчетно-графические работы, курсовые работы, проекты и др.

Практические работы

1. Нагревание жидкости в трубопроводе
2. Определение объемного модуля упругости
3. Определение допустимого нагрева заполненного жидкостью сосуда
4. Определение зависимости коэффициента динамической вязкости от температуры
5. Передача усилия через рычаг
6. Определение необходимого веса твердого тела для погружения его на заданную глубину
7. Определить равнодействующую силу давления жидкости на наклонную плоскую боковую стенку емкости и место положения на ней центра давления
8. Определение давления жидкости, которое необходимо подать в поршневую полость гидроцилиндра, чтобы преодолеть нагрузку на штоке
9. Определение давления в сечении потока идеальной жидкости при заданных условиях
10. Определение уровня жидкости при помощи расходомера Вентури
11. Определить давление в гидрوليнии с заданными параметрами
12. Расчет типового трубопровода
13. Истечение жидкости из емкости через отверстие и насадок

Лабораторные работы

1. Экспериментальное исследование зависимости вязкости жидкости от температуры
2. Изучение методов определения расходов жидкости. Сравнение ручного и полуавтоматического способов
3. Иллюстрация уравнения Бернулли. Диаграмма напоров
4. Иллюстрация уравнения Бернулли с помощью прибора «Капелька»
5. Определение потерь напора в заданном потоке жидкости с помощью прибора «Капелька»
6. Исследование потерь давления (напора) при течении жидкости через местное сопротивление в виде диафрагмы
7. Исследование потерь давления (напора) при течении жидкости через местное сопротивление в виде задвижки
8. Изучение силового воздействия незатопленной струи на механическую преграду
9. Определение напорных характеристик насоса
10. Исследование характеристик насос при их параллельном соединении
11. Истечение жидкости из емкости через отверстие и насадок

5.3. Оценочные материалы, используемые для экзамена (описание билетов, тестов и т.п.)

Дисциплиной предусмотрен зачет с оценкой

5.4. Методика оценки освоения дисциплины (модуля, практики, НИР)

Дисциплина считается освоенной при выполнении следующих условий:

- текущий лекционный контроль имеет положительные оценки ("удовлетворительно"; "хорошо"; "отлично");
- выполнены и защищены все лабораторные работы;
- выполнены и защищены все практические работы;
- зачет сдан на положительную оценку ("удовлетворительно"; "хорошо"; "отлично").

Критерии оценивания зачета с оценкой

«2» (неудовлетворительно) «3» (удовлетворительно) Студент за время семестра не выполнил и (или) не защитил все практические и лабораторные работы.

«3» (удовлетворительно) Студент за время семестра выполнил все практические и лабораторные работы. Все практические и лабораторные работы защищены с оценкой не ниже "удовлетворительно".

«4» (хорошо) Студент за время семестра выполнил все практические и лабораторные работы. Более 75% всех практических и лабораторных работ защищены с оценкой "хорошо", а остальные 25% не ниже оценки "удовлетворительно"

«5» (отлично) Студент за время семестра выполнил все практические и лабораторные работы. Более 75% всех практических и лабораторных работ защищены с оценкой "отлично", а остальные 25% не ниже оценки "хорошо"

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

6.1. Рекомендуемая литература

6.1.1. Основная литература

	Авторы,	Заглавие	Библиотека	Издательство, год
Л1.1	Гудилин Н. С., Кривенко Е. М., Маховиков Б. С., др., Пастоев И. Л.	Гидравлика и гидропривод: учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по напр. "Горное дело" и спец. "Горные машины и	Библиотека МИСиС	М.: Горная книга, 2007

6.1.2. Дополнительная литература

	Авторы,	Заглавие	Библиотека	Издательство, год
Л2.1	Крестин Е. А.	Гидравлика: учебное пособие	Электронная библиотека	Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2010
Л2.2	Малашкина В. А.	Гидравлика: учебное пособие	Электронная библиотека	Москва: Московский государственный горный университет, 2012

6.1.3. Методические разработки

	Авторы,	Заглавие	Библиотека	Издательство, год
Л3.1	Иванов С. А., Чиченев Н. А.	Гидравлика: лаб. практикум	Электронная библиотека	М.: Изд-во МИСиС, 2008
Л3.2	Малашкина В. А.	Гидравлика: учеб. пособие для проведения практ. занятий и самостоят. работы студ.	Библиотека МИСиС	М.: Изд-во МГТУ, 2006
Л3.3	Коваль П. В.	Гидравлика и гидропривод горных машин: учеб. для студ. вузов, обуч. по спец.	Библиотека МИСиС	М.: Машиностроение, 1979

6.2. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

Э1	Федеральный портал Российское образование. Единое окно доступа к информационным ресурсам. Раздел	URL: http://window.edu.ru/catalog/resources?p_str=гидравлика
Э2	Федеральный портал Открытое	URL: https://openedu.ru/
Э3	Научно-техническая библиотека НИТУ	URL: http://lib.misis.ru/

6.3 Перечень программного обеспечения

П.1	Лицензии ПО Windows Server CAL ALNG LicSAPk MVL DvcCAL, ПО WinEDUA3 ALNG SubsVL MVL PerUsr и PerUsr
П.2	ПО Kaspersky Endpoint Security
П.3	Win Pro 10 32-bit/64-bit AIIIg PK Lic Online DwnLd NR
П.4	Autodesk AutoCAD
П.5	MATCAD
П.6	MATLAB
П.7	Microsoft Word
П.8	Microsoft Excel
П.9	Microsoft PowerPoint

6.4. Перечень информационных справочных систем и профессиональных баз данных

И.1	ScienceDirect - база полнотекстовых научных журналов и книг издательства Эльзевир.
И.2	Scopus - крупнейшая в мире единая реферативная база данных научных публикаций.

7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ		
Ауд.	Назначение	Оснащение
Л-117	Учебная аудитория/Лаборатория гидропривода:	"учебный стенд «Объемные гидромашины и гидроустройства» СГУ-ИГМ-08 , учебный стенд

8. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ
<p>Подготовка к лекциям.</p> <p>Подготовка к лекционному занятию включает выполнение всех видов заданий, рекомендованных к каждой лекции, т.е. задания выполняются еще до лекционного занятия по соответствующей теме.</p> <p>В ходе лекционных занятий необходимо вести конспектирование учебного материала, обращать внимание на категории, формулировки, раскрывающие содержание тех или иных явлений и процессов, научные выводы и практические рекомендации. При необходимости задавать преподавателю уточняющие вопросы.</p> <p>Работая над конспектом лекций, Вам всегда необходимо использовать не только учебник, но и ту литературу, которую дополнительно рекомендовал лектор. Именно такая серьезная, кропотливая работа с лекционным материалом позволит глубоко овладеть теоретическим материалом.</p> <p>Подготовка к практическим или лабораторным занятиям</p> <p>Подготовку к каждому практическому или лабораторному занятию Вы должны начать с ознакомления с планом практического или лабораторного занятия, который отражает содержание предложенной темы. Тщательное продумывание и изучение вопросов плана основывается на проработке текущего материала лекции, а затем изучения обязательной и дополнительной литературы, рекомендованной к данной теме. Все новые понятия по изучаемой теме необходимо выучить наизусть и внести в глоссарий, который целесообразно вести с самого начала изучения курса.</p> <p>В процессе подготовки к практическим или лабораторным занятиям, Вам необходимо обратить особое внимание на самостоятельное изучение рекомендованной литературы. При всей полноте конспектирования лекции в ней невозможно изложить весь материал из-за лимита аудиторных часов. Поэтому самостоятельная работа с учебниками, учебными пособиями, научной, справочной литературой, материалами периодических изданий и Интернета является наиболее эффективным методом получения дополнительных знаний, позволяет значительно активизировать процесс овладения информацией, способствует более глубокому усвоению изучаемого материала, формирует у Вас отношение к конкретной проблеме.</p> <p>Ваша самостоятельная работа может осуществляться в аудиторной и внеаудиторной формах. Самостоятельная работа в аудиторное время включает:</p> <p>1. Самостоятельную работу по теоретическому курсу: аудиторную самостоятельную работу на лекциях, работу с лекционным материалом после лекции, выполнение дополнительных индивидуальных заданий на практических занятиях и лабораторных работах. Самостоятельная работа на лекции выполняется в конце каждой лекции и заключается в решении небольшой задачи, поставленной преподавателем по материалу прочитанной лекции. Каждый студент имеет контрольный лист, на котором указывается фамилия, имя, отчество, группа, номер лекции, дата, задание и ответ (решение) задачи. После занятий преподаватель проверяет правильность выполнения заданий и, при необходимости, дает на следующем занятии или на консультации дополнительное задание для исправления допущенных ошибок.</p> <p>Анализ контрольных листов позволяет преподавателю оценить усвоение материала каждой лекции каждым студентом и параллельно – учесть посещаемость лекций. Материал пропущенной лекции студент должен сдавать преподавателю в письменной форме в часы консультаций.</p> <p>Работа с лекцией включает в себя дополнение конспекта сведениями из рекомендованной литературы (с указанием использованного источника).</p> <p>Возможны выступления студентов на лекции по отдельным вопросам обсуждаемой темы (проработанные самостоятельно под руководством преподавателя); сообщения занимают 7...10 мин. Такие выступления помогают четко выражать свои мысли, аргументировано излагать и отстаивать свою точку зрения при ответе на вопросы. Самостоятельное изучение практического материала планируется из расчета 0,3 ч на 1 ч лекции.</p> <p>Работа с материалом лекции, выполненная через один-два дня после ее прослушивания, позволяет выделить неясные моменты, которые необходимо либо самостоятельно разобрать, пользуясь рекомендованными литературными источниками, либо обсудить с преподавателем на ближайшей консультации. Такой самоконтроль может войти в объем самостоятельной работы студента, предусмотренный рабочей программой.</p> <p>2. Аудиторную самостоятельную работу на практических и лабораторных занятиях по программе дисциплины. Они обеспечивают получение навыков и умений, необходимых при изучении данной дисциплины, а также необходимых в последующем обучении и трудовой деятельности. Кроме того, они обеспечивают общение участников в диалоговом режиме и дают опыт совместного участия в решении проблем.</p> <p>3. Внеаудиторную самостоятельную работу.</p>

Литература

Л1.1	Гудилин Н. С., Кривенко Е. М., Маховиков Б. С., др., Пастоев И. Л.	Гидравлика и гидропривод: учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по напр. "Горное дело" и спец. "Горные машины и	Библиотека МИСиС	М.: Горная книга, 2007
6.1.2. Дополнительная литература				
	Авторы,	Заглавие	Библиотека	Издательство, год
	Авторы,	Заглавие	Библиотека	Издательство, год
Л2.1	Крестин Е. А.	Гидравлика: учебное пособие	Электронная библиотека	Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2010
Л2.2	Малашкина В. А.	Гидравлика: учебное пособие	Электронная библиотека	Москва: Московский государственный горный университет, 2012
6.1.3. Методические разработки				
	Авторы,	Заглавие	Библиотека	Издательство, год
Л3.1	Иванов С. А., Чиченев Н. А.	Гидравлика: лаб. практикум	Электронная библиотека	М.: Изд-во МИСиС, 2008
Л3.2	Малашкина В. А.	Гидравлика: учеб. пособие для проведения практ. занятий и самостоят. работы студ.	Библиотека МИСиС	М.: Изд-во МГГУ, 2006
Л3.3	Коваль П. В.	Гидравлика и гидропривод горных машин: учеб. для студ. вузов, обуч. по спец. "Горн. машины и	Библиотека МИСиС	М.: Машиностроение, 1979

КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ

Дисциплина считается освоенной при выполнении следующих условий:

- текущий лекционный контроль имеет положительные оценки ("удовлетворительно"; "хорошо"; "отлично");
- выполнены и защищены все лабораторные работы;
- выполнены и защищены все практические работы;
- зачет сдан на положительную оценку ("удовлетворительно"; "хорошо"; "отлично").

Критерии оценивания зачета с оценкой

«2» (неудовлетворительно) «3» (удовлетворительно) Студент за время семестра не выполнил и (или) не защитил все практические и лабораторные работы.

«3» (удовлетворительно) Студент за время семестра выполнил все практические и лабораторные работы. Все практические и лабораторные работы защищены с оценкой не ниже "удовлетворительно".

«4» (хорошо) Студент за время семестра выполнил все практические и лабораторные работы. Более 75% всех практических и лабораторных работ защищены с оценкой "хорошо", а остальные 25% не ниже оценки "удовлетворительно"

«5» (отлично) Студент за время семестра выполнил все практические и лабораторные работы. Более 75% всех практических и лабораторных работ защищены с оценкой "отлично", а остальные 25% не ниже оценки "хорошо"

ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ

1. Поверхностные силы, действующие на жидкость. Понятие давления в жидкости. Основные единицы измерения и их размерность
2. Явление кавитации в жидкости. Физическая сущность явления, условия возникновения, последствия, методы борьбы с кавитацией
3. Основное уравнение гидростатики. Его вывод и частные случаи
4. Понятие давления в жидкости. Единицы измерения, их соотношение в различных системах единиц, указать размерность
5. Полный дифференциал давления по Эйлеру. Математическое выражение, применение в гидромеханики
6. Свойство вязкости жидкости. Формула Петрова. Коэффициент динамической вязкости μ , его физический смысл и размерность
7. Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости. Математическое выражение. Физический смысл членов уравнения, их размерность. Какие параметры движущегося потока математически увязывает это уравнение?
8. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Физический смысл каждого члена уравнения и их размерность. Практическое значение уравнения
9. Приборы для измерения давления в жидкости. Типы, область применения, класс точности, погрешность при измерении. Правила выбора манометра
10. Геометрия потоков жидкости. Понятия: живое сечение, смоченный периметр, гидравлический радиус, расход жидкости. Математическое выражение, размерность
11. Коэффициент гидравлических сопротивлений λ . От чего он зависит. Графики Никурадзе-Мухина.
12. Взаимодействие жидкости с наклонной твердой стенкой
13. Формула Торичелли, как следствие уравнения Бернулли
14. Гидравлические сопротивления. Понятие линейных потерь напора. Формула Дарси, коэффициент гидравлического сопротивления λ , его выражение для гидравлически гладких труб
15. Турбулентный режим движения жидкости. Эпюра скоростей частиц жидкости по сечению потока. Коэффициент Кориолиса
16. Турбулентный режим движения жидкости. Понятие гидравлически гладкой и гидравлически шероховатой трубы. Где используются эти понятия?
17. Истечение жидкости из отверстий. Понятие отверстия в тонкой стенке. Совершенное и несовершенное сжатие струи, явление инверсии струи. Расход жидкости в отверстии
18. Гидравлический удар в трубе. Физическая сущность. Фазы удара. Скорость ударной волны. Формула Н.Е. Жуковского. Понятия полного и неполного гидравлического удара. Методы борьбы с гидравлическим ударом
19. Местные гидравлические потери напора. Формула Вейсбаха. Основные виды местных сопротивлений. Эквивалентная длина местных потерь. Понятие коротких трубопроводов
20. Свойство сжимаемости жидкости. Математическое выражение, критерии оценки. На что влияет свойство сжимаемости жидкости в гидросистемах машин?

ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ

В О П Р О С Ы

для итоговой контрольной работы
по дисциплине «ГИДРАВЛИКА»
1 – ВАРИАНТ

1. Основные свойства жидкостей.
2. Закон Паскаля и его практическое применение.

Ключевые слова

Жидкость; текучесть; капельные; газообразные; вязкость; сплошная среда; свободная поверхность; трение. Давление; абсолютное давление; гидроаккумуляторы; удельный вес; поршень; цилиндр; сила; давление; свободная поверхность. Механическая энергия, энергия перемещения жидкости; гидравлическая энергия; лопастной; объёмный; центробежный; поршневой; роторный.

В О П Р О С Ы

для итоговой контрольной работы
по дисциплине «ГИДРАВЛИКА »
2 – ВАРИАНТ

1. Ламинарное и турбулентное движение жидкостей.
2. Приборы и методы измерения давления.
3. Коэффициент полезного действия лопастных гидравлических машин.

Ключевые слова

Слоистый; частица; скорость; давление; число Рейнольдса; ; траектория пересечения; переход от одного режима движения жидкости к другому. Пьезометр; давление; свободная поверхность; основное уравнение гидростатики; избыточное давление; U-образный манометр; дифференциальный манометр; вакуумметр.

Составил:

В О П Р О С Ы
для итоговой контрольной работы
по дисциплине «ГИДРАВЛИКА»
3 – ВАРИАНТ

1. Динамическая и кинематическая вязкость жидкости и приборы измерения.
2. Закон Архимеда. Плавание тел.
3. Лопастные насосы.

Ключевые слова

Реальная жидкость; частица; касательные силы трения; потери энергии; гипотеза Ньютона; силы внутреннего трения; градиент скорости; коэффициент вязкости; теория кораблей; выталкивающая сила; вес жидкости; удельный вес тела; удельный вес жидкости. Резервуар; клапан; нагнетание; фильтр; высота всасывания; высота нагнетания; статистическая высота.

В О П Р О С Ы
для итоговой контрольной работы
по дисциплине «ГИДРАВЛИКА»
4 – ВАРИАНТ

1. Поверхностное натяжение жидкости. Свободная поверхность жидкости и давления на стенке.
2. Основное уравнение гидростатики.
3. Динамические насосы.

Ключевые слова

Напряжение; формула Лапласа. Кинематическая энергия; эпюр давления; рабочее колесо; рабочая камера; вакуум; центробежная сила; диффузор; гидравлический удар; поршневой насос; лопастной насос.

В О П Р О С Ы
для итоговой контрольной работы
по дисциплине «ГИДРАВЛИКА»
5 – ВАРИАНТ

1. Методы измерения расхода и скорости.
2. Абсолютное, манометрическое, вакуумметрическое и атмосферное давление жидкости и их единицы измерения.

Ключевые слова

Объёмный метод; расход; живое сечение; весовой метод; вес жидкости; весовой расход; удельный вес; объем жидкости; сила; поверхность; ртутная столба; вод. столба. Уравнение Эйлера; рабочее колесо; лопасть; теоретическое давление; скорость вращения; абсолютная скорость; количество вращения.

В О П Р О С Ы

для итоговой контрольной работы
по дисциплине «ГИДРАВЛИКА»

5 – ВАРИАНТ

1. Давление насыщенного пара жидкости. Понятие о кавитации.
2. Истечение жидкости из отверстия в тонкой стенке.
3. Явление кавитации и предупреждение его появления.

Ключевые слова

Свободное испарение; состояние равновесия; кавитация; температура кипения; раствор; лёгкий компонент.. Свободная поверхность; совершенные отверстия; местные потери энергии; формула Торричелли; теоретический расход. Агрегатное состояние; местное сужение; гидравлический удар; клапан.

В О П Р О С Ы

для итоговой контрольной работы
по дисциплине «ГИДРАВЛИКА»

7 – ВАРИАНТ

1. Расход и средняя скорость потока при ламинарном движении жидкости.
2. Давление на плоские поверхности.
3. Работа центробежного насоса на трубопровод.

Ключевые слова

Вязкость; сила давления; параболический закон; цилиндрическая труба; скорость; расход; средняя скорость; максимальная высота. Трубопровод; центробежный насос; давление; напор; характеристика трубопровода; характеристика насоса; оптимальный режим; производительность; энергия двигателя.

В О П Р О С Ы

для итоговой контрольной работы
по дисциплине «ГИДРАВЛИКА»

8 – ВАРИАНТ

1. Турбулентный режим движения жидкости.
2. Основные задачи гидродинамики.
3. Последовательное соединение насосов. Общие характеристики центробежных насосов.

Ключевые слова

Турбулентность; траектория; хаотичность; слой; поперечное движение; количественное подобие. Скорость; закон движения жидкости; сжимаемость; показатели движения; время; установившееся; неустойчивое; резервуар. Насадка; расход; общее давление; общая мощность; коэффициент полезного действия.

В О П Р О С Ы

для итоговой контрольной работы
по дисциплине «ГИДРАВЛИКА»
9 – ВАРИАНТ

1. Идеальный газ (основные законы Бойля-Мариотта и Гей-Люссака, уравнения Клаперона).
2. Гидравлические элементы потока линия тока.
3. Объемные насосы и их классификация.

Ключевые слова

Масса газа; вектор скорости; ломаная линия; поперечное сечение; непроницаемая поверхность. Жидкость; объем; сила; потенциальная энергия; нагнетания; к.п.д.; механизм сдвиг; поршневой; давление; возвратно-поступательная; ротор; роторные насосы.

В О П Р О С Ы

для итоговой контрольной работы
по дисциплине «ГИДРАВЛИКА»
10 – ВАРИАНТ

1. Пульсация скорости в турбулентном потоке и осреднённая скорость по времени.
2. Давление жидкости на криволинейные поверхности.
3. Коэффициент полезного действия насосов.

Ключевые слова

. Пульсация; время; колебательное движение; уравновешенная скорость (скорость по времени). сы; потери энергии; механический; объёмный; гидравлический; теоретический расход; действительный расход; местный вакуумметр; труба нагнетания; объёмный к.п.д.; давление нагнетания; трение; манометр; объём.

ТЕСТОВЫЕ ВОПРОСЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«ГИДРАВЛИКА»

Как называется высота, на которую жидкость поднимается в пьезометре?	*Пьезометрическая высота	Геометрическая высота	Гидравлическая высота	Все ответы правильны
Что называется безнапорным движением?	*Движение жидкости в потоке со свободной поверхностью	Движение жидкости в потоке без свободной поверхности	Движение, потока со всех сторон ограничен твердыми стенками	Все ответы правильны
Назовите движение, при котором все частицы жидкости движущейся по беспорядочно хаотическое?	*Турбулентный режим движения	Ламинарное движение жидкости	Переходное движение жидкости	Все ответы правильны
Движение, при котором скорости, ускорения, давления, глубины меняются, с течением времени являются...	*Неустанно-ввишемся движением	Установившемся движением	равномерным движением	Неравномерным движением
С помощью каких приборов измеряется гидростатическое давление?	*пьезометр	термометр	микрометр	трубка Пито
Что называется свободной поверхностью жидкости?	*поверхность, граничащая с газовой средой	поверхность, ограниченная стенкой	жидкость, находящаяся в равновесии	жидкость, находящаяся в вакууме
При каком условии возникает вакуум?	*если давление меньше атмосферного	если давление больше атмосферного	если давление атмосферное	когда избыточное давление
Выберите основное уравнение гидростатики	$* p = p_0 + \gamma h$	$p_0 = \gamma h - gh$	$p_0 =$	$p_0 = p + pgh$
Давление, равное разности полного гидростатического давления и атмосферного это...	*Манометрическое давление	абсолютное давление	Гидростатическое давление	внешнее давления
Определите прибор для измерения давления ниже атмосферного?	*вакуумметр	трубка Пито	водомер Вентури	секундомер
Смысл закона Паскаля: когда давление приложено к жидкости...	*давление передается во все стороны одинаково	давление передается во все стороны не одинаково	давление действует только на дно сосуда	Все ответы правильны
Найдите из перечисленных формул формулировку гидростатического парадокса.	*Гидростатическое давление зависит от площади, глубины и не зависит от формы сосуда	Гидростатическое давление зависит только форма сосуда	Гидростатическое давление не зависит от площади дна сосуда	Гидростатическое давление зависит от глубины и формы сосуда
Кто из ученых установил, что:»Абсолютное давление в точках жидкости, находящихся на разной глубине различно. Однако давление на жидкость, заключенную в	*Паскаль	Архимед	Эйлер	Бернулли

замкнутом сосуде, передается всем ее частицам без изменения?				
Какая гидравлическая машина служит для получения больших сжимающих усилий?	*Гидравлический пресс	Гидравлический аккумулятор	Гидравлический насос	гидравлический двигатель
Сформулируйте закон Архимеда:	*На тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная F_T в объеме этого тела	На тело, погруженное в жидкость, действует только сила тяжести	На тело, погруженное в жидкость, действует сила, равная весу этого тела	На тело, погруженное в жидкость, не действует никаких сил
Какая гидравлическая машина служит для накапливания энергии?	*Гидравлический аккумулятор	Гидравлический двигатель	Гидравлический насос	Гидравлический пресс
Выберите условие равновесия плавающего тела, где G-сила тяжести, P- выталкивающая сила.	* $G = P$	$G < P$	$G > P$	$G \geq P$
Одно из условий равновесия плавающего тела:	*Центры тяжести тела и давления лежат на одной вертикали	Центр тяжести тела и давления не лежат на одной вертикали	Центр давления и центр приложения силы не лежат на одной вертикали	Все ответы правильны
Объемное взаимодействие-это?	*Объем жидкости, вытесненной телом	Объем плавающего тела	Объем жидкости в котором находится тело	Все ответы правильны
Как называется графическое изображение гидростатического давления?	*Эпюра	Система координат	Схема	Эллипс
Какой закон характеризует плавучесть тела, погруженного в нее тело?	*Сила Архимеда	Сила тяжести	Сила трения	Сила упругости
Как называется состояние, когда часть тела погружена в жидкость?	*Тело плавает	Тело тонет	Тело всплывает	Тело находится в покое
Поток-это...?	*Совокупность элементарных струек жидкости	Совокупность пластов жидкости	Совокупность элементарных струек жидкости только при ламинарном течении	Совокупность окрашенных струек жидкости
Расход жидкости - это количество жидкости...	*проходящее через за единицу времени	проходящее через живое сечение	проходящее через малое отверстие	Проходящее через большое отверстие
Движение, при котором скорости, ускорения, давления, глубины не меняются, с течением времени являются...	*Установившемся движением	Неустановившемся движением	равномерным движением	неравномерным движением
Что называется гидродинамикой,	*Раздел гидравлики, в котором изучаются законы движения жидкостей	Раздел гидравлики, в котором изучаются законы жидкостей находящихся в покое или равновесии	Это прикладная техническая наука, занимающаяся изучением капельных жидкостей, находящихся в покое или	Это наука, в которой применяются строго математические методы

			равновесии	
Что называется напорным движением?	*Движение жидкости в потоке без свободной поверхности	Движение жидкости в потоке со свободной поверхностью	Движение, когда поток не со всех сторон ограничен твердыми стенками	Все ответы правильны
Как называется линия, в каждой точке которой в данное мгновение вектор скорости жидкости совпадает с направлением касательной к этой линии?	*Линия тока	Линия напора	Линия потока	Линия движения жидкости
Назовите движение, при котором все частицы жидкости движущейся по параллельным траекториям?	*Ламинарное струйчатое движение	Турбулентный режим движения	Движение идеальной жидкости	Все ответы правильны
что означает высота высасывание $H_{вс}$ при работе насосной системы.	*Расстояние от уровня жидкости расходного бака до уровня установленного насоса	Расстояние от уровня жидкости приёмного бака до уровня установленного насоса	Расстояние от уровня жидкости расходного бака до уровня жидкости приёмного бака	Все ответы правильны
Кем был установлен в 1686г закон динамического подобия?	*Ньютон	Рейнольдс	Архимед	Паскаль
Какое движение совершают жидкости при турбулентном движении?	*Хаотичное	струйчатое	По траектории трубы	Все ответы правильны
Число Рейнольса определяется по формуле?	* $Re = vd/\nu$	$Re = S/\nu$	$Re = \omega R/\nu$	$Re = 9R/\rho\nu$
Сколько существует режимов жидкости?	*2	1	3	4
Что означает формула $\frac{h_w}{l} = i$	*Гидравлический уклон	Пьезометрический уклон	Расход жидкости	Гидравлический радиус
Из каких потерь складываются потери в коротких трубопроводах?	*Из местных	Из внутренних	Из внешних	Все ответы правильны
Какой прибор показывает избыточное давление в нагнетательной линии?	*Манометр	Трубка Пито	Вакууметр	Микрометр
Какой прибор показывает величину разрежения во всасывающей трубе?	*Вакууметр	Микрометр	Термопара	Термометр
Выберите единицу измерения коэффициента шероховатости?	*Ни в чем не измеряется	Мм	сек	Все ответы правильны
Жидкость-это...?	*Физическое тело, которое легко изменяет свою форму под действием самых незначительных сил	Физическое тело, которое не изменяет свою форму под действием любых по величине сил	Физическое тело, которое легко изменяет свою форму без действия сил	Физическое тело, частицы которого находятся в постоянном хаотическом движении

На какие два вида делятся жидкости?	*Капельные и газообразные	Идеальные и капельные	Капельные и упругие	Упругие и газообразные
Выберите формулу для определения удельного веса жидкости.	$\gamma = G/V$	$\gamma = GV$	$\gamma = G + V$	$\gamma = G - V$
Вязкость-это...?	*Свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигающим касательным усилиям	Свойство жидкости не оказывать сопротивления сдвигающим касательным усилиям	Свойство жидкости, характеризуемое коэффициентом объемного сжатия	Все ответы правильны
Что происходит с коэффициентом температурного расширения для воды с увеличением давления?	*Увеличивается	Уменьшается	Не изменяется	Все ответы правильны
Что называется кавитацией?	*Образование полостей, заполненных воздухом или паром	Образование полостей, заполненных твердыми телами	Образование трещин, заполненных водой или паром	Все ответы правильны
что означает высота нагнетания $H_{\text{наг}}$ при работе насосной системы	*Расстояние от уровня жидкости приёмного бака до уровня установленного насоса	Расстояние от уровня жидкости расходного бака до уровня установленного насоса	Расстояние от уровня жидкости расходного бака до уровня жидкости приёмного бака	Все ответы правильны
Поверхность натяжения - это...?	*Свойство жидкости, которое обусловлено силами взаимного притяжения, возникающими между частицами поверхностного слоя и вызывающими его напряженное состояние	Свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигающим касательным усилиям	Свойство жидкости не оказывать сопротивление сдвигающим касательным усилиям	Все ответы правильны
Что называется сжимаемостью?	*Свойство жидкости изменять свой объем при изменении давления	Свойство жидкости сохранять свой объем при изменении давления	Свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигающим касательным усилиям	Все ответы правильны
Какие способы измерения расхода жидкости являются наиболее простыми?	*Объемный и весовой	Измеряемой диафрагмой	Измеряемой трубкой Пито	Измеряемой Водомер Винтуре
Когда движение жидкости будет безнапорным?	*Движение жидкости частично ограниченном стенками	Движение жидкости не ограниченном стенками	Движение жидкости не ограниченном стенками	Движение жидкости в продольном сечении не ограниченном стенками
Что является обратной ударной волной?	*Понижение давления, передающееся от слоя к слою	Повышение давления	Понижение давление	Все ответы правильны
Вследствие чего возникают местные сопротивления?	*Вследствии изменения формы потока	Вследствии изменения скорости потока	Вследствии сохранения скорости потока	Вследствии сохранения формы потока

Какой вид потери напора определяется как арифметическая сумма потерь всех видов?	*Полная потеря напора	Не полная потеря напора	Частичная потеря напора	Минимальная потеря напора
Местные сопротивления возникают вследствие...	*Изменения формы потока	Сохранения формы потока	насадок	Изменения скорости потока
Трубопроводы делятся на ...?	*Простые и сложные	Малые и большие	С малыми и большими отверстиями	С насадками и без них
Центробежные насосы разделяют на...	*Тихоходные и быстроходные	Диогональные	Пропеллерные	опасные
Что означает статистическая высота $H_{вт} = H_{вс} + H_{наг}$	*Расстояние от уровня жидкости расходного бака до уровня жидкости приёмного бака	Расстояние от уровня жидкости приёмного бака до уровня установленного насоса	Расстояние от уровня жидкости расходного бака до уровня установленного насоса	Все ответы правильны
Гидравлический удар возникает вследствие...?	*Резко Fa увеличение давления	Изменения времени	Изменения скорости	Изменения направления движения жидкости
Что опасно для целостности труб при гидравлическом ударе?	*Возникающие большие давления	Использование труб несоответствующего диаметра	Скорость течения жидкости	Возникающее меньшее давление
как называется установленная трубочка стенках емкости для истечения жидкости	*насадка	Пробирка	мензурка	Все ответы правильны.
За счет чего можно уменьшить гидравлический удар?	*За счет медленного закрытия трубопровода	За счет открытия задвижки	За счет резкого включения насосов	За счет резкого выключения насосов
Куда поступает жидкость в центробежном насосе из всасывающей трубы?	*Лопасте рабочего колеса	Корпус насоса	Во внешнюю среду	Все ответы правильны
Что вызывает повышение давления, распространяясь по трубопроводу с большой скоростью?	*Сжатие жидкости	Расширение жидкости	Увеличение объема	Уменьшение объема

ЛИТЕРАТУРА

Основная литература				
	Авторы, составители	Заглавие	Библиотека	Издательство, год
Л1.1	Гудилин Н. С., Кривенко Е. М., Маховиков Б. С., др., Пастоев И. Л.	Гидравлика и гидропривод: учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по напр. "Горное дело" и спец. "Горные машины и оборудование"	Библиотека МИСиС	М.: Горная книга, 2007
Дополнительная литература				
	Авторы,	Заглавие	Библиотека	Издательство, год
	Авторы,	Заглавие	Библиотека	Издательство, год
Л2.1	Крестин Е. А.	Гидравлика: учебное пособие	Электронная библиотека	Самара: Самарский государственный архитектурно- строительный университет, 2010
Л2.2	Малашкина В. А.	Гидравлика: учебное пособие	Электронная библиотека	Москва: Московский государственный горный университет, 2012
Методические разработки				
	Авторы,	Заглавие	Библиотека	Издательство, год
Л3.1	Иванов С. А., Чиченев Н. А.	Гидравлика: лаб. практикум	Электронная библиотека	М.: Изд-во МИСиС, 2008
Л3.2	Малашкина В. А.	Гидравлика: учеб. пособие для проведения практ. занятий и самостоят. работы студ.	Библиотека МИСиС	М.: Изд-во МГГУ, 2006
Л3.3	Коваль П. В.	Гидравлика и гидропривод горных машин: учеб. для студ. вузов, обуч. по спец. "Горн. машины и комплексы"	Библиотека МИСиС	М.: Машиностроение, 1979