

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Составители
В. В. Кузнецов
К. А. Ананьев
А. Н. Ермаков
Ю. В. Дрозденко

**ГИДРОМЕХАНИКА, ГИДРАВЛИКА,
МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА**

Лабораторный практикум

Кемерово 2019

УДК 532.5:621.22 (075.8)

Рецензенты

В. В. Аксенов – доктор технических наук, главный научный сотрудник ИУ ФИЦ УУХ СО РАН.

А. М. Попов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машин и аппаратов технологических систем КемГУ.

Кузнецов Владимир Всеволодович

Гидромеханика, гидравлика, механика жидкости и газа: лабораторный практикум / сост. В. В. Кузнецов, К. А. Ананьев, А. Н. Ермаков, Ю. В. Дрозденко; КузГТУ. – Кемерово, 2019. – 108 с.

ISBN 978-00137-066-6

Лабораторный практикум содержит сведения о требованиях, мерах безопасности и порядке выполнения лабораторных работ. Каждая лабораторная работа снабжена краткими теоретическими сведениями по изучаемому вопросу.

Подготовлен для студентов технических специальностей.

Печатается по решению редакционно-издательского совета КузГТУ.

УДК 532.5:621.22 (075.8)

© КузГТУ, 2019

© Кузнецов В. В.,
Ананьев К. А.,
Ермаков А. Н.,
Дрозденко Ю. В.,
составление, 2019

ISBN 978-00137-066-6

Оглавление

1. Общие положения.....	4
2. Требования к выполнению лабораторных работ.....	4
3. Содержание отчета по лабораторным работам.....	4
4. Меры безопасности при выполнении лабораторных работ...	5
5. Защита лабораторных работ	5
6. Основное назначение гидравлического стенда.....	6
7. Конструкция и устройство гидравлического стенда	6
8. Содержание лабораторных работ.....	15
Лабораторная работа № 1	15
Лабораторная работа № 2	24
Лабораторная работа № 3	34
Лабораторная работа № 4	43
Лабораторная работа № 5	56
Лабораторная работа № 6	64
Лабораторная работа № 7	75
Лабораторная работа № 8	88
Лабораторная работа № 9	96
Список литературы.....	105
Приложение 1	106
Приложение 2.....	107

1. Общие положения

В настоящем издании представлены лабораторные работы по дисциплинам «Гидромеханика», «Гидравлика», «Механика жидкости и газа», предназначенные для практического ознакомления студентов с основными свойствами и законами движения жидкости. Лабораторные работы позволяют студентам узнать методы и средства измерения параметров потока жидкости, научиться планировать и проводить экспериментальные исследования, выполнять обработку полученных результатов и расчет гидравлических систем.

Лабораторные работы (кроме первой) выполняются на стенде гидравлическом универсальном «Экспериментальная механика жидкости» ЭМЖ-09-14ЛР-01 (далее Стенд). Первая лабораторная работа проводится с использованием компьютерной симуляции.

2. Требования к выполнению лабораторных работ

Лабораторные работы должны быть результатом самостоятельной и творческой работы студента. Все режимы работы экспериментальных установок задаются, а требуемые замеры выполняются студентом.

Техническое оформление лабораторных работ должно соответствовать ЕСКД.

Подготовка к выполнению лабораторных работ заключается в изучении схемы установки и порядка проведения опытов, а также в предварительном оформлении отчета по лабораторной работе.

Отчет по лабораторной работе должен быть написан на одной стороне листов формата А4 и отличаться краткостью и ясностью изложения без сокращения фраз и ненужных пояснений. В начале отчета должен быть титульный лист установленного образца. По согласованию с преподавателем допускается оформление отчетов в учебных тетрадях. Содержание отчета приведено в п. 3.

Студент, не подготовивший отчет по лабораторной работе, не допускается до ее выполнения!

3. Содержание отчета по лабораторным работам

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1) цель работы;

- 2) схему и краткое описание конструкции экспериментальной установки;
- 3) порядок выполнения экспериментов;
- 4) расчетные формулы по обработке результатов замеров;
- 5) таблицу замеров и результатов расчетов, а также необходимые графики и диаграммы.

Приведенные в начале каждой лабораторной работы теоретические положения необходимо изучить перед выполнением экспериментов. В отчет они не включаются.

4. Меры безопасности при выполнении лабораторных работ

На первом занятии преподаватель обязан под роспись ознакомить студентов с инструкцией по технике безопасности, утвержденной для соответствующей лаборатории. Студенты обязаны строго выполнять требования инструкции при выполнении лабораторных работ.

Все включения и выключения лабораторных установок осуществляются преподавателем или ответственным лаборантом. Ряд лабораторных работ выполняется на компьютерах, при этом необходимо соблюдать правила работы с данными устройствами.

К работе на лабораторной установке студент приступает только после тщательного и полного изучения порядка проведения опытов конкретной работы и проверки знаний преподавателем.

5. Защита лабораторных работ

Каждая работа должна быть индивидуально защищена студентом на предназначенных для этого лабораторных занятиях. Защита предполагает раскрытие теоретического вопроса по тематике защищаемой работы. Краткие теоретические сведения представлены в каждой работе данного лабораторного практикума.

Примерные контрольные вопросы для защиты приведены в описании каждой лабораторной работы.

Для вынесения лабораторной работы на защиту должны быть выполнены все необходимые расчеты, заполнены таблицы и построены графики.

6. Основное назначение гидравлического стенда

Типовой комплект учебного оборудования позволяет исследовать режимы течения от ламинарного до турбулентного с визуализацией течения; определять потери давления (напора) при течении через местные сопротивления и по длине; иллюстрировать уравнение Бернулли и диаграмму напоров (для резкого расширения, для плавного сужения и расширения) с изменением положения трубопровода в вертикальной плоскости; изучать характеристики трубопроводов с местными сопротивлениями и силовое воздействие струи на преграду; исследовать характеристики насоса и характеристики работы одного и двух насосов (применяемых в насосной установке) при различных схемах включения.

Оборудование, установленное на стенде, позволяет измерять расход жидкости двумя способами: объемным способом с использованием мерной емкости и секундомера (секундомер электронный, закреплен на панели стенда) и с помощью расходомера с электронным выходом. Расход измеряется в полуавтоматическом (по датчикам заполнения емкости) или ручном (с использованием секундомера с ручным запуском и остановкой) режиме.

В стенде использован замкнутый поток жидкости (вода). Предусмотрено подключение к внешнему источнику воды и слив в канализацию. Данное условие является необходимым при проведении лабораторных работ по визуализации режимов течения с помощью подкрашивания потока (классический опыт Рейнольдса).

7. Конструкция и устройство гидравлического стенда

Общий вид стенда представлен на рисунке 1. Принципиальная схема стенда изображена на рисунке 2. Состав стенда представлен в таблице 1. Далее в описании стенда цифры без скобок показывают позицию оборудования на общем виде (рис. 1), а обозначение в скобках – позицию на схеме (рис. 2).

Стенд состоит из рамы 1 с закрепленными на ней вертикальной передней панелью 4, поддонами верхним 2 и нижним 3, мерной емкостью 5 (ЕМ1), гидравлическим баком 6 (Б1) для рабочей жидкости, дополнительным резервуаром (накопительным баком) 7 (Б2) и емкостью для окрашенной жидкости 7.1 (Б3).

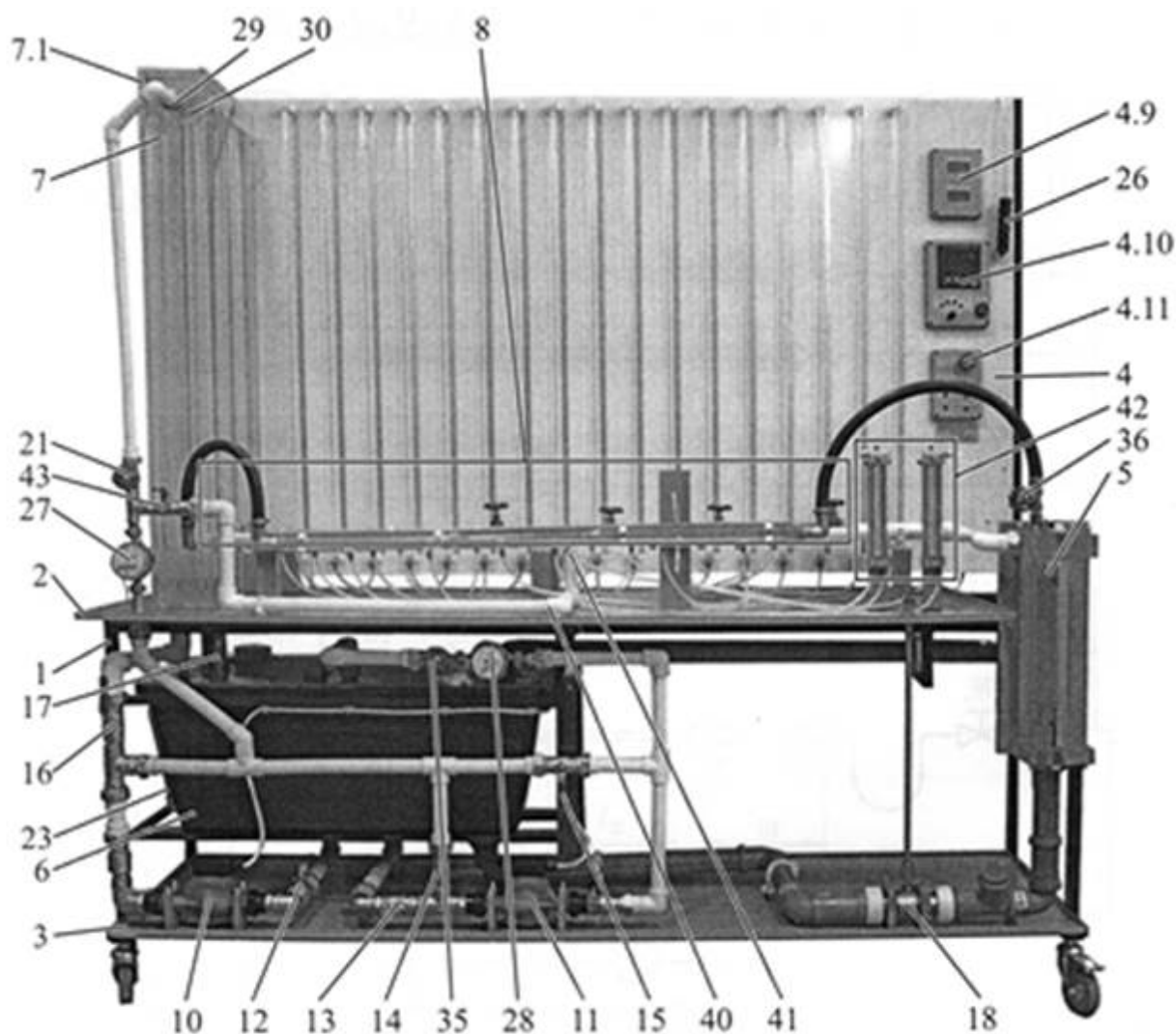


Рис. 1. Стенд гидравлический универсальный ЭМЖ-09-14ЛР-01.
Общий вид

На передней панели 4 установлена контрольно-измерительная аппаратура и система пьезометрических трубок с линейками. Пьезометры на гидравлической схеме (рис. 2) пронумерованы слева направо от 1 до 17, т. е. крайний левый пьезометр имеет номер 1, крайний правый – номер 17.

На верхнем поддоне 2 смонтированы: система кранов, вентилях управления и исследуемых трубопроводов 8; исследуемые элементы «отвод» 40 (01) и «тройник» 41 (ТР1); два дифференциальных пьезометра 42 (ПД1, ПД2); кран 43 (КР9) для направления потока жидкости от расходомера 27 (РМ1) через «отвод» и «тройник» к мерной емкости 5 (ЕМ1).

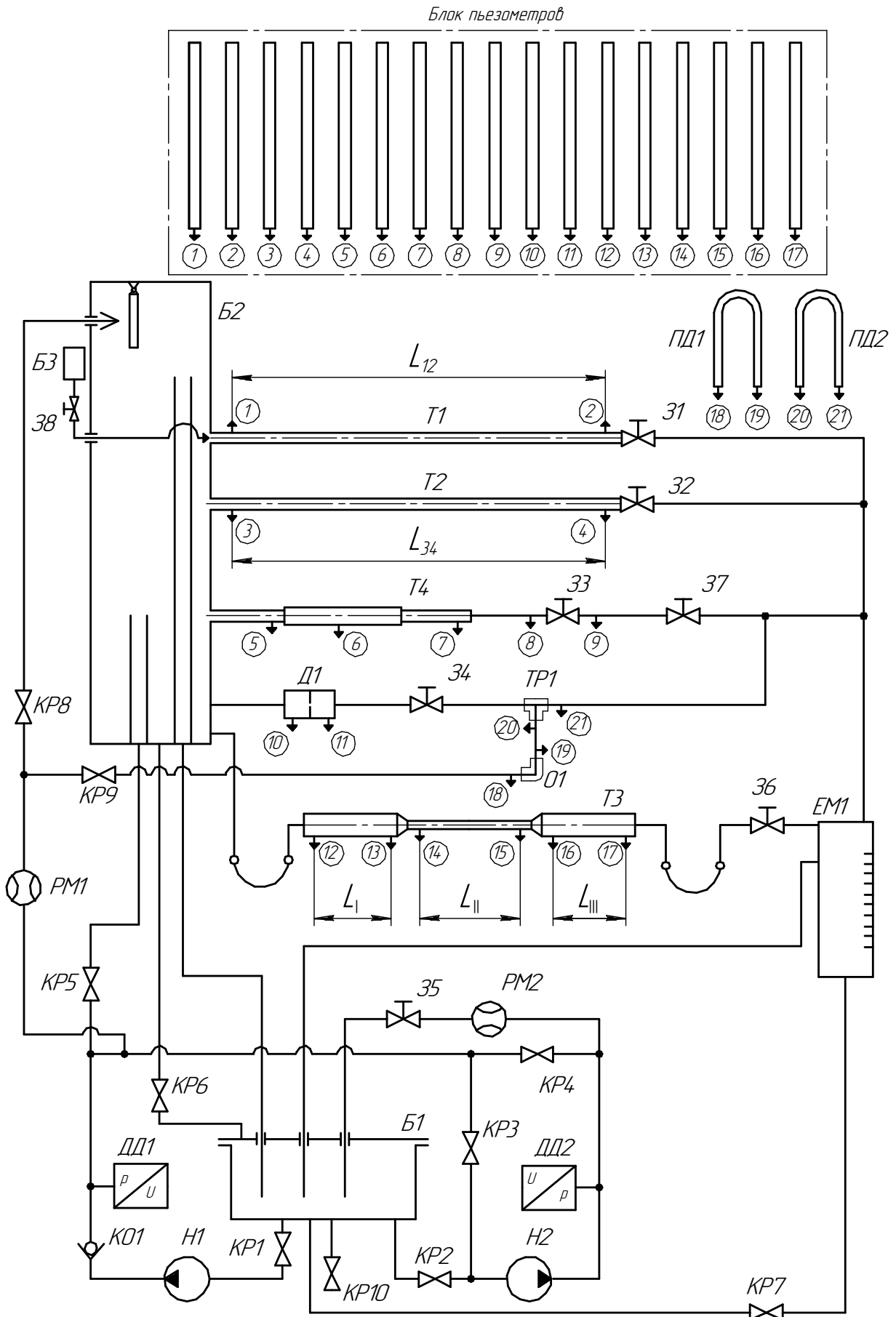


Рис. 2. Схема учебного стенда. $L_{12} = 1000$ мм, $L_{34} = 1000$ мм, $L_{05} = 100$ мм; $L_{67} = 240$ мм; $L_I = 150$ мм; $L_{II} = 100$ мм; $L_{III} = 150$ мм

Таблица 1. Состав стенда ЭМЖ-09-14ЛР-01

Обозначение	Наименование
Б1	Бак
Б2	Бак накопительный
Б3	Бак для хранения чернил
Н1	Насос циркуляционный центробежный WCP 25-60G
Н2	Насос циркуляционный центробежный WCP 25-40G
ЕМ1	Мерная емкость
T1, T2	Простой трубопровод
T3, T4	Сложные трубопроводы
КР1...КР10	Кран шаровый
З1...З7	Задвижка клиновья
Д1	Мерная диафрагма
ТР1	Тройник
О1	Отвод

На нижнем поддоне 3 установлены насосы 10 (Н1) и 11 (Н2) для подачи рабочей жидкости, а также шаровой кран 18 (КР7) для слива рабочей жидкости из мерной емкости 5 (ЕМ1).

Измерение расхода жидкости выполняется объемным способом с использованием мерной емкости и секундомера (секундомер электронный, закреплен на панели стенда) и с помощью расходомера с электронным выходом. Расход измеряется как в полуавтоматическом, так и в ручном режимах.

Для управления секундомером в полуавтоматическом режиме измерения расхода жидкости в мерной емкости ЕМ1 установлены датчики уровня. Нижний датчик подает сигнал на включение секундомера, верхний – на его остановку.

При ручном режиме управление секундомером осуществляется с помощью специальной ручки 26. При нажатой кнопке, расположенной на ручке 26, секундомер отсчитывает время; остановка секундомера происходит после отпускания кнопки.

Переключением кранов 13 (КР2), 14 (КР3), 15 (КР4), 16 (КР5) обеспечивается автономная или совместная работа насоса 11 (Н2) с насосом 10 (Н1). При совместной работе насосы Н1 и Н2 могут быть включены как параллельно, так и последовательно.

При параллельной работе насосов Н1 и Н2 следует открыть краны 12 (КР1), 13 (КР2) и 15 (КР4) и закрыть краны 14 (КР3), 16 (КР5) и 21 (КР8).

При последовательной работе – открыть краны 12 (КР1), 14 (КР3) и закрыть краны 13 (КР2), 15 (КР4), 16 (КР5) и 21 (КР8).

Работа насосов может осуществляться в трех режимах с разными производительностями. Регулировка уровня производительности насосов осуществляется переключателями. На рис. 3 для примера показан переключатель 10.1 насоса 10 (Н1).

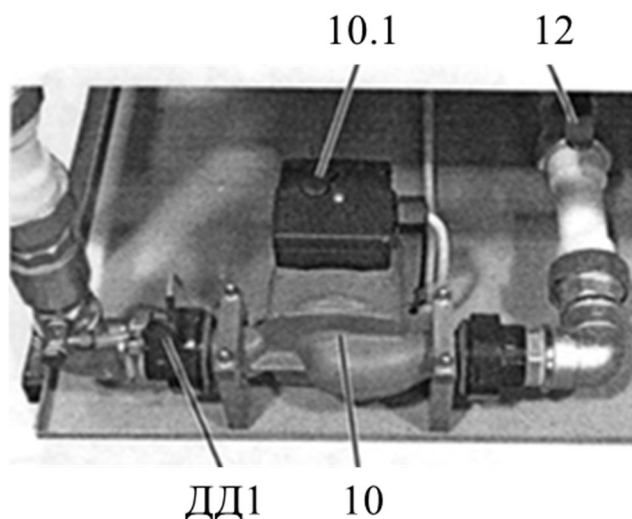


Рис. 3. Вид спереди. Насос 10 (Н1)
с регулятором производительности 10.1

Для нормальной работы стенда рекомендуется следующая установка производительности: насос 10 (Н1) на режим II (центральное положение переключателя 10.1); насос 11 (Н2) на режим максимальной производительности III (крайнее правое положение переключателя).

Для нагружения насосов в состав стенда включена задвижка 35 (35), при помощи которой можно создавать напор в сливной линии насосной станции.

На крышке бака 6 (Б1) установлена заливная горловина-сапун 22 (рис. 4), уровень жидкости в баке контролируется по указателю уровня 23 (см. рис. 1), расположенному на левой стенке бака. В дне

бака установлен шаровой кран 20 (КР9) для слива рабочей жидкости из бака Б1 в канализацию.

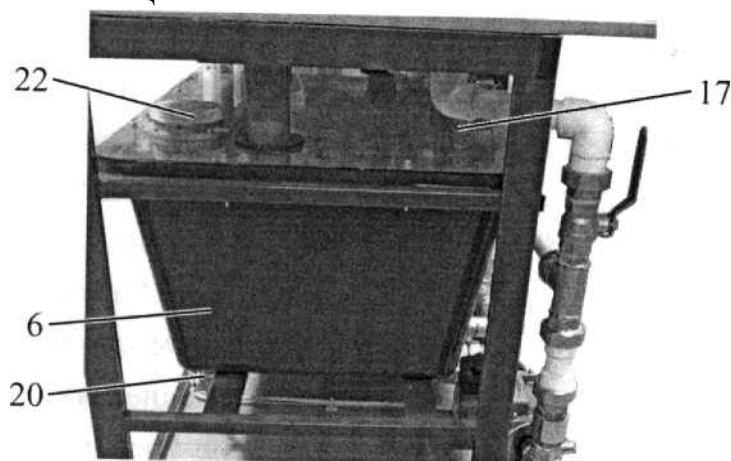


Рис. 4. Вид на стенд слева (фрагмент)

На тыльной стороне стенда смонтирован автоматический выключатель для предохранения электропитающей сети от перегрузок. После подключения стенда к электросети необходимо включить данный выключатель.

На передней панели 4 (см. рис. 1) установлен электронный секундомер 4.10, блок управления 4.11, а также блок измерения давлений 4.9, на котором размещены цифровые индикаторы для отображения показаний датчиков давления ДД1, ДД2.

На дисплеях блока измерения давлений 4.9 (рис. 5, а) отображается избыточное давление жидкости в килопаскалях (кПа):

- 4.9.1 давление на выходе насоса Н1 с датчика ДД1;
- 4.9.2 давление на выходе насоса Н2 с датчика ДД2).

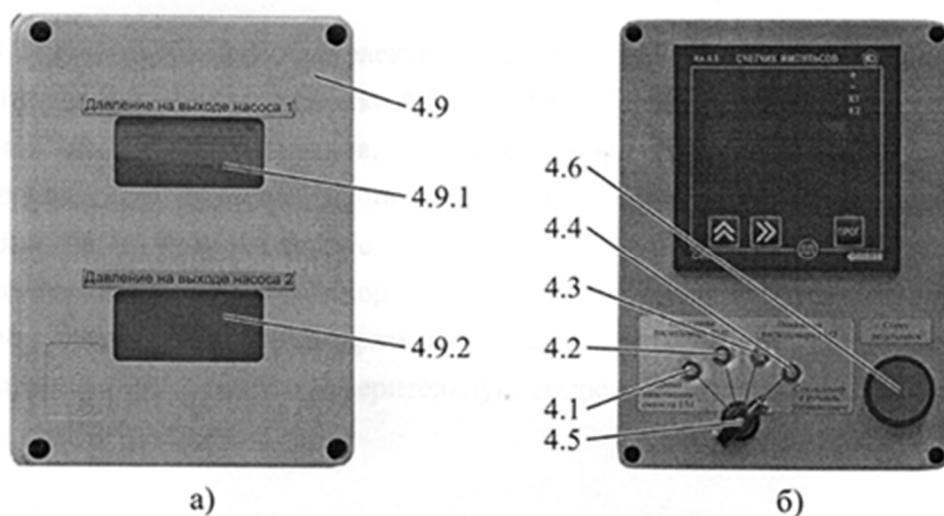


Рис. 5. Измерительные приборы:
а) – блок измерения давлений; б) – блок счетчика импульсов

Перед измерением давления (снятии показаний с измерителей-индикаторов) следует дождаться окончания переходных процессов, возникающих при изменении перекрытий управляющих задвижек.

Счетчик импульсов СИ8 «ОВЕН» (рис. 5, б) запрограммирован для работы в режимах:

- «Секундомер с ручным управлением» – секундомер (отсчет времени в этом режиме запускается и останавливается кнопкой дистанционного запуска 26), сигнализирующий светодиод 4.4 (для обнуления результатов перед началом измерения предусмотрена кнопка 4.6);

- «Показания расходомера РМ2» – при нажатии кнопки отображается расход жидкости (л/мин) через расходомер 27 (РМ2), сигнализирующий светодиод 4.3;

- «Показания расходомера РМ1» – при нажатии кнопки отображается расход жидкости (л/мин) через расходомер 28 (РМ1), светодиод 4.2;

- «Время наполнения емкости ЕМ» – время между срабатываниями датчиков уровня в емкости 5, сигнализирующий светодиод 4.1.

Объем жидкости, помещающейся в емкость ЕМ1 между срабатыванием датчиков уровня, равен 2,7 дм³ (л).

Выбор режима осуществляется поворотом переключателя 4.5.

Параметры, введенные при программировании прибора, вписаны в «Руководство по эксплуатации счетчика импульсов СИ-8», хранящееся в лаборатории.

Для сброса текущего показания секундомера необходимо нажать кнопку 4.6 «Сброс параметров».

Включение питания системы управления и насосов осуществляется при помощи тумблеров блока управления 4.11, расположенного на передней панели. Внешний вид блока управления представлен на рис. 6. На передней крышке блока управления 4.11 расположены: тумблер 4.12 электропитания системы управления со светодиодом 4.13, сигнализирующим о наличии питания элементов контрольно-измерительной аппаратуры; тумблеры 4.14 и 4.16 для включения насосов Н1 и Н2 (включенным состоянием этих тумблеров соответствуют сигнальные светодиоды 4.15 и 4.17).

В случае необходимости электропитание всех элементов стенда может быть отключено нажатием кнопки 4.18 «АВАРИЙНЫЙ СТОП».

Вид на систему кранов, вентилях управления и исследуемых трубопроводов приведен на рис. 7. Обозначения приведены в соответствии с принципиальной схемой (см. рис. 2).

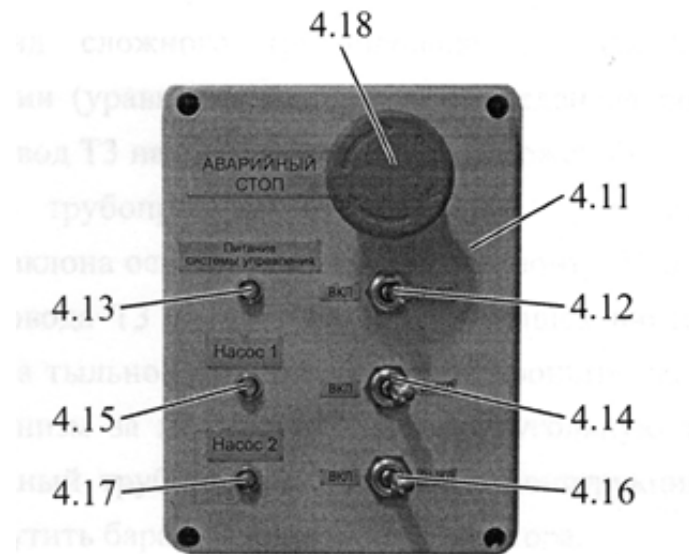


Рис. 6. Блок управления

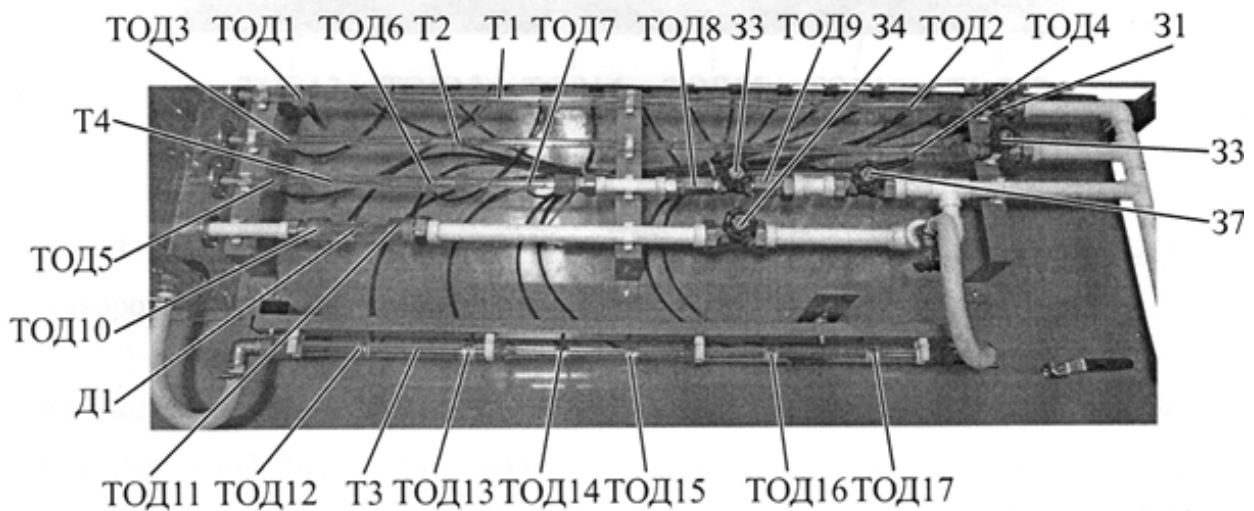


Рис. 7. Система трубопроводов и арматуры. Вид сверху.

Во время работы и транспортировки стенда запрещается прикладывать внешние нагрузки (в т. ч. опираться и класть посторонние предметы) на трубопроводы, пьезометры, измерительную емкость и наполнительный бак.

Внешний вид сложного трубопровода ТЗ для изучения закона сохранения энергии (уравнения Бернулли) приведен на рис. 8. На данном рисунке трубопровод ТЗ находится в среднем положении.

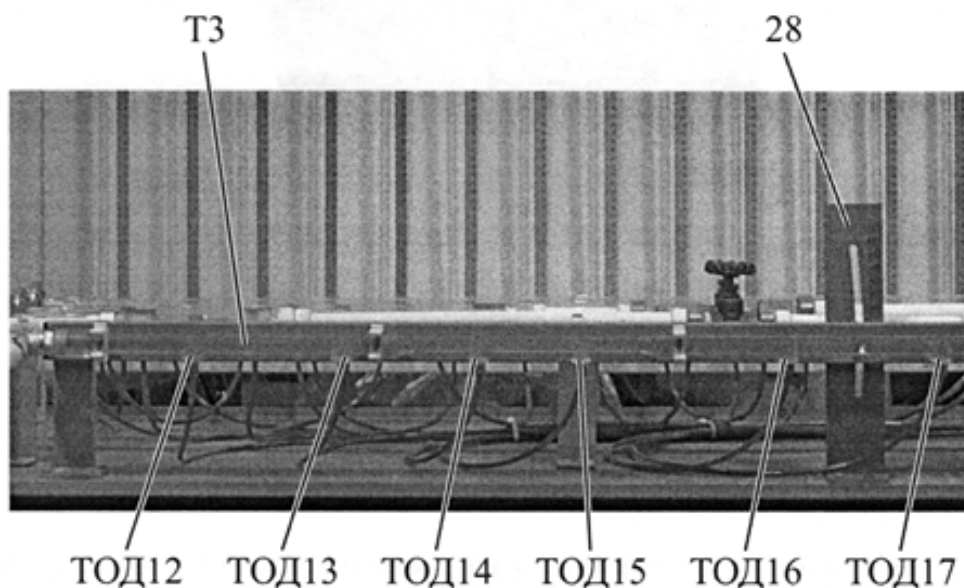


Рис. 8. Трубопровод ТЗ

Конструкция трубопровода ТЗ (сложный трубопровод) допускает изменение угла наклона оси трубопровода к горизонту. Чтобы изменить угол наклона трубопровода ТЗ, следует ослабить барашек винтового фиксатора, расположенный на тыльной стороне пластины кронштейна 28, придерживая поворотный механизм за металлическую прямоугольную трубу, к которой крепится прозрачный трубопровод, повернуть конструкцию на требуемый угол и вновь закрутить барашек винтового фиксатора.

При повороте трубопровода ТЗ следует прикладывать усилие только к металлическим кронштейнам, рейке и фиксатору. Поворачивать ТЗ, держась за элементы трубопровода или арматуру, не допускается.

Задвижкой 36 (см. рис. 1) регулируется расход жидкости через поворотный сложный трубопровод ТЗ.

Для визуализации ламинарного и турбулентного режимов течения жидкости на вход прямого трубопровода Т1 подается тонкая струйка подкрашенной чернилами жидкости, которая поступает из специальной емкости (бака) 7.1 (БЗ). Расход подкрашенной жидкости регулируется дроссельной задвижкой 38 (38).

При выполнении лабораторной работы с чернилами жидкость, циркулирующая в стенде, постепенно окрашивается, поэтому по завершении лабораторной работы следует заменить воду в стенде.

В качестве красящей жидкости, заливаемой в бак 7.1 (БЗ), следует использовать чернила или штемпельную краску. Можно использовать другие жидкости, не окрашивающие элементы стенда.

В верхней части накопительного бака 7 расположена заслонка 30, поворачивающаяся вокруг горизонтальной оси под действием силы, возникающей при взаимодействии со свободной струей, которая формируется соплом 29. Количество жидкости, поступающей к соплу 29, регулируется краном 21 (КР8) и измеряется при помощи расходомера 27 (рис. 9).

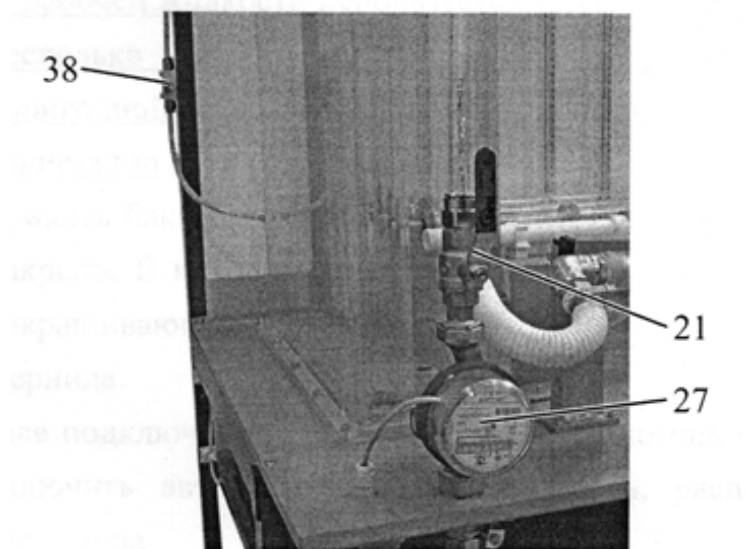


Рис. 9. Автономный подвод жидкости и задвижки для регулировки подачи подкрашенной жидкости и напора струи

8. Содержание лабораторных работ

Лабораторная работа № 1

«Определение вязкости масел и их идентификация»

Цель работы – изучение вязкости жидкости и способа практического определения кинематического коэффициента вязкости жидкостей.

Данная лабораторная работа предполагает компьютерную симуляцию.

Теоретические положения

Вязкость – это свойство жидкости (газа) оказывать сопротивление относительному сдвигу ее слоев. Это свойство проявляется в

том, что при относительном перемещении слоев жидкости на поверхностях их соприкосновения возникают силы сопротивления сдвигу, называемые силами внутреннего трения, или **силами вязкости**.

Механизм возникновения силы вязкости можно представить из опыта (рис. 10).

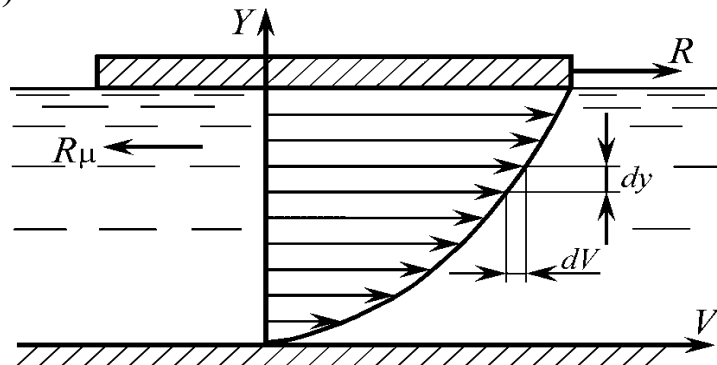


Рис. 10. Схема для определения силы вязкости

На свободной поверхности неподвижного объема жидкости находится легкая пластинка площадью S . Для ее смещения потребуется приложить силу R . Это значит, что жидкость оказывает сопротивление движению, т. е. возникает сила вязкости $R_{\mu} = R$. Она обусловлена тем, что слой жидкости, прилегающий к пластине, прилипает к ней и движется вместе с пластиной с ее скоростью. Вследствие наличия молекулярного взаимодействия этот слой увлекает за собой следующий слой и т. д. Вместе с тем нижний слой жидкости, непосредственно примыкающий к неподвижному дну, будет иметь нулевую скорость. Таким образом, в жидкости возникает слоистое движение с некоторым распределением скоростей по высоте $V = f(y)$.

Между слоями происходит проскальзывание, сопровождающееся возникновением касательных напряжений.

Согласно гипотезе, высказанной впервые Ньютоном в 1686 г., а затем экспериментально обоснованной проф. Н. П. Петровым в 1883 г., касательные напряжения в жидкости зависят от ее рода и характера течения. При слоистом течении касательные напряжения τ изменяются прямо пропорционально поперечному градиенту скорости:

$$\tau = \pm \mu \frac{dV}{dy}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент пропорциональности, получивший название **динамического коэффициента вязкости**; dV – приращение скорости при приращении координаты dy (рис. 10).

Закон Ньютона применим только к слоистым потокам. Знак «плюс» или «минус» выбирается так, чтобы значение τ было положительным независимо от выбора положительного направления y .

Из формулы (1) следует, что касательные напряжения возможны только в движущейся жидкости, т. е. вязкость жидкости проявляется лишь при ее течении.

Жидкости, для которых справедлив закон внутреннего трения Ньютона (1), называются *ньютоновскими*. Существуют жидкости (коллоидные суспензии, растворы полимеров, гидросмеси из глины, мела, цемента, сапропелей, илов, бетонные гидросмеси, кормовые смеси и т. п.), для которых связь между касательным напряжением τ и скоростью сдвиговой деформации dV/dy выражается другими соотношениями. Такие жидкости называются *неньютоновскими*. Например, если соотношение имеет вид

$$\tau = \tau_0 \pm \mu \frac{dV}{dy},$$

то жидкости называются *вязкопластичными* и их движение начинается лишь после того, как внешней силой будет преодолено начальное напряжение сдвига τ_0 , т. е. тут присутствуют касательные напряжения и в состоянии покоя. Для других неньютоновских жидкостей динамическая вязкость может зависеть от градиента скорости, времени и т. д.

При постоянстве касательных напряжений, распределенных по поверхности S , полная касательная сила (сила вязкости) по этой поверхности составит

$$R_\mu = \pm \mu S \frac{dV}{dy}, [\text{H}].$$

Динамический коэффициент вязкости μ , являющийся основной конечной характеристикой вязкости жидкостей и газов, имеет размерность

$$\mu = \frac{R_\mu dy}{S dV}, \left[\frac{\text{H} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{м}/\text{с}} \right] \quad (2)$$

Преобразовав размерность в вид $\text{H} \cdot \text{с}/\text{м}^2$, получаем размерность μ в системе СИ – $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Наряду с этой единицей используются размерности

$$\text{Пуаз} = \frac{\text{г}}{\text{см} \cdot \text{с}} \quad \text{и} \quad \frac{\text{кгс} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}.$$

Имея размерность, коэффициент динамической вязкости обладает и физическим смыслом, который легко виден из (2):

$$\mu = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^3 / \text{с}} \right] \frac{\leftarrow \text{работа}}{\leftarrow \text{объемный расход}}.$$

Таким образом, динамический коэффициент вязкости есть работа, которую необходимо совершить на относительное сдвигение слоев жидкости для единицы объемного расхода жидкости через рассматриваемое сечение потока.

Наряду с динамическим коэффициентом вязкости используется *кинематический коэффициент вязкости* ν , определяемый через плотность ρ соотношением

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}.$$

Размерность коэффициента кинематической вязкости:

$$\nu = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{кг}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\frac{\text{кг}}{\text{с}}} \right]. \quad (3)$$

В системе СИ имеем $\text{м}^2/\text{с}$, а в технической системе будет $1 \text{ см}^2/\text{с} = 1 \text{ Ст}$ (стокс).

Из (3) физический смысл кинематического коэффициента вязкости представляется как работа, которую необходимо совершить на относительное сдвигение слоев жидкости для единицы массового расхода жидкости через рассматриваемое сечение потока.

Вязкость капельных жидкостей зависит от температуры и уменьшается с увеличением последней (рис. 11). Вязкость газов, наоборот, с увеличением температуры возрастает (при давлениях до 10–15 МПа).

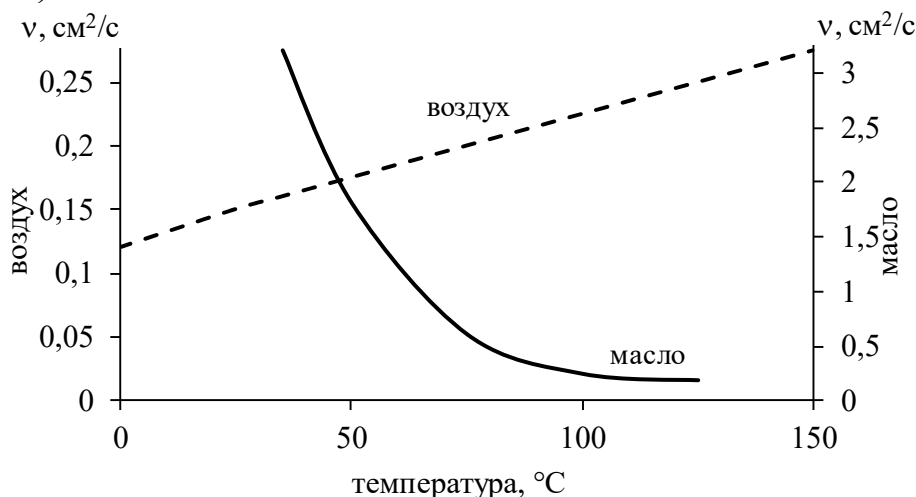


Рис. 11. Зависимость вязкости от температуры

Объясняется это различием природы вязкости в жидкостях и газах. В жидкости молекулы расположены гораздо ближе друг к другу, чем в газах, и вязкость вызывается силами молекулярного сцепления. Эти силы с увеличением температуры уменьшаются, и вязкость падает. В газах же вязкость в основном обусловлена беспорядочным тепловым движением молекул, интенсивность которого увеличивается с возрастанием температуры. Это приводит к увеличению вязкости газа в диапазоне давлений до 10–15 МПа. При больших давлениях значительно уменьшается длина свободного пробега молекул, и поведение газа приближается к жидкости.

Зависимости коэффициентов вязкости от температуры описываются эмпирическими формулами и приводятся в технической литературе.

Одним из наиболее распространенных в технической практике приборов для измерения вязкости является *вискозиметр Энглера* (рис. 12).

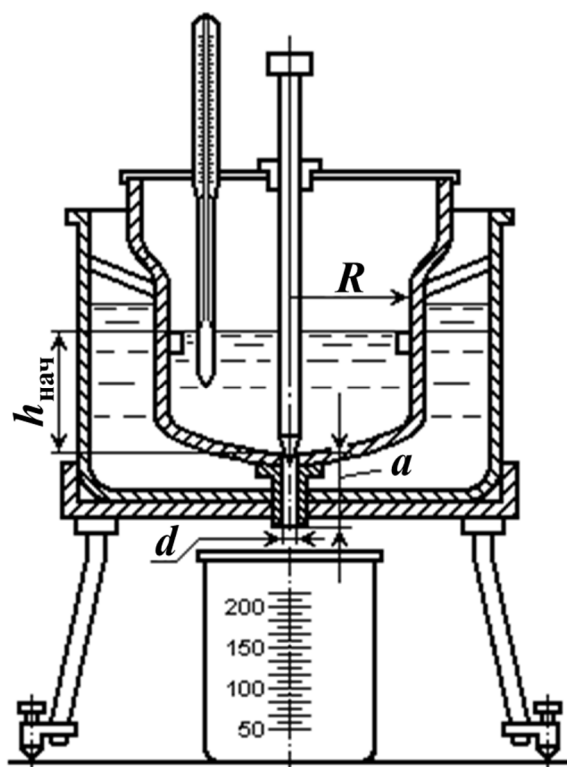


Рис. 12. Вискозиметр Энглера

Вискозиметр состоит из двух сосудов, пространство между которыми заполняется водой для поддержания во время опытов требуемой температуры. К сферическому дну внутреннего сосуда прикреплена трубка, отверстие в которой перекрывается коническим клапаном.

Вязкостью в градусах Энглера ($^{\circ}\text{Э}$) или в градусах условной вязкости ($^{\circ}\text{ВУ}$) называется отношение времени T истечения 200 см^3 испытуемой жидкости к так называемому *водяному числу* T_0 , представляющему собой время истечения такого же объема дистиллированной воды при температуре $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е.

$$^{\circ}\text{Э} = ^{\circ}\text{ВУ} = T / T_0. \quad (4)$$

Для перевода градусов условной вязкости в единицу вязкости в системе СИ (кинематический коэффициент вязкости ν) пользуются эмпирической формулой Уббелоде

$$\nu = (0,0731^{\circ}\text{Э} - \frac{0,0631}{^{\circ}\text{Э}})10^{-4}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Более точная (но более сложная) формула предложена А. Д. Альтшулем:

$$^{\circ}\text{Э} = 24\nu \left[2,31 \lg \frac{\sqrt{\nu^2 + 0,0294} - \nu}{\sqrt{\nu^2 + 0,0166} - \nu} + \frac{1}{\nu} (\sqrt{\nu^2 + 0,0294} - \sqrt{\nu^2 + 0,0166}) \right].$$

В этой формуле коэффициент вязкости ν выражается в стоксах.

Для жидкостей значительной вязкости ($\nu > 0,5 \text{ см}^2/\text{с}$), к которым относятся, например, минеральные масла (широко используются в гидравлических приводах различного назначения), выражение в квадратных скобках обращается в постоянную величину и А. Д. Альтшуль предлагает приближенную зависимость вида

$$^{\circ}\text{Э} = 13,67 \nu. \quad (5)$$

Размеры вискозиметра Энглера стандартизованы и имеют следующие значения (см. рис. 12): $d = 2,85 \text{ мм}$; $R = 53 \text{ мм}$; $a = 20 \text{ мм}$; $h_{\text{нач}} = 52 \text{ мм}$; $h_{\text{кон}} = 29,3 \text{ мм}$; $T_0 = 51,6 \text{ с}$.

Экспериментальная часть

Лабораторная работа проводится на компьютере.

А. Лабораторная установка

Лабораторной установкой является стандартный вискозиметр Энглера. При открытии файла с лабораторной работой его схема представлена на экране.

Б. Порядок проведения опытов

При использовании вискозиметра Энглера предусматривается следующий порядок проведения замеров:

1. Берется испытуемая жидкость. В нашем случае в ячейку «Вариант» (D7) заносится заданное преподавателем число.

2. Испытуемая жидкость объемом 200 см³ заливается во внутренний сосуд. Для этого необходимо занести значение 200 в ячейку F13.

3. Нагревая воду во внешнем сосуде, устанавливают температуру испытуемой жидкости в 20 °С. Для этого требуется занести в ячейку F14 число 20.

4. Открывают выпускной клапан, для чего в ячейку F19 необходимо вставить цифру 1. Одновременно с открытием выпускного клапана включается секундомер.

5. По истечению заданной порции испытуемой жидкости секундомер выключается. Показания секундомера находятся в ячейке E22. Это значение с точностью до целых необходимо переписать в тетрадь для выполнения лабораторных работ (либо на иной носитель по согласованию с преподавателем).

Полученное время истечения позволяет рассчитать значение кинематического коэффициента вязкости испытуемой жидкости.

В. Обработка экспериментальных данных

1. По формуле (4) вычислить условную вязкость в градусах Энглера (°Э).

2. По формуле (5) или графику $^{\circ}\text{Э} = f(\nu)$ (Приложение 1) определить кинематический коэффициент вязкости ν .

3. По диаграммам (Приложение 2) идентифицировать масло.

4. По табл. 2 определить основные характеристики установленной марки масла.

5. По коэффициентам температурной кривой вязкости (m и n) построить график $\nu = f(t)$ в диапазоне изменения температуры t от -10 до $+60$ °С по формуле

$$\nu = 10 [10^{m-n \lg(273+t)}] - 0,6, \text{ мм}^2/\text{с (сСт)}.$$

Перечень вопросов для подготовки
к защите лабораторной работы №1

1. Что такое вязкость жидкости?
2. Чем количественно характеризуется вязкость?
3. Какая жидкость называется идеальной?
4. Объясните механизм возникновения силы вязкости.
5. Запишите согласно закону внутреннего трения, открытому Ньютоном, выражение для касательного напряжения.
6. Какова связь динамического и кинематического коэффициентов вязкости, каковы их единицы измерения?
7. Может ли в покоящейся жидкости проявляться касательное напряжение? Каково основное различие так называемых ньютоновской и неньютоновской жидкостей?
8. От чего зависит вязкость жидкости и газа?
9. Запишите формулу силы вязкости через динамический коэффициент вязкости.
10. Запишите формулу силы вязкости через кинематический коэффициент вязкости.
11. В чем заключается физический смысл динамического коэффициента вязкости?
12. В чем заключается физический смысл кинематического коэффициента вязкости?
13. Опишите принцип работы вискозиметра Энглера.

Таблица 2. Марки и характеристики жидкостей для гидросистем

Обозначения	Плотность ρ , кг/м ³	Кинематический коэффициент вязкости при 50 °С, ν , сСт	Температура, °С		Коэффициенты температурной кривой вязкости	
			вспышки	застывания	m	n
МГ-5-Б	830	3,6	94	-70	8,941	3,639
МГ-15-А	865	10	135	-60	9,043	3,600
МГ-15-В	834	10	96	-70	7,376	2,932
МГ-15-Б	850	10	92	-70	7,498	2,894
МГ-22-А	892	13	165	-45	10,483	4,156
МГ-22-В	890	13	163	-45	10,436	4,137
МГ-32-А	885	20	180	-40	9,340	3,675
МГ-46-Б	885	30	190	-35	10,062	3,941
И-Л-А-7	870	4,5	140	-25	11,546	4,652
И-Л-А-10	880	7	150	-20	10,535	4,210
И-ЛГ-А-22	880	12	170	-15	10,497	4,167
И-Г-А-32	890	20	200	-15	9,696	3,817
И-Г-А-46	900	30	220	-15	10,657	4,179
И-Г-А-68	910	40	225	-15	10,933	4,275
И-ГТ-А-100	910	50	225	-20	10,967	4,278
И-Г-С-32	880	18	170	-15	9,655	3,812
И-Г-С-46	885	28	200	-15	9,882	3,873
И-Г-В-46	875	30	202	-10	10,385	4,070
И-Г-С-68	890	38	210	-15	10,672	4,177
И-ГНЕ-32	890	20	185	-15	9,798	3,858
Тп-22С	900	22	186	-15	10,425	4,102
Тп-30	900	30	190	-10	9,449	3,697
Т-46	920	46	220	-10	8,887	3,449
Тп-57	930	57		-10	9,051	3,509

Лабораторная работа № 2 **«Исследование уравнения Бернулли»**

Цель работы: знакомство с уравнением Бернулли, выяснение его геометрического и энергетического смысла и определение потерь напора в трубопроводе переменного сечения.

Теоретические положения

При установившемся течении жидкости на нее действуют силы тяжести, вязкости и давления. В 1738 году член Петербургской Академии наук Даниил Бернулли опубликовал капитальный труд по вопросам движения жидкости, положив начало гидродинамике. Уравнение Бернулли устанавливает зависимость между средней скоростью течения и силами, действующими в потоке жидкости. Для облегчения усвоения данного материала сначала рассмотрим случай течения элементарной струйки идеальной жидкости, а затем перейдем к потоку реальной жидкости.

Под идеальной жидкостью понимается такая воображаемая (условная) жидкость, которая совершенно лишена вязкости. В такой невязкой жидкости, как и в неподвижных реальных жидкостях, возможен лишь один вид напряжений – нормальные напряжения сжатия, т. е. гидромеханическое давление или просто давление.

Давление в движущейся идеальной жидкости обладает теми же свойствами, что и в неподвижной жидкости, т. е. на внешней поверхности жидкости оно направлено по внутренней нормали, а в любой точке внутри жидкости – по всем направлениям одинаково.

Возьмем одну из элементарных струек, составляющих поток, и выделим сечениями 1 и 2 участок этой струйки произвольной длины (рис. 13). На струйку действуют силы давления $p_1 \cdot dS_1$ и $p_2 \cdot dS_2$ и силы тяжести dG_1 и dG_2 .

Применив к массе жидкости в объеме рассматриваемого участка струйки теорему механики о том, что работа сил, приложенных к телу, равна приращению кинетической энергии этого тела, получим уравнение вида

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g}, \quad (6)$$

где z_1 и z_2 – высота расположения центров тяжести соответствующих

сечений струйки от плоскости сравнения; V_1, V_2 – скорости струйки в соответствующих сечениях; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения тела.

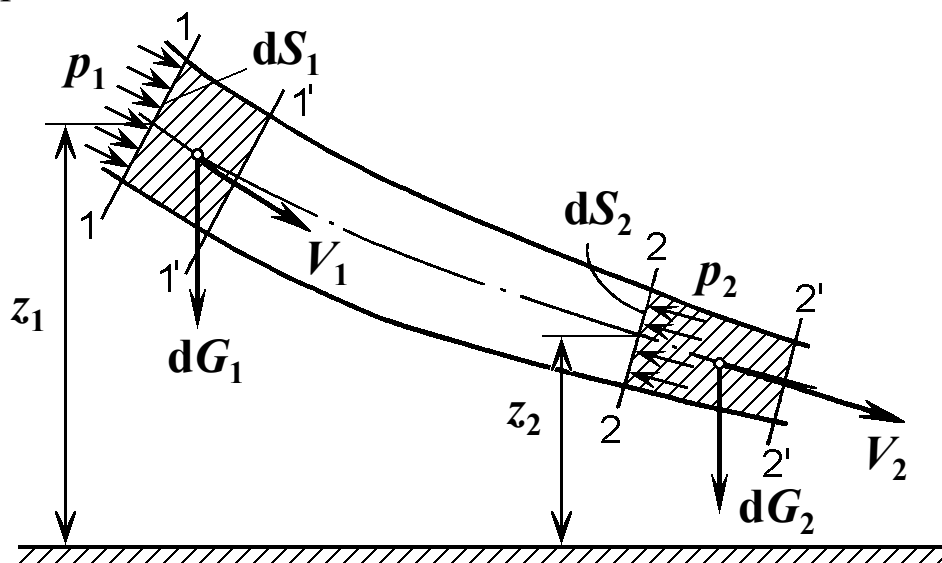


Рис. 13. Схема сил, действующих на элементарную струйку идеальной жидкости

Полученное выражение и есть *уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости*.

Для выяснения геометрического смысла уравнения Бернулли рассмотрим размерности членов, составляющих его.

$$\frac{p}{\rho g} = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}}{\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{м}} \right] = \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}}{\text{с}^2 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{м}} \right] = [\text{м}].$$

Пьезометрический напор может быть измерен при помощи пьезометрической трубки (пьезометра) (рис. 14, а).

Геометрический напор

$$z = [\text{м}].$$

Скоростной напор

$$\frac{V^2}{2g} = \left[\frac{\text{м}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{м}} \right] = [\text{м}].$$

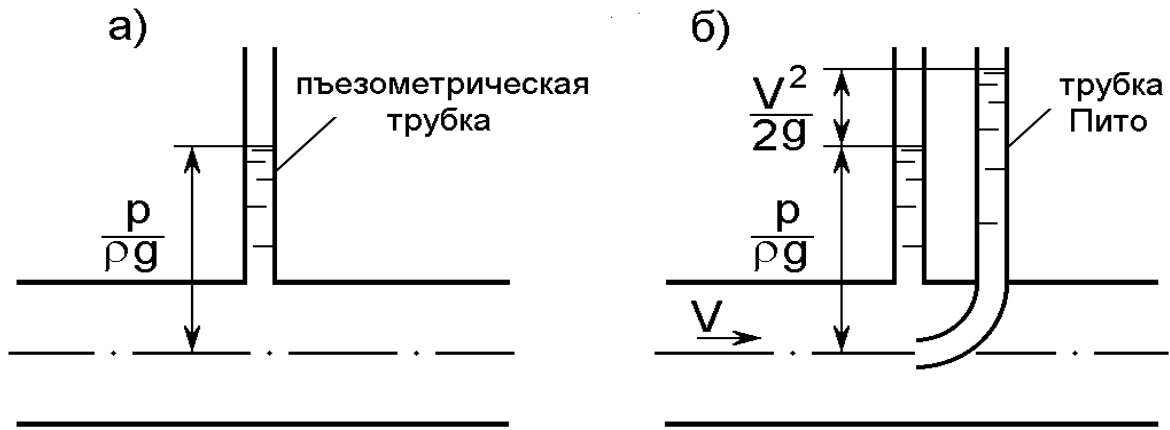


Рис. 14. Схемы измерения пьезометрического и скоростного напоров

Скоростной напор можно измерить, добавив к пьезометрической трубке трубку Пито (рис. 14, б). Разность показаний этих двух трубок и даст значение скоростного напора.

Тем самым, мы имеем в каждом сечении струйки жидкости сумму трех напоров: пьезометрического, геометрического и скоростного, т. е. полный напор, а уравнение Бернулли показывает, что *полный напор в любом сечении элементарной струйки есть величина постоянная*. В этом заключается геометрический смысл уравнения.

Энергетический смысл уравнения Бернулли можно установить, представив выражение (6) в другом виде, умножив все члены уравнения на g :

$$\frac{p_1}{\rho} + z_1 g + \frac{V_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + z_2 g + \frac{V_2^2}{2}.$$

Рассмотрим размерность членов этого уравнения:

$$\frac{p}{\rho} = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{кг}} \right] = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг}} \right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right].$$

В числителе имеем размерность работы, а в знаменателе – массы. Таким образом, первый член уравнения Бернулли есть удельная (отнесенная к единице массы) энергия сил давления.

$z g$ – представляет собой удельную энергию положения, так как частица массой m , находясь на высоте z , обладает энергией положения (потенциальной энергией), равной

$$m z g = \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \right] = [\text{Н} \cdot \text{м}] = [\text{Дж}].$$

$\frac{V^2}{2}$ – удельная кинетическая энергия жидкости, так как для той же частицы массой m кинетическая энергия равна

$$\frac{mV^2}{2} = \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2} \right] = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{м}} \right] = [\text{Н} \cdot \text{м}] = [\text{Дж}].$$

Как следует из вышеизложенного, для элементарной струйки идеальной жидкости удельная энергия жидкости постоянна.

Графическая иллюстрация уравнения Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости представлена на рис. 15, а. Обращаем внимание на то, что линия полного напора располагается горизонтально, т. е. это постоянная величина.

При переходе от элементарной струйки идеальной жидкости к потоку реальной (вязкой) жидкости, имеющему конечные размеры и ограниченному стенками, необходимо учесть неравномерность распределения скоростей по сечению потока, а также потери энергии (напора). То и другое являются следствием вязкости жидкости.

Неравномерность распределения скоростей по сечению потока учитывается коэффициентом Кориолиса:

$\alpha = 2$ – для ламинарного режима течения жидкости;

$\alpha = 1,05 \dots 1,13$ – для турбулентного режима течения жидкости.

Потери напора на участке между рассматриваемыми сечениями потока определяются в зависимости от характера сопротивлений на этом участке и подробнее рассмотрены в последующих лабораторных работах.

Исходя из описанных условий, уравнение Бернулли для потока реальной жидкости имеет вид

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \alpha_1 \frac{V_{1\text{cp}}^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \alpha_2 \frac{V_{2\text{cp}}^2}{2g} + \Sigma h_{1-2},$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты Кориолиса для сечений 1 и 2; Σh_{1-2} – суммарные потери полного напора на участке между рассматриваемыми сечениями.

Графическая иллюстрация уравнения приведена на рис. 15, б.

Из рисунка видно, что действительный напор в каждом последующем сечении уменьшается на величину потерь h_i , затрачиваемых на преодоление сопротивления движению потока.

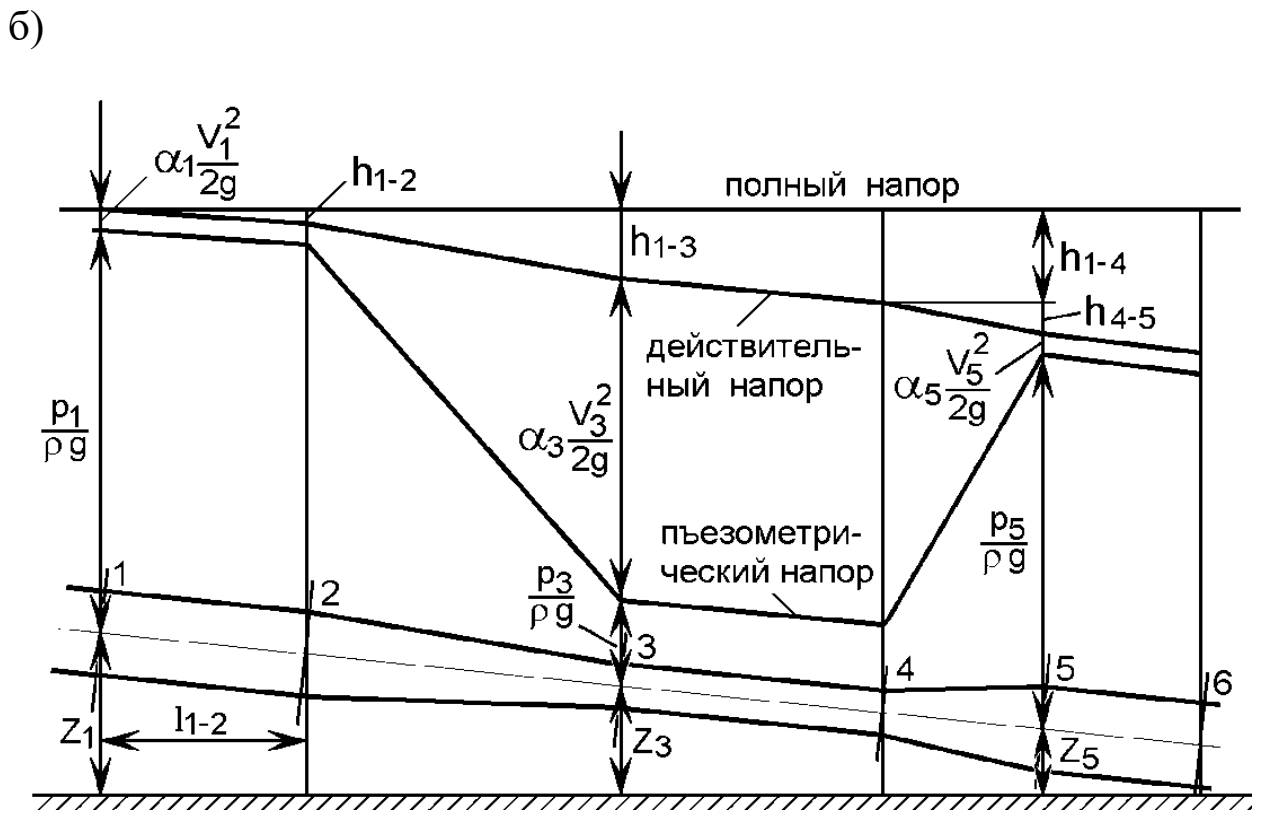
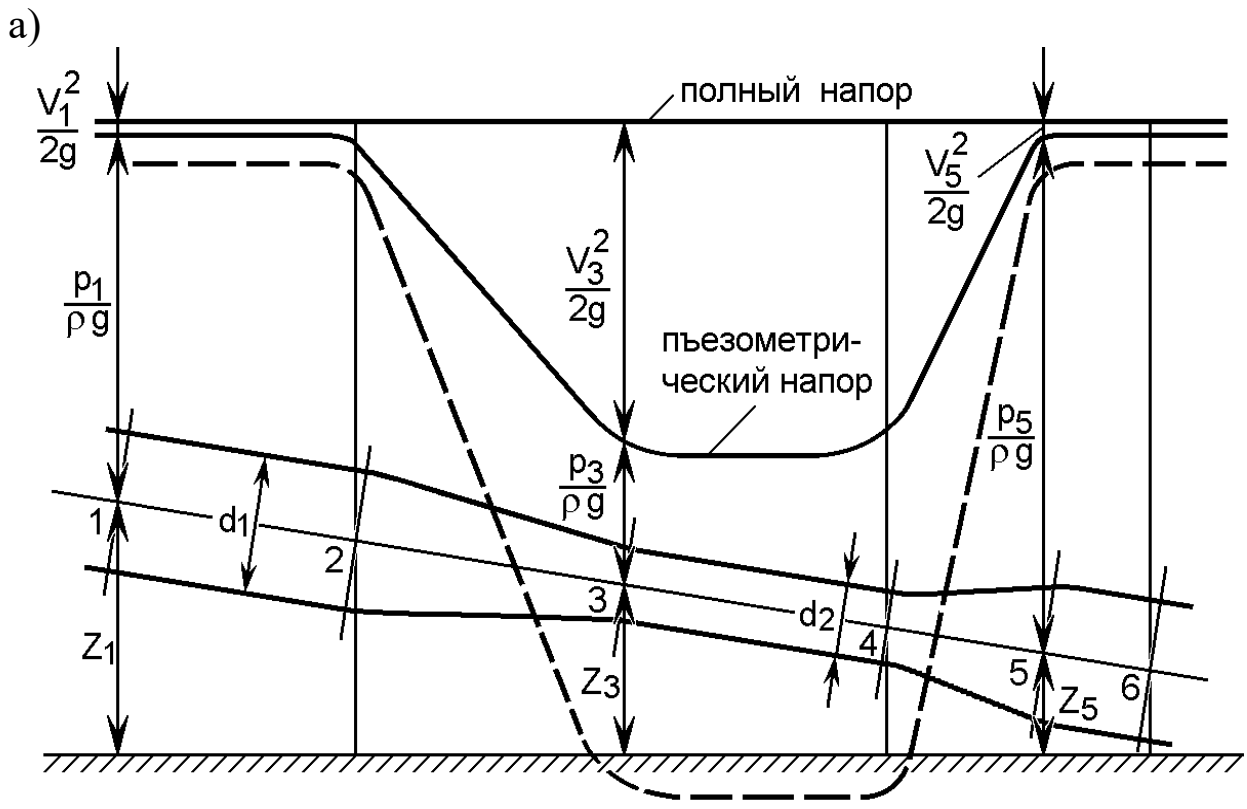


Рис. 15. Изменение пьезометрического и скоростного напоров вдоль струйки идеальной жидкости (а) и вдоль потока реальной жидкости (б)

Экспериментальная часть

А. Лабораторная установка

Лабораторная установка состоит из трех последовательно соединенных прозрачных труб из органического стекла с внутренними диаметрами $d_I = 15$ мм, $d_{II} = 10$ мм, $d_{III} = 15$ мм. Расстояния между точками отбора и схему подключения пьезометров см. на рис. 2.

Для исследования влияния изменений геометрического напора конструкцией стенда предусмотрена возможность изменения угла наклона оси трубопровода к горизонту.

Переходы между участками трубопровода выполнены в виде конусов (конфузора и диффузора).

Б. Порядок проведения опытов

1. Убедиться в том, что краны КР1, КР2 открыты.
2. Полностью закрыть задвижки З1, З2, З4, З5, З6, З7 и краны КР3, КР4, КР6, КР8, КР9.
3. Краны КР5 и КР7 полностью открыть.
4. Включить питание системы управления.
5. Повернуть переключатель насоса Н1 в среднее положение (II) и включить питание насоса переключением соответствующего тумблера на блоке управления.
6. Дождаться заполнения накопительного бака вплоть до возникновения перелива через переливной трубопровод и записать показание полного напора H_0 в таблицу 3.
7. При помощи регулятора З6 установить показания пьезометра №12 ($H_{п12}$), заданные преподавателем, и записать в табл. 3.
8. Для измерения расхода рабочей жидкости повернуть переключатель на контрольно-измерительном блоке в положение «Время наполнения емкости ЕМ» или «Секундомер с ручным управлением».
9. Нажать кнопку «Сброс параметров».
10. Закрывать кран КР7.
11. Измерить время Δt заполнения объема W жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1, в соответствии с выбранным режимом. Записать значения в таблицу 3.
12. Открыть кран КР7.

13. Записать в таблицу 4 показания; пьезометров №12, 13, 14, 15, 16, 17 ($H_{п12}$, $H_{п13}$, $H_{п14}$, $H_{п15}$, $H_{п16}$, $H_{п17}$).

14. Повторить действия, описанные в пунктах 7–13 для других значений $H_{п12}$. Результаты замеров записать в табл. 3.

15. Изменяя угол наклона трубопровода ТЗ (контроль по специальной линейке, размещенной на кронштейне трубопровода) при неизменной величине перекрытия задвижки З6 (рекомендуется перекрытие около 4 оборотов рукоятки задвижки от полностью закрытого состояния), повторить измерения по пп. 8–13. Результаты записать в таблицу 4.

Чтобы изменить угол наклона трубопровода ТЗ, следует ослабить барашек винтового фиксатора, расположенный на тыльной стороне пластины кронштейна, придерживая поворотный механизм за металлическую прямоугольную трубу, к которой крепится прозрачный трубопровод, установить требуемый угол наклона, затянуть барашек винтового фиксатора.

16. Полностью закрыть задвижку З6.

17. Выключить питание системы управления.

18. Выключить питание насоса Н1.

19. Записать значение температуры воды T в баке.

В. Обработка экспериментальных данных

1. Рассчитать расход воды

$$Q = W/\Delta t,$$

где Δt – время опыта, с; W – объем вытекшей жидкости, л.

2. Определить среднюю скорость течения воды в каждом трубопроводе по расходу, мм/с:

$$V_i = \frac{Q}{S_i},$$

где $S_i = 0,25\pi d_i^2$ – площадь живого сечения трубопровода, мм²; d_i – внутренний диаметр сечения трубы, мм; Q – расход воды, мм³/с.

3. Определить кинематический коэффициент вязкости воды, Ст (1 Ст = 1 см²/с):

$$\nu = \frac{0,0178}{1 + 0,0337T + 0,000221T^2},$$

где T – температура воды в период опыта, °С.

4. Рассчитать критерий Рейнольдса для каждого трубопровода

$$Re_i = \frac{V_i \cdot d_i}{\nu}$$

При расчетах соотнести размерности параметров.

5. Определить скоростной напор в каждом трубопроводе, мм.

$$H_{cki} = \alpha \frac{V_i^2}{2g},$$

где α – коэффициент кинетической энергии или коэффициент Кориолиса; $\alpha = 1,05 \dots 1,13$ при турбулентном режиме и $\alpha = 2$ при ламинарном режиме течения жидкости (если $Re_i > 2323$, принимается турбулентный режим, если нет, то ламинарный).

6. Определить действительный напор в каждом сечении:

$$H_{di} = \frac{p_i}{\rho g} + \alpha \frac{V_i^2}{2g} = H_{pi} + H_{cki}.$$

7. Определить потери напора по участкам трубы, мм:

$$h_i = H_0 - H_{di}.$$

8. Для последнего и предпоследнего опытов построить линии полного напора, линии действительного и пьезометрического напоров (пример на рис. 15, б). Линии пьезометрических напоров следует строить по показаниям пьезометров, линии действительных напоров – как сумму пьезометрического и скоростного напоров. Линии напоров строятся над трубопроводом, предварительно нарисованным согласно его размерам, представленными на рисунке 16.

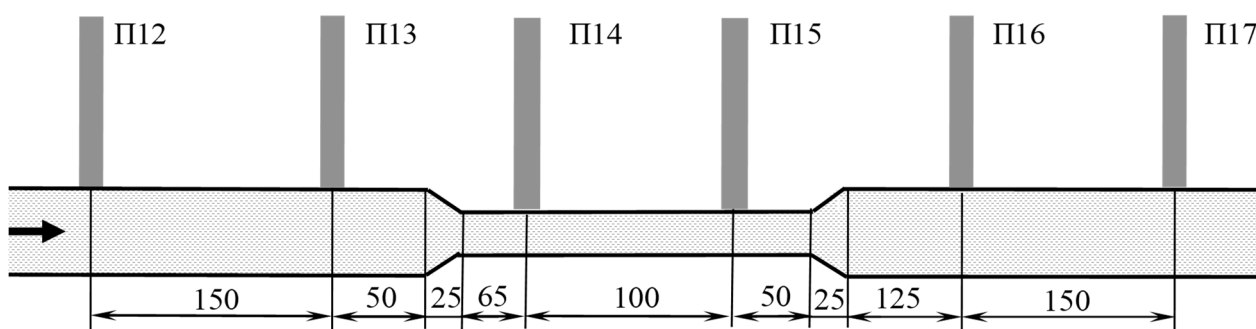


Рис. 16. Размеры трубопровода для исследования уравнения Бернулли

Таблица 4. Экспериментальные данные для 2-ой части работы

№ опыта	Наклон к горизонту, град	W , л	Δt , с	Q , л/с	$H_{п12}$, мм	$H_{п13}$, мм	$H_{п14}$, мм	$H_{п15}$, мм	$H_{п16}$, мм	$H_{п17}$, мм
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										

Перечень вопросов для подготовки к защите лабораторной работы №2

1. Что подразумевают под понятием «невязкая жидкость»?
2. Как записывается уравнение Бернулли для элементарной струйки невязкой несжимаемой жидкости, если из массовых сил действует только сила тяжести? В чем заключается вывод данного уравнения?
3. В чем заключается геометрический смысл уравнения Бернулли?
4. Что такое удельная энергия?
5. В чем заключается энергетический смысл уравнения Бернулли?
6. Какой физический закон выражает уравнение Бернулли?
7. Что такое пьезометрический, скоростной и полный напоры? Как они изменяются по длине (вдоль направления движения)?
8. Запишите уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости при установившемся движении.
9. Какова размерность членов уравнения Бернулли в геометрической интерпретации?
10. Установите взаимосвязь между диаметром трубы и величиной скоростного напора. Как и во сколько раз изменится скоростной напор, если диаметр трубы увеличился в n раз при постоянном расходе?
11. Какова размерность членов уравнения Бернулли в энергетической интерпретации?

Лабораторная работа № 3 **«Исследование режимов движения жидкости»**

Цель работы: изучение особенностей ламинарного и турбулентного режимов течения; исследование влияния критерия Рейнольдса на режим течения жидкости; экспериментальное определение границ числа Рейнольдса, соответствующих ламинарному и турбулентному режимам.

Теоретические положения

При движении потока реальной жидкости в нем действуют различные силы: силы давления, вязкости (трения), тяжести и инерции. В первой половине XIX века многие исследователи обратили внимание на то, что в различных условиях характер и структура потока жидкости могут быть разные. В 1883 г. английский физик Осборн Рейнольдс обосновал теоретически и показал на опытах существование двух принципиально различных режимов движения жидкости. Они получили название *ламинарный* (слоистый) и *турбулентный* (вихреобразный) режимы.

Рейнольдс установил, что критерием режима движения жидкости является безразмерная величина, представляющая собой отношение произведения средней скорости потока V на характерный линейный размер l поперечного сечения потока к кинематической вязкости жидкости ν , которая впоследствии была названа *числом Рейнольдса*. Для потока жидкости в трубе круглого сечения (характерный размер l равен внутреннему диаметру d) число Рейнольдса вычисляется по формуле

$$\mathbf{Re} = \frac{Vd}{\nu}.$$

Физический смысл числа Рейнольдса заключается в следующем. Из теории гидродинамического подобия известно, что силы инерции пропорциональны плотности жидкости ρ , скорости жидкости V во второй степени и характерному линейному размеру l во второй степени:

$$R_{\text{ин}} \sim \rho l^2 V^2. \quad (7)$$

В свою очередь силы вязкости пропорциональны плотности, скорости потока, характерному линейному размеру и коэффициенту кинематической вязкости:

$$R_{\text{в}} \sim \rho \nu V l. \quad (8)$$

Возьмем отношение выражений (6) и (7).

$$\frac{R_{\text{ин}}}{R_{\text{в}}} = \frac{\rho V^2 l^2}{\rho V l \nu} = \frac{V l}{\nu} = \text{Re}.$$

Таким образом, число Рейнольдса есть величина, пропорциональная отношению силы инерции к силам вязкости.

В зависимости от того, какие силы (вязкости или инерции) будут преобладать, и установится режим движения жидкости – ламинарный или турбулентный.

Опытная установка Рейнольдса представлена на рис. 17.

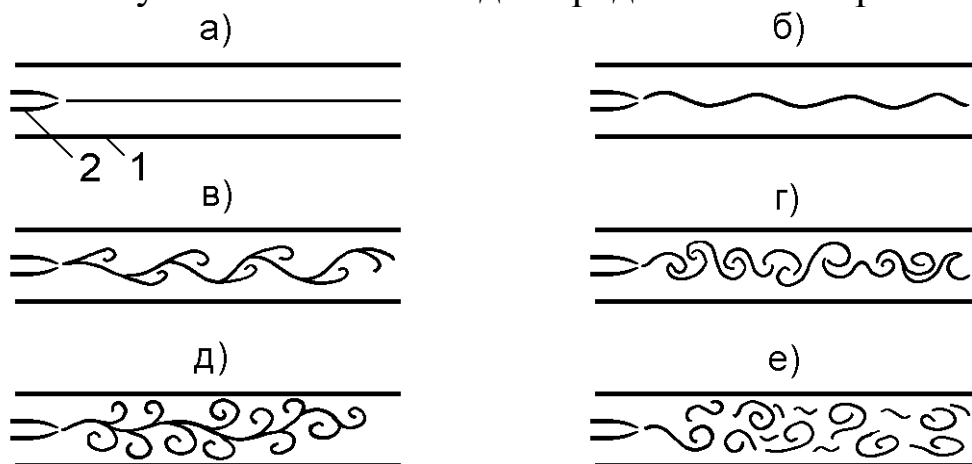


Рис. 17. Режимы движения жидкости

Данная установка позволяет наблюдать эти режимы при движении подкрашенной жидкости, подаваемой через трубку 2 в поток прозрачной жидкости, протекающей по стеклянному трубопроводу 1.

При небольшой скорости движения жидкости краска, попав в поток жидкости в виде тонкой струйки, продолжает на всем протяжении потока двигаться струйкой (рис. 17, а). Это значит, что частицы испытуемой жидкости также движутся струйчато (слоисто). Это ламинарный режим.

При увеличении скорости движения жидкости окрашенная струйка приобретает волнистое очертание (переходная зона), а затем внезапно разрушается на отдельные частицы, которые далее

двигаются по случайным неопределенно искривленным траекториям, окрашивая весь поток жидкости (рис. 17, е). Это турбулентный режим. При таком режиме часть энергии затрачивается на поперечное перемещение и перемешивание частиц жидкости, вследствие чего турбулентный режим требует больших удельных затрат на перемещение жидкости, чем ламинарный.

На основе эксперимента может быть построен график зависимости числа Рейнольдса от скорости потока жидкости (рис. 18), на котором отмечены моменты перехода режимов движения жидкости один в другой и наоборот.

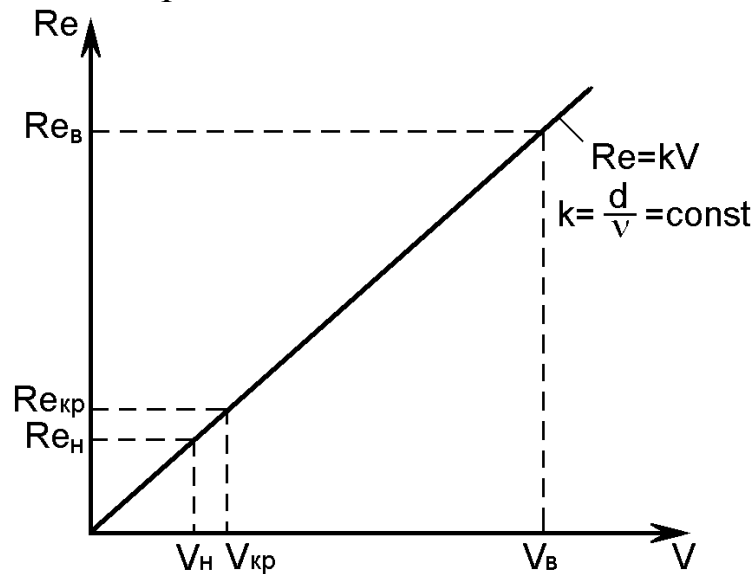


Рис. 18. Зависимость Re от скорости потока жидкости V

Рейнольдс определил два критических числа – верхнее и нижнее. Верхнее критическое число Рейнольдса соответствует моменту перехода от ламинарного режима к турбулентному: $Re_B = 12000$. Нижнее критическое число Рейнольдса соответствует моменту перехода от турбулентного режима к ламинарному: $Re_H = 998$. На участке между этими двумя критическими числами Рейнольдса возможно существование как ламинарного, так и турбулентного режима движения жидкости. Это зависит от условий входа жидкости в трубу, шероховатости стенок и других случайных факторов. В практических расчетах число Рейнольдса используется при определении сопротивления трубопроводов. Обычно для жестких трубопроводов критическое число Рейнольдса принимают $Re_{кр} = 2320$. При $Re_i < Re_{кр}$ ламинарное движение является вполне устойчивым: всякого рода искусственная турбулизация потока и его возмущения

(сотрясение трубы, введение в поток колеблющегося тела и др.) погашаются влиянием вязкости, и ламинарный режим течения жидкости снова восстанавливается. При $Re_i > Re_{кр}$, наоборот, турбулентный режим устойчив, а ламинарный не устойчив.

Если живое сечение потока отличается от круглого или в трубопроводе имеется большое число близко расположенных местных сопротивлений, критическое число Рейнольдса может отличаться от приведенного выше значения. Так, например, для гибких шлангов в системе гидропривода $Re_{кр} = 1600$.

От режима движения жидкости зависят не только потери на преодоление сопротивления трубопровода, но и энергетические параметры потока. На рис. 19 показаны эпюры скоростей в живом сечении потока жидкости в круглой трубе.



Рис. 19. Эпюры скоростей при ламинарном (а) и турбулентном (б) режимах движения жидкости

Эпюра скоростей в случае ламинарного режима в трубопроводе круглого сечения представляет собой параболоид вращения, ось которого совпадает с геометрической осью трубы. Сопротивление трубопровода в этом случае прямо пропорционально вязкости жидкости и обратно пропорционально числу Рейнольдса. Расчетами можно доказать, что $V_{cp} = 0,5V_{max}$.

Эпюра скоростей турбулентного режима имеет ярко выраженное турбулизированное ядро потока с примерно одинаковыми средними скоростями. Лишь частицы жидкости, близко расположенные к стенке, испытывают от нее тормозящее действие сил трения и образуют так называемый ламинарный подслой. В этом случае сопротивление трубопровода в наибольшей степени определяется шероховатостью стенок трубы и имеет квадратичную зависимость от скорости жидкости и числа Рейнольдса. Средняя скорость потока V_{cp}

несколько меньше V_{\max} , а при абсолютно турбулентном режиме (что возможно только теоретически) для идеальной жидкости $V_{\text{ср}} = V_{\max}$.

Кинетическая энергия потока, подсчитанная по средней скорости течения, отнесенная к единице массы жидкости, равна $V_{\text{ср}}^2 / 2$. Отношение действительной кинетической энергии к подсчитанной по средней скорости называется коэффициентом кинетической энергии или коэффициентом Кориолиса α . Он характеризует неравномерность распределения скоростей в поперечном сечении потока. Его минимальное значение равно 1 в случае течения идеальной жидкости. Для реальных жидкостей $\alpha = 1,05 \dots 1,13$ при турбулентном режиме и $\alpha = 2$ при ламинарном режиме. В некоторых случаях, например, в местах изгиба трубопровода эпюра скоростей может иметь еще большую неравномерность скоростей, и тогда α может быть больше 2.

Коэффициент Кориолиса при ламинарном режиме можно вычислить по формуле

$$\alpha = V_{\max} / V_{\text{ср}}.$$

Экспериментальная часть

А. Лабораторная установка

Для исследования и визуализации режимов течения на вход прямого трубопровода Т1 подается тонкая струйка подкрашенной чернилами жидкости, которая поступает из специальной емкости (бака) БЗ (см. рис. 9).

При выполнении данной лабораторной работы жидкость, циркулирующая в стенде, постепенно окрашивается, поэтому по завершении лабораторной работы следует заменить воду в стенде.

В качестве красящей жидкости, заливаемой в бак БЗ, следует использовать только не окрашивающие элементы стенда жидкости, например, канцелярские чернила.

Длина контрольного участка для определения максимальной скорости прохождения характерной точки подкрашивающей жидкости составляет $L = 100$ мм.

Внутренний диаметр трубопровода составляет $d = 15$ мм.

Б. Порядок проведения опытов

1. Убедиться в том, что краны КР1, КР2 открыты.
2. Полностью закрыть задвижки 31, 32, 34, 35, 36, 37 и краны КР3, КР4, КР6, КР8, КР9.
3. Краны КР5 и КР7 полностью открыть.
4. Включить питание системы управления.
5. Повернуть переключатель насоса Н1 в среднее положение (II) и включить питание насоса переключением соответствующего тумблера на блоке управления.
6. Дождаться заполнения накопительного бака вплоть до возникновения перелива через переливной трубопровод.
7. Открыть 31 на один оборот до возникновения минимального течения через трубопровод Т1.
8. Частично закрывая кран КР5, добиться минимальной величины перелива из накопительного бака для минимизации начальных возмущений.
9. Частично открыть задвижку 38 вплоть до начала истечения красящей жидкости.
10. При необходимости уменьшать расход через трубопровод, прикрывая задвижку 31, вплоть до возникновения прямой струйки окрашенной жидкости.
11. Отрегулировать подачу красящей жидкости (38) и минимальный перелив (КР5).
12. Для измерения расхода рабочей жидкости повернуть переключатель на контрольно-измерительном блоке в положение «Время наполнения емкости ЕМ» или «Секундомер с ручным управлением».
13. Нажать кнопку «Сброс параметров».
14. Закрывать кран КР7.
15. Измерить время Δt заполнения объема W жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1, в соответствии с выбранным режимом. Записать значения в таблицу 5.
16. Открыть кран КР7.
17. Зарисовать вид подкрашенной струйки в потоке в соответствующую графу таблицы 5.
18. Определить время прохождения характерной точки подкрашивающей жидкости в трубопроводе.

Во время проведения этого опыта необходимо убедиться в неравномерности распределения скоростей в поперечном сечении трубы. Для этого необходимо путем резкого нажатия на резиновую трубку выпустить из инжектора большую порцию краски и проследить за ее перемещением.

Максимальная скорость наблюдается в центре потока и определить ее можно визуально. Для этого необходимо нанести две метки на поверхности стеклянной трубки на расстоянии 100 мм друг от друга. Первая метка должна быть на расстоянии не менее 30 мм от сопла инжектора. Затем с помощью секундомера определить время t_i прохождения контрольного участка (от первой до второй метки) характерной точки краски, выбранной в середине потока. Опыт повторить 3–5 раз и определить среднее арифметическое время t_{cp} . Результаты замеров занести в таблицу.

19. Приоткрыть задвижку 31 на 0,5 оборота.

20. Повторить действия пп. 11–18. Результаты занести в табл. 5.

21. Повторять действия по пунктам 11-17 вплоть до полного разрыва струйки подкрашенной жидкости..

22. Закрыть задвижку 38.

23. Закрыть задвижку 31.

24. Выключить питание системы управления.

25. Выключить питание насоса Н1.

26. По окончании опытов измеряется температура воды в мерном баке при помощи специального измерительного комплекса с термодатчиками.

В. Обработка экспериментальных данных

По результатам замеров производится расчет требуемых величин по формулам.

1. Рассчитать расход воды

$$Q = W / \Delta t,$$

где Δt – время опыта, с; W – объем вытекшей жидкости, л.

2. Рассчитать среднюю скорость жидкости

$$V = \frac{Q}{S},$$

где $S = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь живого сечения трубопровода Т1, м²;

d – диаметр трубы Т1, м; Q – расход воды, м³/с.

Таблица 5. Экспериментальные данные

№	W , л	Δt , с	Q , л/с	V , м/с	Re	Внешний вид струйки жидкости
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
Экспериментальные и расчетные данные для первого опыта						
Температура T , °С			Максимальная скорость V_{\max} , м/с			
Кинематический коэффициент вязкости ν , Ст			Коэффициент Кориолиса α			
Время прохождения частицей жидкости контрольного участка t_i , с:					$t_{\text{ср}}$, с	

3. Кинематический коэффициент вязкости воды, Ст (1 Ст = 1 см²/с):

$$\nu = \frac{0,0178}{1 + 0,0337T + 0,000221T^2},$$

где T – температура воды в период опыта, °С.

4. Расчитать критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{Vd}{\nu}.$$

При расчетах значения брать в: V [м/с], d [м], ν [м²/с].

5. Максимальная скорость воды в трубопроводе (только для ламинарного режима), м/с:

$$V_{\max} = \frac{L}{t_{\text{ср}}},$$

где L – длина контрольного участка, м; $t_{\text{ср}}$ – среднее время прохождения частицами воды контрольного участка, с.

6. Коэффициент Кориолиса

$$\alpha = V_{\max} / V.$$

7. Определить режимы течения жидкости в трубопроводе для всех случаев.

8. По результатам расчетов в масштабе строится график зависимости $Re = f(V)$, на котором нужно показать зоны различных режимов движения и точки перехода от одного режима к другому.

Перечень вопросов для подготовки
к защите лабораторной работы №3

1. Какие режимы движения жидкости существуют? Чем они отличаются друг от друга?
2. Опишите опыты Рейнольдса.
3. Что определяют критические числа Рейнольдса?
4. Какой из режимов движения жидкости встречается чаще всего в природе и технике?
5. Отношение каких двух сил выражает число Рейнольдса?
6. В чем заключается физический смысл числа Рейнольдса?
7. Какие силы всегда действуют на поток жидкости?
8. При каком режиме движения жидкости потери удельной энергии больше?
9. Какие области выделяют в двухслойной модели турбулентного потока?
10. От чего зависит толщина ламинарного подслоя?
11. Какая труба называется гидравлически гладкой?
12. Для чего необходимо знать режим движения жидкости?
13. Что такое коэффициент Кориолиса? В чем заключается его физический смысл?
14. Может ли коэффициент Кориолиса (коэффициент кинетической энергии) быть меньше единицы; равен единице?
15. Чем отличаются эпюры распределения скоростей по сечению потока для ламинарного и турбулентного режимов? Как будет выглядеть такая эпюра для идеальной жидкости?

Лабораторная работа № 4
«Экспериментальное определение потерь напора на местных сопротивлениях»

Цель работы: ознакомление с видами потерь энергии, получение навыков расчета потерь напора от местных сопротивлений и освоение методики экспериментального определения коэффициентов местных сопротивлений.

Теоретические положения

При движении жидкости в трубопроводе возникают потери напора (энергии) h . Различают потери двух видов: *по длине трубопровода*, которые обозначают h_l , и *потери напора на местных сопротивлениях*, которые принято обозначать h_m . При наличии нескольких местных сопротивлений и линейных участков у трубопровода общие потери напора определяют по формуле

$$h = \Sigma h_l + \Sigma h_m.$$

Местными сопротивлениями называют короткие участки трубопровода, на которых происходят изменения величины или направления скоростей потока из-за изменения конфигурации его твердых границ, приводящие к деформации потока.

Наиболее типичные местные сопротивления и характер движения жидкости в них показаны на рис. 20. В области местных сопротивлений возникают явления ударного характера и образуются «мертвые» или водоворотные зоны с интенсивным обменом частиц жидкости этих зон и основного потока, что является основным источником дополнительных потерь энергии (рис. 20).

В общем случае потери энергии в местных сопротивлениях, отнесенные к единице веса потока жидкости, определяют по формуле

$$h_m = \xi \frac{V^2}{2g},$$

где ξ – безразмерный коэффициент местного сопротивления, зависящий от геометрической формы местного сопротивления и от числа Re , а в некоторых случаях также от шероховатости стенок трубопровода и структуры потока на местном сопротивлении;

V – средняя скорость жидкости за местным сопротивлением (в некоторых случаях принимается скорость перед местным сопротивлением, что оговаривается особо).

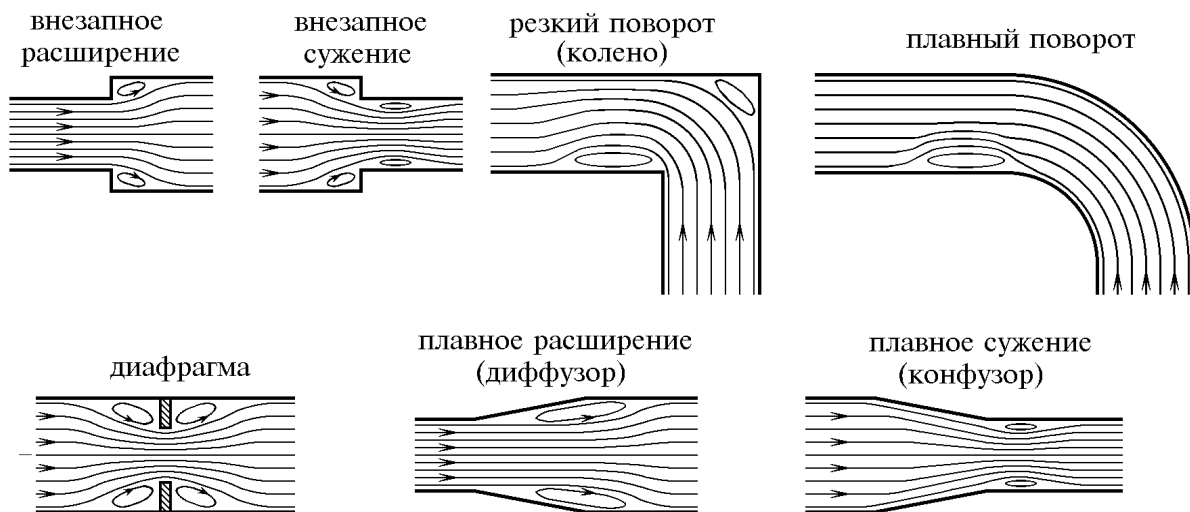


Рис. 20. Схема типичных местных гидравлических сопротивлений

При инженерных расчетах коэффициент местного сопротивления определяется по формулам, таблицам или графикам, которые приводятся в справочной литературе.

Для большинства местных сопротивлений при $Re > 10^5$ имеет место турбулентная автомодельность, т. е. потери напора пропорциональны скорости во второй степени (квадратичная зона сопротивления). При этом вязкость жидкости незначительно влияет на потери напора, а коэффициент местного сопротивления ξ имеет практически постоянную величину, не зависящую от Re (рис. 21).

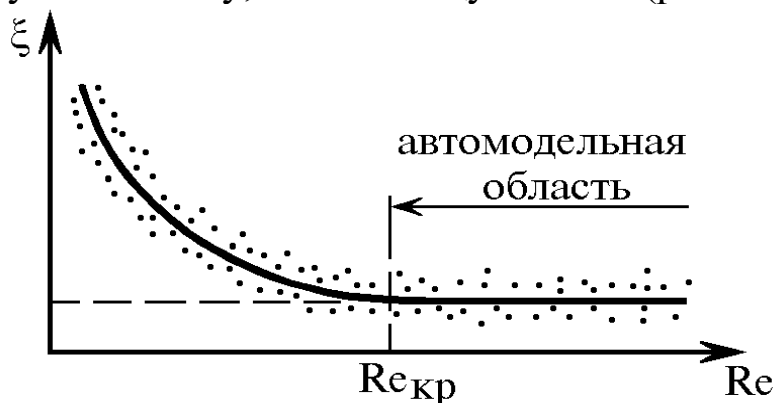


Рис. 21. Зависимость коэффициента местного сопротивления от числа Рейнольдса

При меньших значениях числа Рейнольдса вихревое сопротивление снижается, но возрастает вязкостное сопротивление жидкости. При этом коэффициент местного гидравлического сопротивления с учетом числа Рейнольдса определяют по формуле А. Д. Альтшуля:

$$\xi = \frac{A}{\text{Re}} + \xi_{\text{КВ}},$$

где $\xi_{\text{КВ}}$ – значение коэффициента местного сопротивления в квадратичной зоне; A – постоянная величина, зависящая от формы местного сопротивления.

В ряде случаев (для труб малых диаметров и жидкостей большой вязкости) вихревое сопротивление отсутствует и существует зона ламинарной автомодельности, когда $\text{Re} \leq 10$. Тогда потери прямо пропорциональны скорости потока и коэффициент местного сопротивления выражается формулой

$$\xi = \frac{A}{\text{Re}}.$$

Экспериментальная часть

А. Лабораторная установка

В лабораторной работе изучаются местные сопротивления в виде внезапного расширения, внезапного сужения (расположены на трубе Т4), диафрагмы Д1 и клиновой задвижки ЗЗ (см. рис. 2).

Диаметры условного прохода трубопроводов для внезапных расширения и сужения: $d_5 = 10$ мм, $d_6 = 15$ мм, $d_7 = 10$ мм.

Диаметр отверстия диафрагмы $d_0 = 5$ мм. Диаметр подводящего трубопровода $d = 26$ мм.

Клиновая задвижка переменного сечения имеет диаметр условного прохода $d = 16$ мм. Точки замера пьезометрического напора №8 и №9 до и после задвижки ЗЗ расположены во входном и выходном фитингах с тем же условным проходом.

Б. Порядок проведения опытов

Лабораторная работа подразумевает проведение трех серий опытов. В первой серии изучаются внезапное расширение и внезапное сужение, во второй – диафрагма и в третьей – клиновая задвижка.

Б.1. Порядок проведения опытов для внезапного расширения и внезапного сужения

1. Убедиться в том, что краны КР1, КР2 открыты.
2. Полностью закрыть задвижки 31, 32, 34, 35, 36, 37 и краны КР3, КР4, КР6, КР8, КР9.
3. Краны КР5 и КР7 и задвижку 33 полностью открыть.
4. Повернуть переключатель насоса Н1 в среднее положение (II) и включить питание насоса переключением соответствующего тумблера на блоке управления.
5. Дождаться заполнения накопительного бака вплоть до возникновения перелива через переливной трубопровод.
6. Откручивая рукоятку задвижки 37, установить уровень жидкости в пьезометре №6 ($H_{п6}$), заданный преподавателем, и записать в таблицу 6.
7. Записать в таблицу показания пьезометра №5 ($H_{п5}$) и №7 ($H_{п7}$).
8. Для измерения расхода рабочей жидкости повернуть переключатель на контрольно-измерительном блоке в положение «Время наполнения емкости ЕМ» или «Секундомер с ручным управлением».
9. Нажать кнопку «Сброс параметров».
10. Закрывать кран КР7.
11. Измерить время Δt заполнения объема W жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1. Записать значения в таблицу 6.
12. Открыть кран КР7.
13. Повторить действия по пп. 6–12 для других значений $H_{п6}$, заданных преподавателем. Полностью закрыть задвижку 33.
14. Выключить питание системы управления.
15. Выключить питание насоса Н1.
16. Записать в таблицу значение температуры воды T в баке.

Б.2. Порядок проведения опытов для исследования течения жидкости через местное сопротивление в виде диафрагмы

1. Убедиться в том, что краны КР1, КР2 открыты.
2. Полностью закрыть задвижки 31, 32, 34, 35, 36, 37 и краны КР3, КР4, КР6, КР8, КР9.
3. Краны КР5 и КР7 полностью открыть.

4. Повернуть переключатель насоса Н1 в среднее положение (II) и включить питание насоса переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

5. Дождаться заполнения накопительного бака, вплоть до возникновения перелива, через переливной трубопровод.

6. Откручивая рукоятку задвижки 34, установить уровень жидкости в пьезометре №11 ($H_{п11}$), заданный преподавателем, и записать в табл. 7.

7. Для измерения расхода рабочей жидкости повернуть переключатель на контрольно-измерительном блоке в положение «Время наполнения емкости ЕМ» или «Секундомер с ручным управлением».

8. Нажать кнопку «Сброс параметров».

9. Закрывать кран КР7.

10. Измерить время заполнения Δt объема W жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1. Записать значения в таблицу 7.

11. Открыть кран КР7.

12. Записать в таблицу показания пьезометра № 10 ($H_{п10}$).

13. Повторить действия пп. 6–12 для всех значений $H_{п11}$.

14. Полностью закрыть задвижку 34.

15. Выключить питание системы управления.

16. Выключить питание насоса Н1.

Б.3. Порядок проведения опытов для исследования течения жидкости через местное сопротивление в виде задвижки

1. Убедиться в том, что краны КР1, КР2 открыты.

2. Полностью закрыть задвижки 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37 и краны КР3, КР4, КР6, КР8, КР9.

3. Краны КР5 и КР7 полностью открыть.

4. Повернуть переключатель насоса Н1 в среднее положение (II) и включить питание насоса переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

5. Дождаться заполнения накопительного бака вплоть до возникновения перелива через переливной трубопровод.

6. Повернуть рукоятку задвижки 33 на 1 оборот в сторону открытия проходного сечения.

7. Открывая задвижку 37, установить уровень жидкости в

пьезометре №9 ($H_{п9}$), заданный преподавателем, и записать в табл. 8.

8. Для измерения расхода рабочей жидкости повернуть переключатель на контрольно-измерительном блоке в положение «Время наполнения емкости ЕМ» или «Секундомер с ручным управлением».

9. Нажать кнопку «Сброс параметров».

10. Закрывать кран КР7.

11. Измерить время Δt заполнения объема W жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1. Записать значения в таблицу 8.

12. Открыть кран КР7.

13. Записать в таблицу 8 показания пьезометра №8.

14. Повторить действия пп. 7–13 для всего интервала $H_{п9}$ из табл. 8. Таким образом получается характеристика задвижки при фиксированной величине перекрытия.

15. Закрывать задвижку З7.

16. Повернуть рукоятку З3 на несколько оборотов (см. табл. 9; 10) (изменить величину перекрытия проходного сечения задвижки).

17. Повторить действия пп. 7–16. Таким образом получить характеристики для нескольких значений перекрытия сечения задвижки. Результаты замеров и количество оборотов задвижки записать в таблицы 9 и 10.

18. Выключить питание системы управления.

19. Выключить питание насоса Н1.

В. Обработка экспериментальных данных

Для всех опытов определить кинематический коэффициент вязкости, $Ст$ ($1 Ст = 1 см^2/с$) и занести его значение в таблицу 6:

$$\nu = \frac{0,0178}{1 + 0,0337T + 0,000221T^2},$$

где T – температура воды в период опыта, °С (из таблицы 6).

В.1. Обработка экспериментальных данных для резкого расширения и резкого сужения

Данные для расчетов берутся из таблицы 6. Результаты расчетов заносятся в эту же таблицу.

1. Рассчитать расход воды

$$Q = W / \Delta t,$$

где Δt – время опыта, с; W – объем вытекшей жидкости, л.

2. Рассчитать параметры потока в трубопроводах:

а) среднюю скорость жидкости, мм/с

$$V_i = \frac{Q}{S_i}, \text{ где } S_i = \pi d_i^2 / 4;$$

б) критерий Рейнольдса

$$Re_i = \frac{V_i d_i}{\nu},$$

где кинематический коэффициент вязкости воды, Ст (1 Ст = 1 см²/с):

$$\nu = \frac{0,0178}{1 + 0,0337T + 0,000221T^2};$$

в) скоростной напор $H_{ски} = \alpha \frac{V_i^2}{2g}$,

где α – коэффициент кинетической энергии или коэффициент Кориолиса; $\alpha = 1,05 \dots 1,13$ при турбулентном режиме и $\alpha = 2$ при ламинарном режиме течения жидкости (если $Re_i > 2323$, принимается турбулентный режим, если нет, то ламинарный).

3. Рассчитать потери напора на внезапном расширении:

$$\Delta h_p = H_5 - H_6 = H_{п5} + \frac{\alpha_5 \cdot V_5^2}{2g} - H_{п6} - \frac{\alpha_6 \cdot V_6^2}{2g},$$

где $H_5 = H_{п5} + \frac{\alpha_5 \cdot V_5^2}{2g}$ – действительный напор до местного

сопротивления; $H_6 = H_{п6} + \frac{\alpha_6 \cdot V_6^2}{2g}$ – действительный напор после

местного сопротивления.

4. Рассчитать местные потери напора на внезапном сужении:

$$\Delta h_c = H_6 - H_7 = H_{п6} + \frac{\alpha_6 \cdot V_6^2}{2g} - H_{п7} - \frac{\alpha_7 \cdot V_7^2}{2g}.$$

5. Рассчитать потери давления на внезапных расширении и сужении:

$$\Delta p_p = \rho g \Delta h_p \text{ и } \Delta p_c = \rho g \Delta h_c.$$

6. Определить коэффициенты сопротивления внезапных расширения и сужения:

а) приведенные к скоростному напору в трубопроводе с меньшим диаметром

$$\xi_{p1} = \Delta h_p / \left(\frac{V_5^2}{2g} \right) \text{ и } \xi_{c2} = \Delta h_c / \left(\frac{V_7^2}{2g} \right).$$

б) приведенные к скоростному напору в трубопроводе с большим диаметром

$$\xi_{p2} = \Delta h_p / \left(\frac{V_6^2}{2g} \right) \text{ и } \xi_{c1} = \Delta h_c / \left(\frac{V_6^2}{2g} \right).$$

7. Построить напорные характеристики внезапных сужения и расширения $\Delta h = f(Q)$.

8. Построить характеристики местных сопротивлений (внезапных сужения и расширения) $\xi_{p1} = f(Re_5)$ и $\xi_{c2} = f(Re_7)$.

9. По графикам сделать вывод.

В.2. Обработка экспериментальных данных для исследования течения жидкости через диафрагму

1. Рассчитать расход воды $Q = W/\Delta t$.

2. Рассчитать местные потери напора на диафрагме.

Учитывая, что скоростные напоры в сечениях до и после диафрагмы равны, потери полного напора составят

$$\Delta h_d = H_{10} - H_{11} = H_{п10} - H_{п11}.$$

3. Рассчитать параметры потока в отверстии диафрагмы:

а) среднюю скорость жидкости $V_0 = \frac{Q}{S_0}$, где $S_0 = \pi d_0^2/4$ – площадь сечения диафрагмы, d_0 – диаметр диафрагмы, мм; Q – расход в мм³/с.

б) критерий Рейнольдса $Re_0 = \frac{V_0 d_0}{\nu}$. Значения необходимо подставлять в соответственных размерностях.

4. Рассчитать параметры потока в подводящем трубопроводе:

а) среднюю скорость жидкости $V = \frac{Q}{S}$, где $S = \pi d^2/4$ – площадь поперечного сечения подводящего трубопровода, d – диаметр подводящего трубопровода, мм.

б) критерий Рейнольдса $Re = \frac{Vd}{\nu}$.

5. Определить коэффициент сопротивления диафрагмы: приведенный к скоростному напору в отверстии диафрагмы и приведенный к скоростному напору в подводящей трубе

$$\xi_{до} = \Delta h_{д} / \left(\frac{V_0^2}{2g} \right) \quad \text{и} \quad \xi_{д} = \Delta h_{д} / \left(\frac{V^2}{2g} \right).$$

6. Определить коэффициент расхода диафрагмы μ .

$$\mu = \frac{Q}{S_0 \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h_{д}}}.$$

7. Построить характеристики диафрагмы в координатах «подача–потери напора» $\Delta h_{д} = f(Q)$, «коэффициент сопротивления – критерий Рейнольдса» $\xi_{до} = f(Re_0)$ и «коэффициент расхода – критерий Рейнольдса» $\mu = f(Re_0)$ (рис. 22). Сделать выводы.

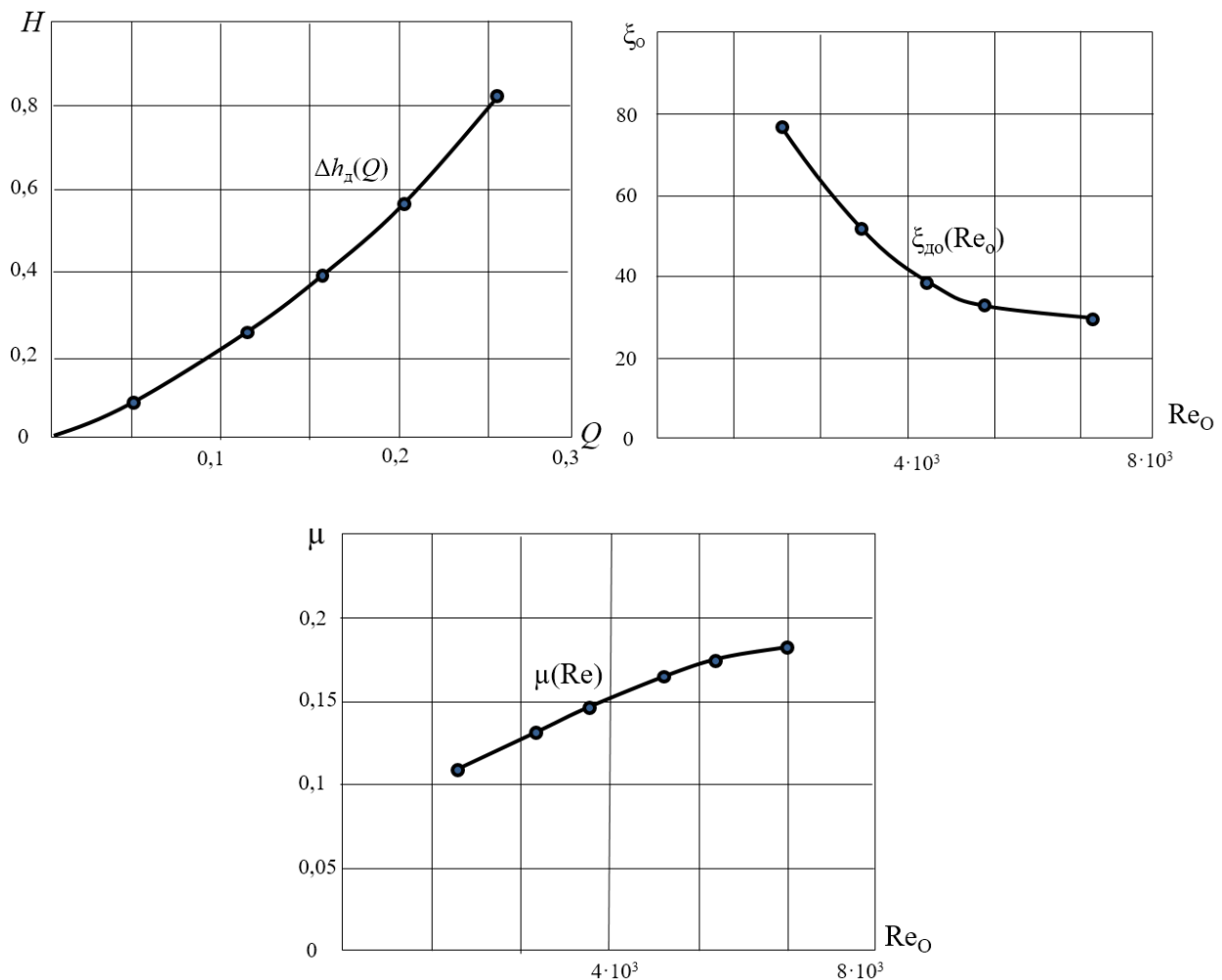


Рис. 22. Примеры построения экспериментальных характеристик диафрагмы

В.3. Обработка экспериментальных данных для исследования течения жидкости через местное сопротивление в виде задвижки

1. Рассчитать расход воды

$$Q = W/\Delta t.$$

2. Рассчитать местные потери напора на задвижке

$$\Delta h_{зДВ} = H_{п8} - H_{п9}.$$

3. Рассчитать среднюю скорость жидкости $V = \frac{Q}{S}$ и критерии

Рейнольдса $Re = \frac{Vd}{\nu}$.

4. Определить коэффициент сопротивления задвижки

$$\xi_{зДВ} = \Delta h_{зДВ} / \left(\frac{V^2}{2g} \right).$$

5. Построить характеристики задвижки $\Delta h_{зДВ} = f(Q)$ и $\xi_{зДВ} = f(Re)$ для всех перекрытий задвижки (пример на рис. 23).

7. Сделать выводы.

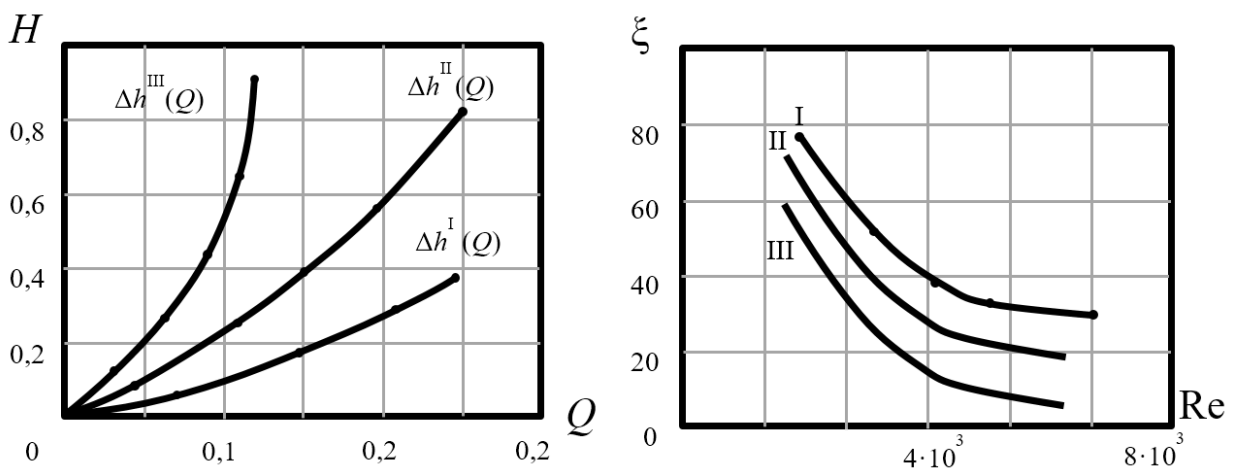


Рис. 23. Пример построения экспериментальных характеристик задвижки

При расчетах параметров необходимо следить за размерностями подставляемых величин!

Таблица 6. Значения замеров и показаний для внезапных расширения и сужения

№ опыта	W , л	Δt , с	Q , л/с	$H_{п5}$, мм	$H_{п6}$, мм	$H_{п7}$, мм	V_5 , мм/с	V_6 , мм/с	V_7 , мм/с	$H_{ск5}$, мм	$H_{ск6}$, мм	$H_{ск7}$, мм
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												

Продолжение таблицы 6

№ опыта	$Re_5 = Re_7$	Re_6	Δh_p , мм	Δp_p , Па	Δh_c , мм	Δp_c , Па	ξ_{p1}	ξ_{p2}	ξ_{c1}	ξ_{c2}	T , °C	v , Ст
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												

Таблица 7. Значения замеров и показаний для диафрагмы

№ опыта	W , л	Δt , с	Q , л/с	$H_{п10}$, мм	$H_{п11}$, мм	Δh_d , мм	V_o , мм/с
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

Продолжение таблицы 7

№ опыта	$\frac{V_o^2}{2g}$, мм	V , мм/с	$\frac{V^2}{2g}$, мм	Re_o	Re	$\xi_{до}$	ξ_d	μ
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								

Таблица 8. Расчеты и замеры для задвижки 33 (кол-во оборотов 1)

№ опыта	W , л	Δt , с	Q , л/с	$H_{п9}$, мм	$H_{п10}$, мм	$\Delta h_{здв}$, мм	V , мм/с	Re	$\frac{V^2}{2g}$, мм	$\xi_{здв}$
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										

Таблица 9. Расчеты и замеры для задвижки 33 (кол-во оборотов 2)

№	W , л	Δt , с	Q , л/с	$H_{п9}$, мм	$H_{п10}$, мм	$\Delta h_{здв}$, мм	V , мм/с	Re	$\frac{V^2}{2g}$,	$\xi_{здв}$
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										

Таблица 10. Расчеты и замеры для задвижки 33 (кол-во оборотов 3)

№	W , л	Δt , с	Q , л/с	$H_{п9}$, мм	$H_{п10}$, мм	$\Delta h_{здв}$, мм	V , мм/с	Re	$\frac{V^2}{2g}$,	$\xi_{здв}$
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										

Перечень вопросов для подготовки
к защите лабораторной работы №4

1. Какие виды гидравлических потерь выделяют?
2. В чем причина возникновения потерь по длине трубопровода?
3. Дайте определение местному сопротивлению.
4. В чем причина возникновения потерь на местных сопротивлениях?
5. По какой формуле можно определить величину потерь на местных сопротивлениях?

6. Охарактеризуйте зону турбулентной автомодельности. Когда она возникает? От чего зависят потери напора в данной области?
7. Охарактеризуйте зону ламинарной автомодельности.
8. Как учитывается вид местного сопротивления при расчетах потерь?
9. Приведите примеры местных сопротивлений.
10. Чем задается тип местного сопротивления при расчете потерь напора?
11. Как определяется коэффициент местного сопротивления при малых значениях числа Рейнольдса?

Лабораторная работа № 5

«Экспериментальное определение потерь напора по длине трубопровода, определение коэффициента Дарси»

Цель работы: экспериментальное определение потерь напора по длине простого трубопровода, построение его напорной характеристики, получение экспериментального значения коэффициентов гидравлического сопротивления и трения, сравнение полученных значений с расчетными при ламинарном и турбулентном режимах течения

Теоретические положения

Одной из основных задач гидравлики является расчет потерь напора в трубопроводе. Зависимость потери напора h от расхода жидкости Q называется гидравлической характеристикой трубопровода. В общем случае потери складываются из потерь напора по длине трубопровода h_l и потерь в местных сопротивлениях h_m :

$$h = \Sigma h_l + \Sigma h_m.$$

Потери по длине трубопровода определяются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$h_l = \lambda \frac{l V^2}{d 2g},$$

где λ – коэффициент сопротивления трубопровода (коэффициент Дарси), зависящий от режимов движения жидкости и относительной шероховатости его внутренней поверхности; l и d – длина и внутренний диаметр трубопровода; V – средняя скорость; g – ускорение свободного падения.

Потери в местных сопротивлениях

$$h_m = \xi \frac{V^2}{2g},$$

где ξ – суммарный коэффициент местных сопротивлений.

Тогда

$$h = \left(\lambda \frac{l}{d} + \xi \right) \frac{V^2}{2g}.$$

Учитывая, что $V = \frac{4Q}{\pi d^2}$, получим характеристику трубопровода в аналитическом виде:

$$h = \frac{8}{\pi^2 g d^4} \left(\lambda \frac{l}{d} + \xi \right) Q^2. \quad (9)$$

Коэффициент при Q^2 называется сопротивлением трубопровода.

$$A = \frac{8}{\pi^2 g d^4} \left(\lambda \frac{l}{d} + \xi \right).$$

Тогда гидравлическую характеристику можно записать в виде

$$h = A Q^2.$$

Характеристика трубопровода графически показана на рис. 24.

Для упрощения вычислений в формулах часто используется эквивалентная длина трубопровода $l_{\text{эКВ}}$. Это такая длина трубопровода, которая по своему сопротивлению равнозначна (эквивалентна) сумме всех местных сопротивлений, т. е. может быть определена из условия

$$\lambda \frac{l_{\text{эКВ}}}{d} \frac{V^2}{2g} = \xi \frac{V^2}{2g}.$$

Отсюда

$$l_{\text{эКВ}} = \xi \frac{d}{\lambda}.$$

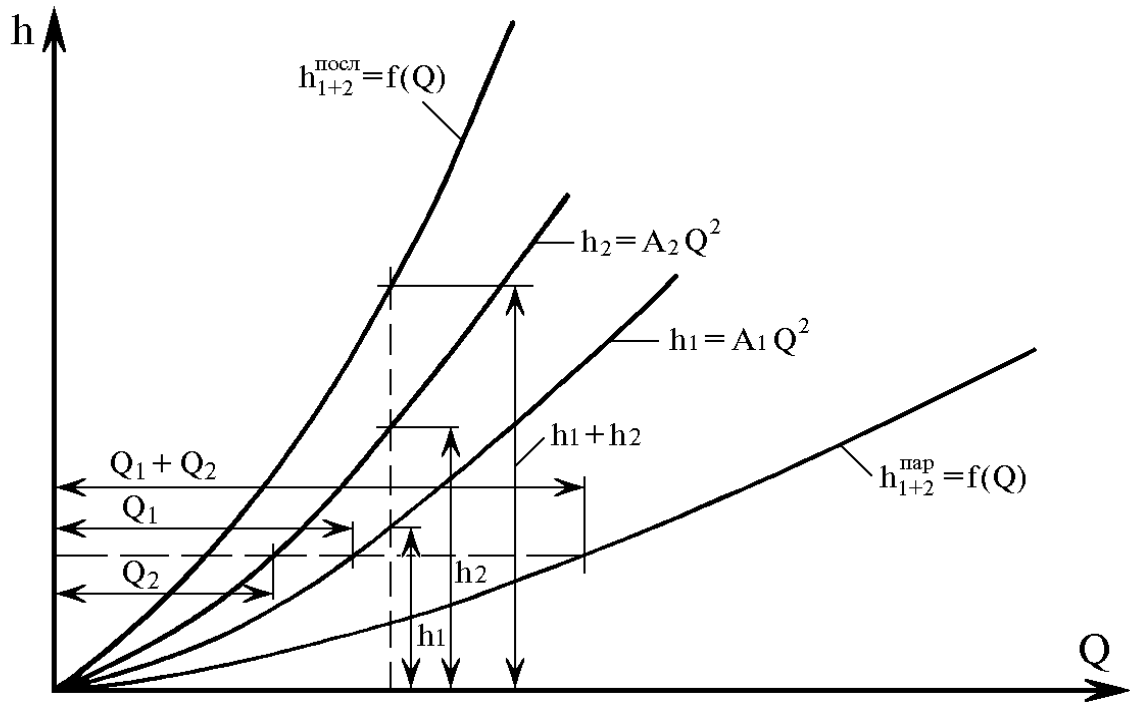


Рис. 24. Характеристика трубопровода

Полная (расчетная) длина трубопровода будет равна:

$$L = l + l_{\text{экв}}.$$

В этом случае формула (9) принимает вид

$$h = \frac{8\lambda L}{\pi^2 g d^5} Q^2.$$

Для определения характеристик систем с последовательным и параллельным соединением трубопроводов необходимо знать сопротивление линии A каждой ветви. Очевидно, что при последовательном соединении

$$A_{\text{посл}} = \Sigma A_i.$$

Для двух параллельных трубопроводов их сопротивление можно определить по формуле

$$A_{\text{пар}} = \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2 + 2\sqrt{A_1 A_2}}.$$

Характеристики параллельно и последовательно соединенных трубопроводов удобнее определять графически путем сложения потерь напора h при последовательном соединении и сложении расходов Q при параллельном соединении. Примеры показаны на рис. 24.

Экспериментальная часть

А. Лабораторная установка

Схема лабораторной установки представлена на рис. 2. Выполняется для трубопровода Т1 с внутренним диаметром $d_1 = 15$ мм и для Т2 с внутренним диаметром $d_2 = 10$ мм. Длины трубопроводов см. на рис. 2.

Б. Порядок проведения опытов

Измерить температуру воды в баке. Значения записать после таблиц.

Исследование трубопровода Т1.

1. Убедиться в том, что краны КР1, КР2 открыты.
2. Полностью закрыть задвижки З1, З2, З4, З5, З6, З7 и краны КР3, КР4, КР6, КР8, КР9.
3. Краны КР5 и КР7 полностью открыть.
4. Включить питание системы управления.
5. Повернуть переключатель насоса Н1 в среднее положение (II) и включить питание насоса переключением соответствующего тумблера на блоке управления.
6. Дождаться заполнения накопительного бака вплоть до возникновения перелива через переливной трубопровод.
7. Откручивая рукоятку задвижки З1 установить уровень жидкости в пьезометре №1 ($H_{п1}$), заданный преподавателем, и записать в таблицу 11.
8. Записать в таблицу 11 показания пьезометра №2 ($H_{п2}$) для трубопровода Т1.
9. Для измерения расхода рабочей жидкости повернуть переключатель на контрольно-измерительном блоке в положение «Время наполнения емкости ЕМ» или «Секундомер с ручным управлением».
10. Нажать кнопку «Сброс параметров».
11. Закрывать кран КР7.
12. Измерить время заполнения Δt объема W жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1 в соответствии с выбранным режимом. Записать значения в таблицу 11.
13. Открыть кран КР7.
14. Повторяя работы по пп. 7–13, выполнить замеры для всех значений $H_{п1}$ из таблицы 11.

15. Закрывать задвижку З1.

Исследование трубопровода Т2.

1. Открывая рукоятку задвижки З2, установить уровень жидкости в пьезометре №3 ($H_{п3}$), заданный преподавателем, и записать в табл. 12.

2. Записать в таблицу 12 показания пьезометра №4 ($H_{п4}$) для трубопровода Т2.

3. Закрывать кран КР7.

4. Нажать кнопку «Сброс параметров».

5. Измерить время Δt заполнения объема W жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1, в соответствии с выбранным режимом. Записать значения в таблицу 12.

6. Открыть кран КР7.

7. Отвращивая рукоятку задвижки З2, установить следующую величину пьезометрического напора в сечении З.

8. Повторяя работы по пп. 17–22, выполнить замеры для всех значений $H_{п3}$.

9. Закрывать З2.

10. Выключить питание системы управления.

11. Выключить питание насоса Н1.

В. Обработка экспериментальных данных

1. Рассчитать расход воды для Т1 и Т2 (таблицы 11 и 12)

$$Q = W/\Delta t.$$

2. Рассчитать потери напора по длине трубопровода. Так как скоростные напоры в начале и в конце трубопроводов одинаковые, а трубы горизонтальные, т. е. геометрические напоры также одинаковы, то для Т1 будет

$$\Delta h_{12} = H_1 - H_2 = H_{п1} - H_{п2},$$

а для Т2

$$\Delta h_{34} = H_3 - H_4 = H_{п3} - H_{п4}.$$

3. Рассчитать среднюю скорость жидкости $V = \frac{Q}{S}$,

где S – площадь сечения трубопровода.

4. Определить кинематический коэффициент вязкости воды, St ($1 St = 1 \text{ см}^2/\text{с}$):

$$v = \frac{0,0178}{1 + 0,0337T + 0,000221T^2},$$

где T – температура воды, °С.

Значение коэффициента вязкости записать после таблиц.

5. Рассчитать критерий Рейнольдса $Re = \frac{V \cdot d}{v}$ и определить режим течения жидкости в трубопроводе.

6. Из формулы Дарси–Вейсбаха ($\Delta h = \xi \frac{V^2}{2g}$, $\xi = \lambda \frac{l}{d}$) выразить и найти экспериментальную величину коэффициента сопротивления трубопровода ξ_3 и коэффициент Дарси λ_3 :

$$\xi_3 = \frac{2 \cdot \Delta h \cdot g}{V^2},$$

$$\lambda_3 = \frac{\xi_3 \cdot d}{l}.$$

7. Рассчитать теоретическую величину коэффициента Дарси исходя из предположения, что режим течения:

- турбулентный $\lambda_T^{турб} = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$,

где Δ – эквивалентная шероховатость испытываемых труб, принять 0,01 мм;

- ламинарный $\lambda_T^л = \frac{64}{Re}$.

Сравнить с экспериментальными значениями.

8. В одной системе координат построить характеристики трубопроводов $\Delta h_{12} = f(Q)$ и $\Delta h_{34} = f(Q)$.

Путем графического сложения этих характеристик получить характеристики для последовательного и параллельного соединения трубопроводов. Принципы графического сложения характеристик представлены на рис. 24.

9. Сделать выводы.

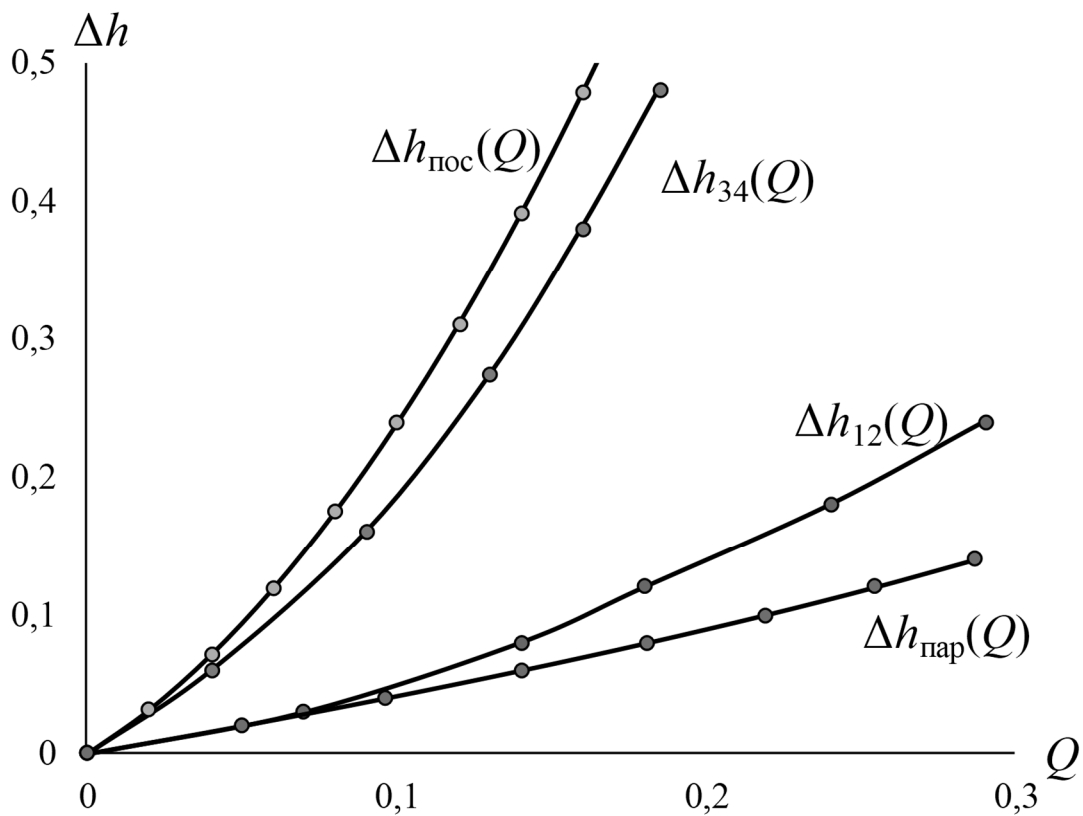


Рис. 25. Пример экспериментальных характеристик прямых трубопроводов

Таблица 11. Трубопровод Т1 диаметром 15 мм

№ опыта	W , л	Δt , с	Q , л/с	$H_{п1}$, мм	$H_{п2}$, мм	V , мм/с	Re	$\frac{V^2}{2g}$, мм	Δh_{12} , мм	ξ_9	λ_9	$\lambda_{\text{турб}}$	$\lambda_{\text{л}}$
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													

Таблица 12. Трубопровод Т2 диаметром 10 мм

№ опыта	W , л	Δt , с	Q , л/с	$H_{п3}$, мм	$H_{п4}$, мм	V , мм/с	Re	$\frac{V^2}{2g}$, мм	Δh_{34} , мм	$\xi_э$	$\lambda_э$	$\lambda_{т турб}$	$\lambda_{т л}$
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													

Перечень вопросов для подготовки
к защите лабораторной работы №5

1. В чем причина возникновения потерь по длине трубопровода?
2. По какой формуле определяются потери по длине трубопровода?
3. Что такое эквивалентная длина трубопровода?
4. Какова зависимость между h и Q ?
5. Что называют сопротивлением трубопровода? По какой формуле он определяется?
6. По какому принципу производится графическое сложение характеристик при параллельном соединении трубопроводов?
7. По какому принципу производится графическое сложение характеристик при последовательном соединении трубопроводов?
8. От каких параметров зависит коэффициент Дарси?
9. Как рассчитать полную длину трубопровода?

Лабораторная работа № 6
«Изучение силового взаимодействия незатопленной струи
через насадок на механическую преграду»

Цель работы: экспериментальное определение силового воздействия струи на твердую преграду.

Теоретические положения

Свободной струей жидкости или газа называется поток, не ограниченный твердыми границами. Различают **затопленные** и **незатопленные свободные струи**. Затопленной является струя, которая движется внутри объема жидкости. Незатопленная жидкая струя движется в газовом пространстве (чаще в воздухе). Форма поперечного сечения струи может быть различной и задается конструкцией элемента, из которого она выходит. Обычно таким элементом является различного вида насадок. Поток в струе может двигаться как в ламинарном, так и в турбулентном режимах. В практике чаще имеем турбулентную струю.

Ограничимся рассмотрением незатопленной струи воды, вытекающей через насадок с круглым поперечным сечением в атмосферу. Такие струи имеют широкое техническое применение. Примерами могут служить гидромониторные струи, используемые на вскрышных работах при открытой добыче полезных ископаемых, пожарные струи и дождевальные струи для полива.

Незатопленная струя имеет три характерных части: компактную, раздробленную и распыленную (рис. 26).

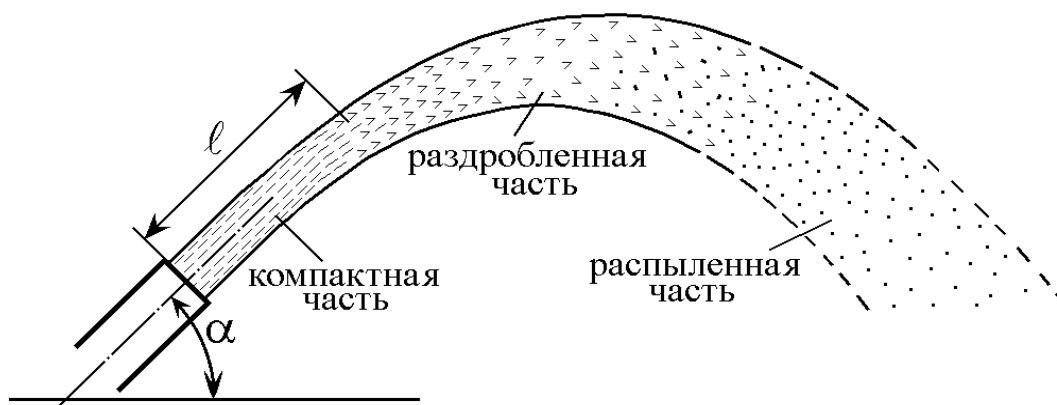


Рис. 26. Структура незатопленной свободной струи

Компактная часть струи сохраняет заданную насадком форму поперечного сечения и сплошность потока. В раздробленной части струя, расширяясь, делится на отдельные крупные части. В распыленной части струя, еще более расширившись, состоит из отдельных капель. Изменение структуры струи и ее полное разрушение обусловлено турбулентным обменом через границу струи между жидкостью и воздухом. Этот процесс называется *аэрацией*.

В зависимости от назначения к струям предъявляют различные требования. Так, пожарная струя должна иметь большую ударную силу и радиус действия. Струя дождевальными установками, наоборот, должна иметь достаточно развитую распыленную часть, что достигается применением различных насадков-распылителей.

Гидромониторные струи должны иметь компактную часть максимально возможной длины, чтобы иметь большую мощность.

Для этого конструкция выходной части ствола гидромонитора выполняется такой, чтобы уменьшить внутренние колебания в струе и ее турбулентность.

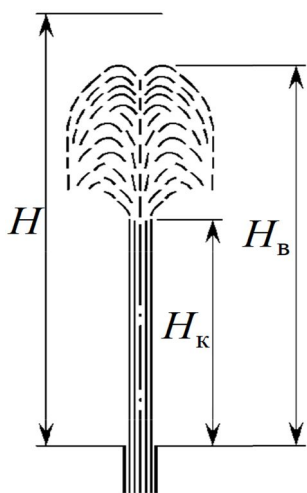


Рис. 27. Вертикальная струя

Известна эмпирическая формула, полученная Н. П. Гавыриным, по определению длины компактной части струи гидромонитора с мощностью, достаточной для размыва грунтов

$$l \approx 0,415 \sqrt[3]{\alpha H^2 d_0},$$

где H – напор перед выходным отверстием диаметром d_0 ; α – угол наклона оси ствола к горизонту.

Эта формула применима для $d_0 \leq 0,05$ м, $H \leq 80$ м и $\alpha = 5 - 32^\circ$.

Высота вертикальной струи H_b из-за сопротивления окружающего воздуха всегда меньше напора на выходе из насадка H (рис. 27). Она описывается зависимостью

$$H_b = \frac{H}{1 + \psi H},$$

где $\psi = \frac{0,00025}{d_0 + (10d_0)^3}$ – эмпирический коэффициент. Здесь d_0 измеряется в метрах.

Компактная часть струи может быть определена как

$$H_k = \beta H_b,$$

где β – коэффициент, зависящий от H_B (рис. 28).

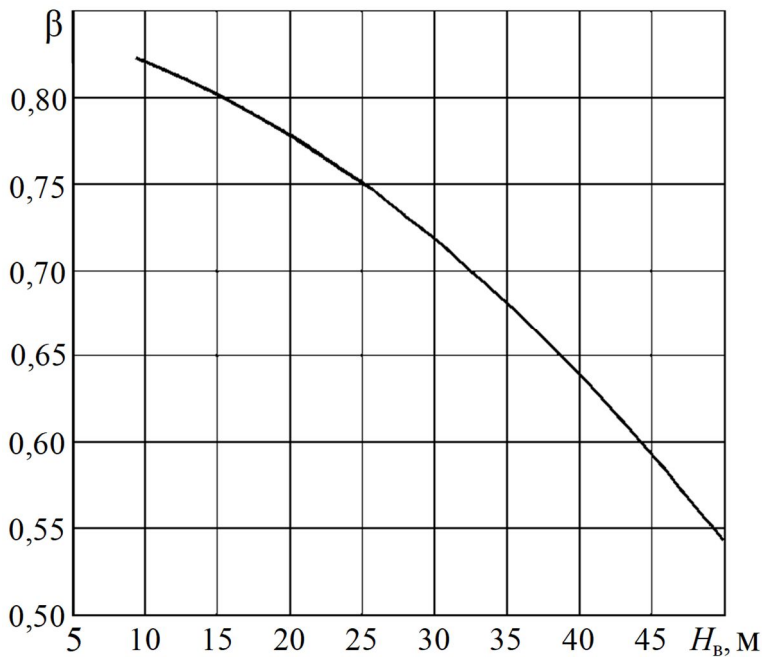


Рис. 28. Зависимость коэффициента β от H_B

Наклонные струи. Основным параметром, определяющим дальность полета струи, является угол наклона струи к горизонту α .

На рис. 29 траектория полета компактной части струи показана линией 0–1, а линией 0–2 – траектория полета с распыленной частью струи. Дальше точки 2 не попадают даже отдельные капли.

Очевидно, что в области А располагаются пожарные и гидромониторные струи, а в области Б – дождевальные.

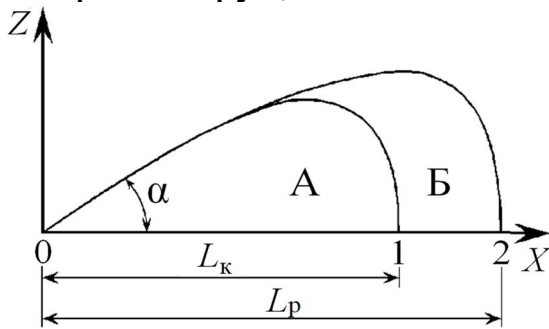


Рис. 29. Наклонные струи

По экспериментальным данным в предварительных расчетах принимается, что дальность полета компактной части струи равна высоте компактной части вертикальной струи, т. е.

$$L_k = H_k.$$

Для наклонных струй с распыленной частью дальность полета струи определяется как

$$L_p = kH_B,$$

где k – коэффициент, зависящий от угла наклона струи α .

Обладая энергией, поток в струе при встрече с преградой оказывает на нее динамическое воздействие. На рис. 30 приведена схема воздействия струи на плоскую стенку.

Принимаем, что жидкость растекается по поверхности стенки только двумя потоками.

Это можно сделать, выполнив стенку в виде желоба.

Выделим участок потока сечениями 1–1, 2–2 и 3–3.

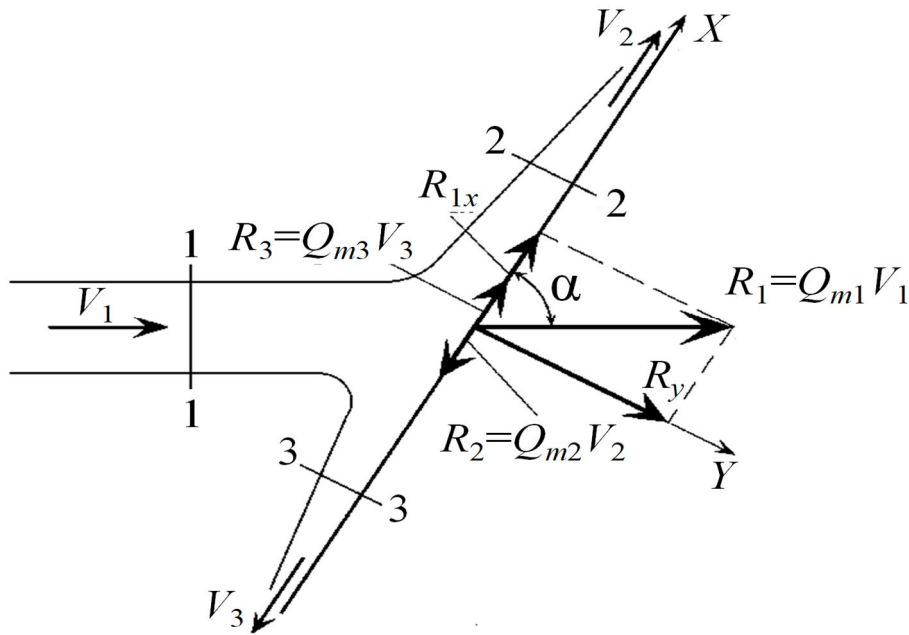


Рис. 30. Схема воздействия струи на плоскую стенку

Силы избыточного давления жидкости в данных сечениях равны нулю и вес жидкости пренебрежимо мал. Поэтому сила действия потока на стенку только динамическая:

$$\bar{R} = \bar{R}_{\text{дин}} = Q_{m1}\bar{V}_1 - Q_{m2}\bar{V}_2 - Q_{m3}\bar{V}_3,$$

где Q_{m1} , \bar{V}_1 , Q_{m2} , \bar{V}_2 , Q_{m3} , \bar{V}_3 – массовые расходы и скорости потока в соответствующих сечениях.

Известно, что массовый расход равен массе жидкости, прошедшей через поперечное сечение потока в единицу времени.

Пренебрегая силами трения жидкости по поверхности стенки ввиду их малости, принимаем, что сила R действия струи на стенку направлена перпендикулярно к стенке, т. е. сумма сил, действующих вдоль стенки, равна нулю:

$$R_x = Q_{m1}V_1 \cos \alpha - Q_{m2}V_2 + Q_{m3}V_3 = 0, \quad (10)$$

где α – угол наклона стенки к оси струи.

Поэтому сила действия потока на стенку составит

$$R = R_y = Q_{m1}V_1 \sin \alpha.$$

В свою очередь имеем

$$Q_{m1} = Q_{m2} + Q_{m3}. \quad (11)$$

Совместное решение уравнений (10) и (11) позволяет определить Q_{m2} и Q_{m3} .

Вследствие искривления линии тока при растекании жидкости по стенке фактическое значение силы на 5–8 % меньше расчетного.

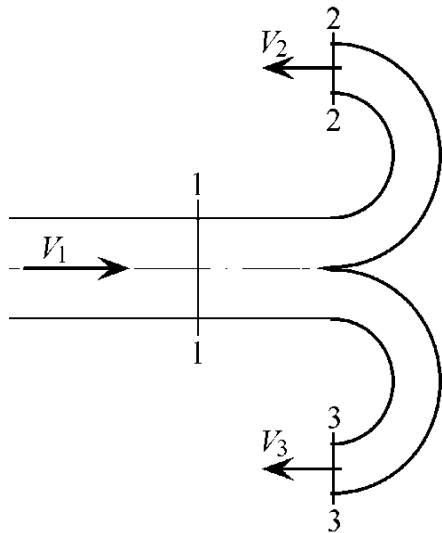


Рис. 31. Схема лопасти ковшовой турбины

Силу воздействия струи на стенку можно увеличить, если стенку сделать ковшообразной (рис. 31). Такую форму имеют лопасти ковшовых турбин.

Поток, пройдя лопать, разворачивается в обратную сторону ($\alpha = \pi/2$).

Тогда сила действия потока на стенку направлена по оси потока и увеличится вдвое:

$$R = Q_{m1}V_1 \sin \pi/2 -$$

$$- Q_{m2}V_2 - Q_{m3}V_3 = 2Q_{m1}V_1,$$

так как вследствие принятых выше допущений $V_1 = V_2 = V_3$.

Истечение жидкости через насадки. *Насадком* называется короткий патрубок длиной обычно $(3...5)d_0$, присоединенный к отверстию с *внешней* или *внутренней* стороны. Применяют насадки с целью увеличить расход или изменить (увеличить, уменьшить) кинетическую энергию струи. Для увеличения пропускной способности водосбросов на дамбах, плотинах и ускорения опораживания емкостей обычно используют *цилиндрические* насадки. *Конические сходящиеся и коноидальные* насадки (конфузоры) применяют с целью увеличения скорости, дальнотойности и силы удара струи (гидромониторы, брандспойты, входные элементы насосов, вентиляторов, струйные усилительные элементы, расходомеры и т. п.). *Конические расходящиеся* насадки (диффузоры) позволяют преобразовать часть кинетической энергии потока в потенциальную, т. е. повышают давление и уменьшают скорость, что используется, например, в выходных элементах насосов и вентиляторов, в топливоподающих элементах для лучшего распыления горючей смеси.

Для расчета насадков пригодны те же закономерности, что и для малого отверстия, но численные значения коэффициентов истечения ϵ , μ , ξ , ϕ имеют другие значения (табл. 13) и определяются экспериментально.

Существенная разница величин коэффициентов обусловлена различием условий входа, протекания и истечения жидкости.

На примере внешнего цилиндрического насадка рассмотрим особенности протекания жидкости в нем по рис. 32.

Условия и характер течения жидкости на входе в патрубок с острой входной кромкой такие же, как и для отверстия. В сечении 1–1 струя максимально сжата, а на участке 1–2 она плавно расширяется, заполняя все сечение патрубка.

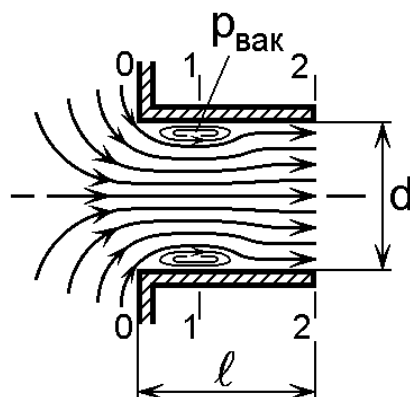


Рис. 32. Схема истечения через внешний насадок

Таблица 13. Параметры отверстий и насадков

Вид насадка	Схема	ε^*	ξ	φ	μ^*
1. Цилиндрический внешний		1	0,5	0,82	0,82
2. Цилиндрический внутренний		1	1	0,71	0,71
3. Конический сходящийся $\beta = 13,4^\circ$		0,98	0,06...0,09	0,96	0,94
4. Конический расходящийся $\beta = 7^\circ$		1	3...4	0,45	0,45
5. Коноидальный		1	0,04	0,98	0,98
6. Круглое отверстие		0,62...0,64	0,06	0,97	0,61

* коэффициенты ε и μ относятся к выходному сечению патрубка.

Между сжатой струей и стенкой насадка образуется водоворотная (вихревая) зона с пониженным давлением $p_{\text{вак}}$. Это можно доказать, используя уравнение Бернулли для сечений 1–1 и 2–2. Поскольку в сечении 1–1 скоростной напор больше, чем в сечении 2–2, то для выполнения постоянства суммы скоростного и

пьезометрического напоров (смысл уравнения Бернулли) напор (или давление) в сечении 1–1 должен быть меньше. При истечении в атмосферу $p_2 = p_{\text{атм}}$ и, следовательно, $p_1 < p_{\text{атм}}$, т. е. в сечении 1–1 создается вакуум.

С увеличением действующего напора H и, следовательно, скорости истечения вакуум возрастает, и в критической ситуации может начаться испарение и кипение жидкости – *кавитация* в вихревой зоне.

Влияние вакуума на расход жидкости двоякое. С одной стороны, пониженное давление тормозит транзитную струю, т. е. возрастает коэффициент сопротивления ξ , но, с другой стороны, создается эффект «подсасывания» жидкости из резервуара, что в итоге ведет к значительному увеличению расхода.

Из описанной схемы истечения следует, что расход через отверстие в толстой стенке при

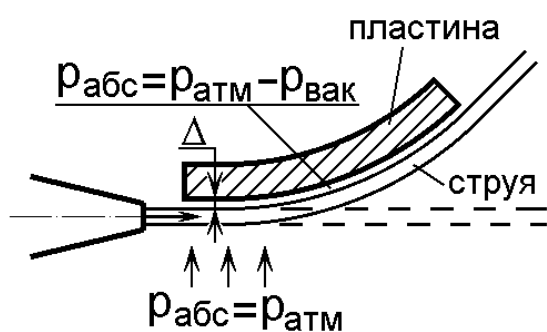


Рис. 33. Схема, поясняющая эффект Коанда

в толстой стенке при $l \approx (3...5)d_0$ будет примерно на 35% больше, чем через такое же отверстие в тонкой стенке.

Эффект Коанда заключается в отклонении струи от нормальной траектории в направлении близлежащей твердой границы пространства и поясняется на рис. 33.

Если к струе приближать твердую стенку (например, пластину), то имеющийся между ними воздух частично уносится струей жидкости, т. е. в зазоре Δ увеличивается скоростной напор, а следовательно, понижается давление. Вследствие разности абсолютных давлений струя отклоняется в сторону стенки.

Этот эффект часто используется в струйной технике.

Инверсией струи называется процесс плавной трансформации формы поперечного сечения струи, вытекающей из отверстий полигональной (многоугольной) формы. На рис. 34 это показано на примере струи из треугольного отверстия.

Трансформация формы струи объясняется различной скоростью входа струек жидкости по углам и граням отверстия, действием сил поверхностного натяжения, стремящихся придать струе круглую форму и противодействующих этому инерционных сил.

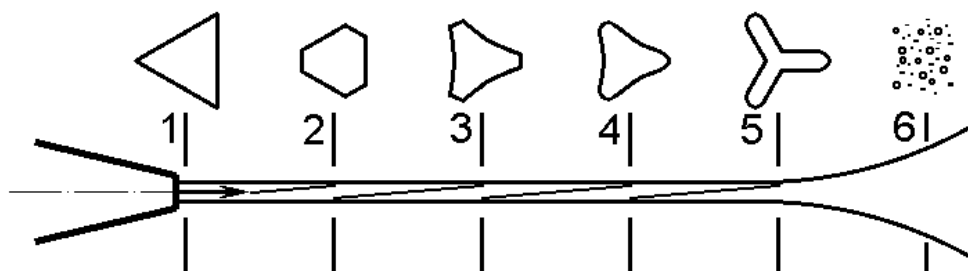


Рис. 34. Инверсия струи из треугольного отверстия до ее разрушения

Практическое применение процессу инверсии струи пока не найдено, однако вследствие своей зрелищности это явление иногда применяется в фонтанных устройствах.

Экспериментальная часть

А. Лабораторная установка

Конструкция установки (см. рис. 2). Насадок цилиндрический с внутренним диаметром $d_c = 5,4$ мм. Масса пластины (преграды) 50 г.

Расход жидкости через сопло в данной работе возможно измерять двумя способами:

1) непосредственно по показаниям счетчика РМ1, замеряя промежуток времени, соответствующий выбранному контрольному объему;

2) снимая показания с экрана СИ-8 (при расширенной комплектации стенда).

Б. Порядок выполнения опытов

1. Убедиться в том, что краны КР1, КР2 открыты.
2. Полностью закрыть задвижки З1, З4, З5, З6, З7 и краны КР3, КР4, КР5, КР6, КР8, КР9.
3. Поворачивая рукоятку задвижки З2, установить запорный элемент примерно в среднее положение.
4. Включить питание системы управления.
5. Повернуть переключатель насоса Н1 в среднее положение (II) и включить питание насоса переключением соответствующего тумблера на блоке управления.
6. Постепенно поворачивая рукоятку крана КР8, увеличивать

количество жидкости, истекающей из сопла, до тех пор, пока угол поворота преграды (пластины) не достигнет первого значения, заданного преподавателем.

7. Замерить время Δt (замеряется секундомером) за которое объем жидкости W проходит через расходомер РМ1 в линии подачи жидкости к соплу. Цифры на последнем барабане (крайний правый) счетчика соответствуют объему в литрах, цена малого деления – 0,2 л. Значения Δt занести в табл. 14.

Кроме того, показания счетчика РМ1 поступают на вход СИ-8 и отражают мгновенные значения расхода в линии подвода жидкости к соплу (Q). В этом случае значения расхода Q , отображаемые на табло, заносятся в таблицу 14, и столбцы W и Δt не заполняются. Порядок измерения расхода в этом случае следующий:

- повернуть переключатель на контрольно-измерительном блоке в положение «Показания расходомера РМ1».

- на счетчике импульсов нажать и удерживать кнопку », на экране СИ8 будет отображаться текущее значение расхода.

8. Изменяя величину перекрытия крана КР8, установить другие углы наклона пластины и повторить измерения по пункту 7.

9. Выключить питание системы управления.

10. Выключить электропитание насоса.

В. Обработка экспериментальных данных

1. Рассчитать расход воды через сопло (при измерениях объема и времени вручную)

$$Q = W/\Delta t.$$

2. Определить среднее значение скорости истечения жидкости из сопла:

$$V = \frac{Q}{S},$$

где $S = \pi d_C^2 / 4$ – площадь струи на срезе сопла; d_C – диаметр живого сечения на срезе сопла, м; Q – расход, м³/с.

3. По известному углу наклона пластины к горизонту определить силу воздействия на преграду из условия равновесия пластины (схема сил показана на рис. 35).

Сумма моментов относительно оси поворота пластины:

$$\sum M_A = 0: F_C h_C - mgh_G \sin(\alpha) = 0,$$

где $h_C = 70$ мм – расстояние между осью поворота пластины и соплом; $h_G = 80$ мм – расстояние между осью поворота пластины и ее центром тяжести; α – угол наклона пластины.

Следовательно

$$F_C = \frac{mgh_G \sin(\alpha)}{h_C}$$

Найденные значения F_C занести в табл. 14.

4. Найти теоретическую силу воздействия на преграду по средней скорости истечения жидкости из сопла по формуле Эйлера.

$$F_{CT} = SpV^2 \sin(\beta).$$

$$\beta = 90^\circ - \alpha.$$

Полученные значения теоретической силы воздействия на преграду занести в таблицу 14 и сравнить с величинами, рассчитанными по п. 9.

5. Построить график зависимости $F_C = f(Q)$. Сделать выводы.

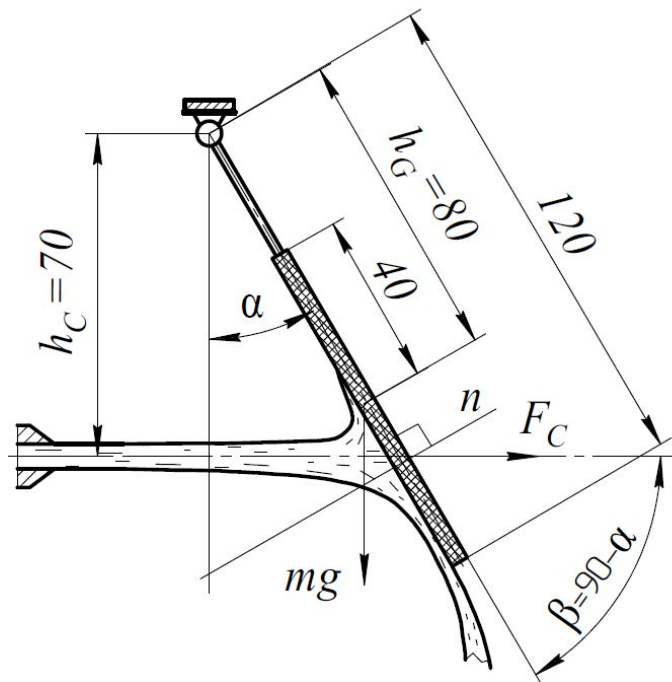


Рис. 35. Схема для определения силы воздействия струи F_C на плоскую преграду из условия равновесия пластины

Таблица 14. Результаты замеров и расчетов для лабораторной работы

№	α , град	W , л	Δt , мин	Q , л/мин	V , м/с	F_C , Н	$F_{ст}$, Н
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Перечень вопросов для подготовки
к защите лабораторной работы №6

1. Какое отверстие называют незатопленным?
2. Что называется процессом аэрации?
3. Запишите формулу, по которой определяется длина компактной части струи гидромонитора.
4. Как можно увеличить силу воздействия струи на стенку?
5. Что называют свободной гидравлической струей?
6. Какова структура незатопленной свободной струи?
7. Как определяется сила действия потока струи на стенку?
8. Какими коэффициентами характеризуются насадки?
9. Что называют насадками? Для чего они предназначены?
10. Что называется внешним цилиндрическим насадком? Какие явления объясняют его повышенную пропускную способность по сравнению с малым отверстием с тонкой кромкой?
11. Какие параметры потока позволяют изменить конический сходящийся насадок?
12. Какие параметры потока позволяют изменить конический расходящийся насадок?
13. В чем отличие конического насадка от коноидального?
14. В чем заключается эффект Коанда?
15. Что такое инверсия струи?
16. При каком условии возникает инверсия?

Лабораторная работа № 7 **«Исследование режимов работы насосной установки»**

Цель работы – экспериментальное определение напорных характеристик насосной установки по перекачке жидкостей.

Теоретические положения

Насосные установки широко применяются в народном хозяйстве. Это водоотливные установки шахт рудников; системы водоснабжения предприятий и жилых зданий, перемещения химических реагентов в химическом производстве, охлаждения двигателей внутреннего сгорания и др. Типовая схема насосной установки представлена на рис. 36.

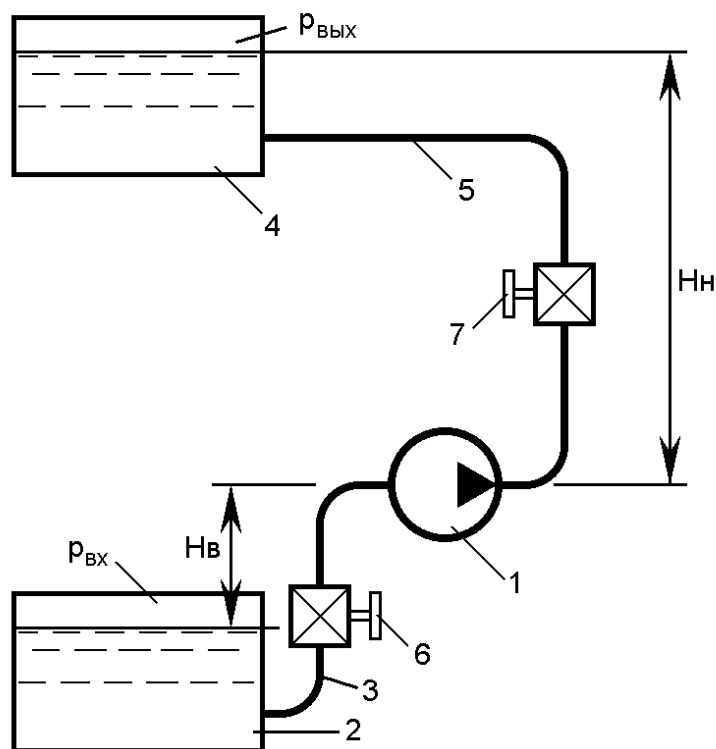


Рис. 36. Насосная установка

Основным элементом насосной установки является насос 1. В большинстве установок это центробежный насос, который отличается большими производительностью и напором. Используются и объемные гидронасосы. Например, в системах смазки различных машин часто используются шестеренные насосы.

Насос из бака 2 перекачивает жидкость в бак 4 по всасывающему 3 и нагнетающему 5 трубопроводам, которые снабжены вентилями 6 и 7 соответственно, позволяющими регулировать производительность и напор установки.

Основными характеристиками насосной установки являются характеристика сети $H_{\text{сети}} = f(Q)$ и характеристика насоса $H_{\text{нас}} = f(Q)$.

Характеристикой сети является уравнение, по которому определяется напор, необходимый для перемещения жидкости по трубопроводам насосной установки (подъема ее на нужную высоту, преодоления противодействия и сопротивления в трубопроводе) с заданной производительностью.

Для насосной установки, изображенной на рис. 36, уравнение характеристики сети имеет вид

$$H_{\text{сети}} = \frac{p_{\text{вых}} - p_{\text{вх}}}{\rho g} + H_{\text{в}} + H_{\text{н}} + k_{\text{тр}} Q^2,$$

где $p_{\text{вх}}$, $p_{\text{вых}}$ – абсолютные давления соответственно на входе и выходе насосной установки; ρ – плотность перекачиваемой жидкости; $H_{\text{в}}$ и $H_{\text{н}}$ – геометрические высоты соответственно всасывания и нагнетания; $k_{\text{тр}} Q^2$ – потери напора в трубопроводах сети, обусловленные потерями по длине трубопроводов и на местных сопротивлениях.

Уравнение вида $h_{\text{тр}} = k_{\text{тр}} Q^2$ называется характеристикой трубопровода и для насосной установки складывается из характеристики всасывающего и нагнетающего трубопроводов:

$$h_{\text{тр}} = h_{\text{вс}} + h_{\text{наг}}$$

или
$$k_{\text{тр}} Q^2 = (k_{\text{вс}} + k_{\text{наг}}) Q^2.$$

Коэффициент $k_{\text{тр}}$ называют удельным сопротивлением трубопровода, которое может быть определено расчетным путем или экспериментально.

Графики характеристик трубопроводов имеют вид, представленный на рис. 37.

Характеристика сети является основной для выбора насоса. Задача выбора сводится к нахождению в каталоге такого насоса, который при требуемом напоре обеспечивает заданную производительность (точка А характеристики сети на рис. 37). Обращение к

каталогам насосов обусловлено тем, что теоретический расчет насоса сложен и не дает требуемой для практики точности. Поэтому характеристики насосов определяют экспериментально и представляют в каталогах.

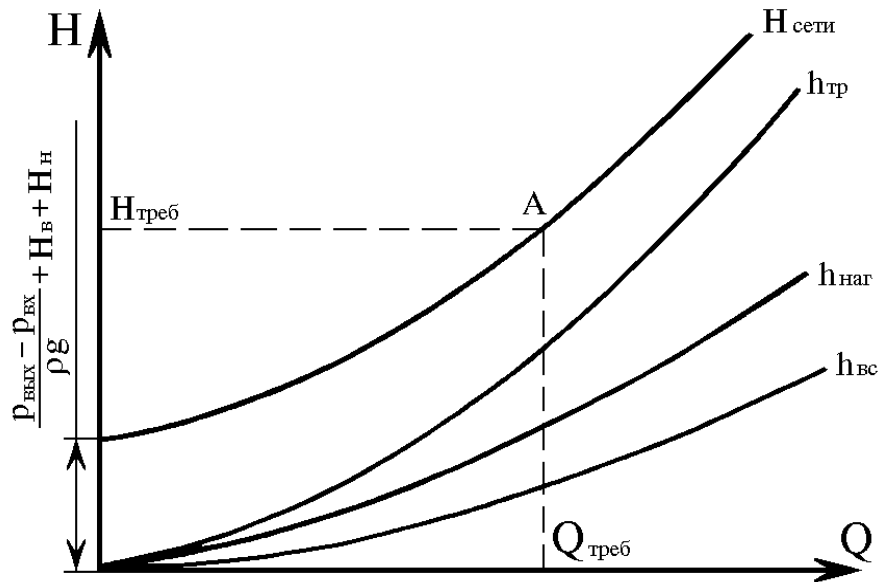


Рис. 37. Характеристики трубопроводов и сети насосной установки

Типичная характеристика насоса $H_{\text{насоса}}$ имеет вид, представленный на рис. 38.

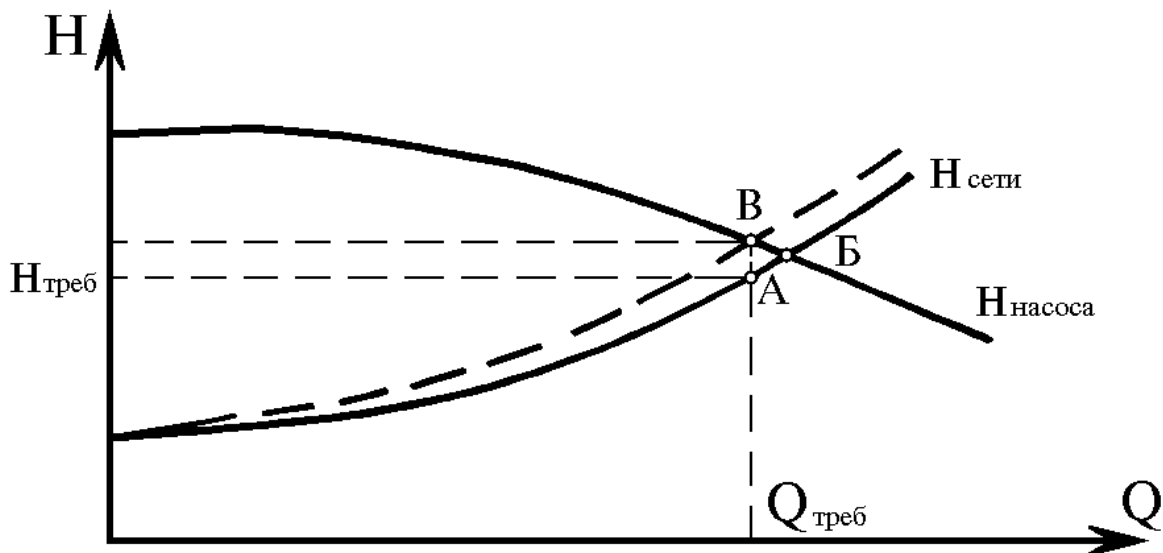


Рис. 38. Получение режимной точки насосной установки

При выборе насоса необходимо, чтобы его характеристика проходила через точку А (рис. 37 и 38), соответствующую рабочему режиму насосной установки.

Практически это условие выполнить удастся очень редко. Обычно характеристика насоса пересекает характеристику сети вблизи точки А. На рис. 38 это точка Б. Если требуемый режим работы задан жестко и не допускает небольших отклонений по производительности, то необходимо фактический режим работы насосной установки привести к требуемому. Для этого необходимо изменить либо характеристику сети, либо характеристику насоса.

В насосных установках, в которых не требуется регулировать подачу ($Q_{\text{треб}} = \text{const}$), необходимый режим можно получить за счет изменения характеристики насоса. Для этого либо обтачивают рабочее колесо насоса (чем меньше диаметр колеса, тем ниже характеристика), либо изменяют частоту вращения вала насоса до величины, обеспечивающей пересечение характеристики сети и изменившейся характеристики насоса в режимной точке А. Стоит отметить, что изменение частоты вращения насосного колеса приемлемо и при переменной требуемой производительности. Однако для этого требуется соответствующий привод (например, асинхронный электродвигатель с преобразователем частоты).

В регулируемых по производительности насосных установках заданную подачу $Q_{\text{треб}}$ получают изменением характеристики сети. Это производится при помощи вентиля (преимущественно вентилем в напорной магистрали). На графике (рис. 38) новая характеристика сети показана пунктирной линией. В данном случае она получается путем закрытия вентиля и пересекается с характеристикой насоса в точке, соответствующей требуемой подаче. Однако видно, что возрос требуемый напор, так как введено дополнительное сопротивление проходу жидкости прикрываемым вентилем. Как результат этого, возрастет потребляемая мощность установки и снизится ее КПД, поэтому диапазон регулирования не рекомендуется делать большим, чтобы существенно не снизить КПД установки. Регулирование вентилем на всасывающем трубопроводе возможно в еще меньшем диапазоне, т. к. в этом случае снижаются всасывающие свойства насоса и возрастает опасность возникновения кавитации на входе в насосное колесо и быстрого выхода из строя насоса.

В ряде случаев, когда необходимо перекачивать значительный объем жидкости или преодолевать значительные сопротивления, не удастся подобрать по каталогу насос. Возникшую проблему можно решить путем использования не одного, а двух одинаковых или

однотипных насосов. При больших значениях требуемых напоров $H_{\text{треб}}$ нужно ставить два насоса последовательно, а при больших подачах $Q_{\text{треб}}$ – два насоса параллельно.

На рис. 39, а показан вариант параллельного соединения двух одинаковых насосов без изменения паспортных характеристик.

В этом случае насосная установка будет работать в режиме, соответствующему точке «Б», а каждый насос в отдельности – точке «В».

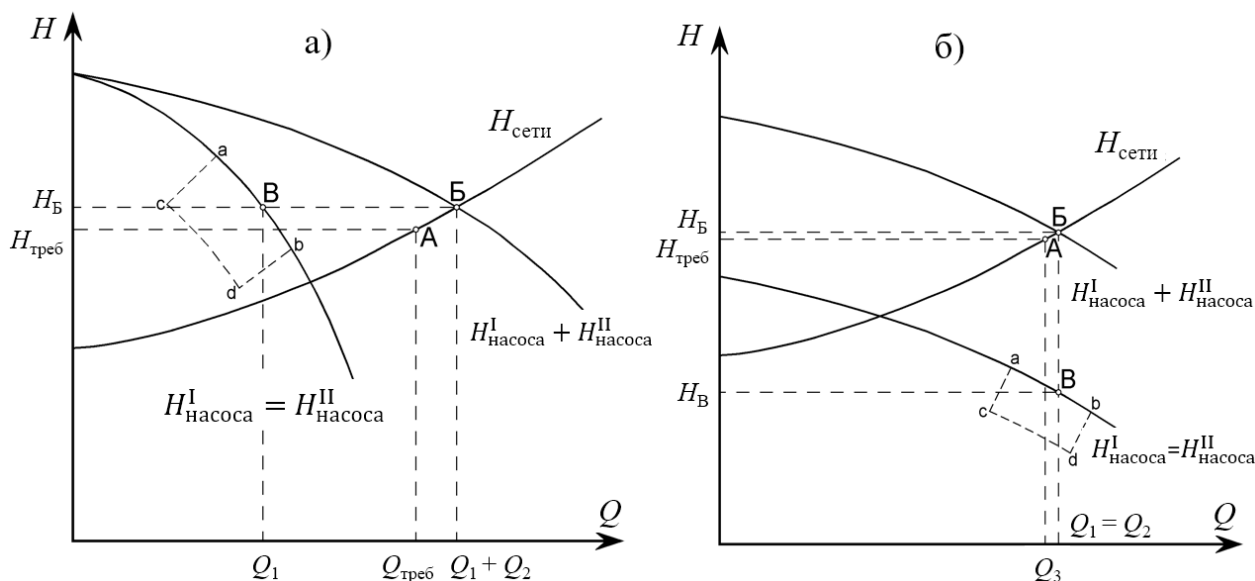


Рис. 39. Схемы параллельного соединения двух насосов

При последовательном соединении насосов надо иметь в виду, что на входе последующего насоса будет напор, созданный предыдущим насосом. Этот напор может превысить величину, допустимую по условиям прочности насоса. В этом случае второй насос следует размещать отдельно от первого насоса в том месте напорного трубопровода, в котором давление жидкости снижается до безопасного уровня.

На рис. 39, б показан вариант последовательного соединения двух одинаковых насосов без изменения паспортных характеристик.

В этом случае насосная установка будет работать в режиме, соответствующем точке «Б», а каждый насос в отдельности – точке «В».

Изменение характеристик соединенных по любому варианту насосов осуществляется так же, как и у одного насоса – путем изменения частоты вращения или обточкой рабочего колеса.

Экспериментальная часть

А. Лабораторная установка

Лабораторная установка (рис. 2) состоит из двух насосов Н1 (WCP 25-60G) и Н2 (WCP 25-40G), предназначенных для изучения работы насосной установки.

Б. Порядок проведения опытов

В лабораторной работе проводится 3 серии опытов. Первая серия посвящена определению характеристик насосов Н1 (табл. 15) и Н2 (табл. 16). Во второй серии опытов рассматривается последовательное включение насосов Н1 и Н2 (табл. 17.), а в третьей – параллельное включение (табл. 18).

Б.1. Порядок проведения опытов для определения характеристик насосов Н1 и Н2

Определение характеристик Н1 (таблица 15)

1. Убедиться в том, что краны КР1 и КР2 открыты.
2. Полностью закрыть задвижку 35 и краны КР3, КР5, КР8, КР9.
3. Открыть кран КР4.
4. Включить питание системы управления.
5. Повернуть переключатель насоса Н1 в среднее положение (II) и включить питание переключением соответствующего тумблера на блоке управления.
6. Установить переключатель на блоке контрольно-измерительной аппаратуры в положение «Показания расходомера РМ2».
7. Измерить по линейке высоту всасывания H_0 насосов Н1 и Н2 от центра всасывающего трубопровода до уровня жидкости в нижнем баке Б1. Показания записать после таблиц.
8. Измерить расход насоса Q_H (л/мин). Для этого нажать и удерживать кнопку на счетчике импульсов СИ-8, входящем в состав блока контрольно-измерительной аппаратуры. Значения записать в таблицу 15.
9. Измерить давление $p_{дд1}$ (кПа) на выходе насоса Н1 по показаниям датчика давления ДД1 (табло «Давление на выходе насоса 1»).
10. Открытием задвижки 35 установить следующую (заданную

преподавателем) величину давления $p_{дд1}$.

11. Повторять действия по пп. 7–9 для всех значений давления $p_{дд1}$ из таблицы 15.

12. Выключить питание системы управления.

13. Выключить питание насоса Н1.

Определение характеристик Н2 (таблица 16)

14. Убедиться в том, что краны КР1, КР2 открыты.

15. Полностью закрыть задвижку 35 и краны КР3, КР4.

16. Включить питание системы управления.

17. Повернуть переключатель насоса Н2 в крайнее правое положение (III) и включить питание насоса переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

18. Установить переключатель на блоке контрольно-измерительной аппаратуры в положение «Показания расходомера РМ2».

19. Измерить расход насоса Q_H (л/мин), для этого нажать и удерживать кнопку на счетчике импульсов СИ-8, входящем в состав блока контрольно-измерительной аппаратуры.

20. Измерить давление $p_{дд2}$ (кПа) на выходе насоса Н2 по показаниям датчика давления ДД2 (табло «Давление на выходе насоса 2»).

21. Поворачивая рукоятку задвижки 35, установить требуемую величину давления $p_{дд2}$ на выходе насоса Н2 по показаниям ДД2.

22. Повторять действия по пп. 6–8 для всех значений давления $p_{дд2}$ из таблицы 16.

23. Выключить питание системы управления.

24. Выключить питание насоса Н2.

Б.2. Порядок проведения опытов для исследования характеристик насосов при последовательном их соединении

1. Убедиться в том, что кран КР1 открыт.

2. Закрыть краны КР2, КР4, КР5 и КР8, КР9.

3. Полностью закрыть задвижку 35.

4. Открыть кран КР3.

5. Схематично последовательный способ включения насосов Н1 и Н2 представлен на рис. 40. Тонкими линиями на нем обозначены перекрытые при помощи кранов трубопроводы

6. Включить питание системы управления.

7. Повернуть переключатель насоса Н1 в среднее положение (И) и включить питание насоса переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

8. Выждать несколько секунд, убедиться, что показания на табло «Давление на выходе насоса 1» и «Давление на выходе насоса 2» выше 30...40 кПа.

9. Включить питание насоса Н2.

10. Установить переключатель на блоке контрольно-измерительной аппаратуры в положение «Показания расходомера РМ2».

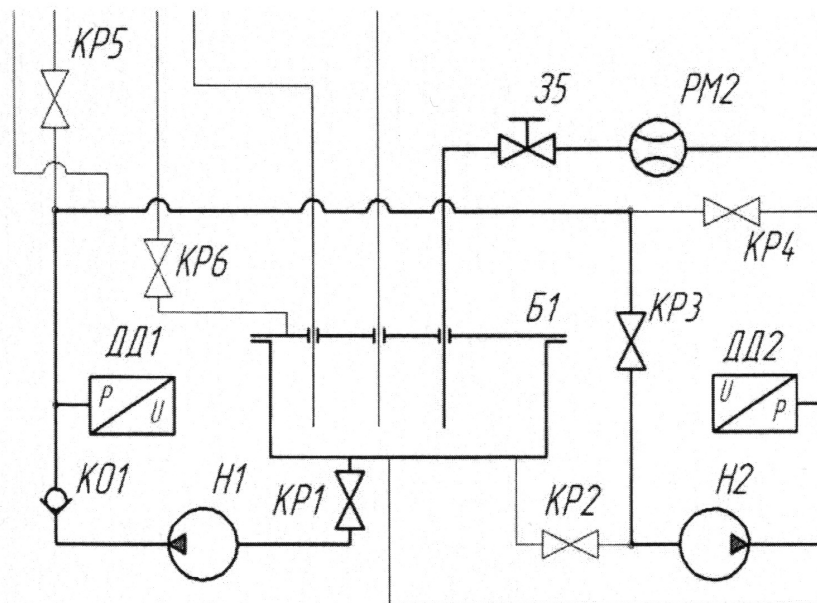


Рис. 40. Схема последовательного включения насосов Н1 и Н2

11. Измерить расход насосной станции Q_n (л/мин). Для этого нажать и удерживать кнопку на счетчике импульсов СИ-8, входящем в состав блока контрольно-измерительной аппаратуры. Записать в таблицу 17.

12. Измерить давления $p_{дд1}$ (кПа) и $p_{дд2}$ (кПа), по показаниям датчиков давления ДД1 и ДД2 (табло «Давление на выходе насоса 1» и «Давление на выходе насоса 2»). Записать в таблицу 17.

13. Поворачивая рукоятку задвижки 35, установить требуемую (заданную преподавателем) величину давления $p_{дд2}$ на выходе насоса Н2 по показаниям ДД2.

14. Повторять действия по пп. 11–13 для всех значений давления $p_{дд2}$ из таблицы 17.

15. Выключить питание системы управления.

16. Выключить питание насоса Н2. Только после этого выключить питание насоса Н1.

17. Открыть кран КР2.

Б.3. Порядок проведения опытов для исследования характеристик насосов при их параллельном соединении

1. Убедиться в том, что краны КР1, КР2 открыты.

2. Полностью закрыть задвижку З5 и краны КР3, КР5, КР8, КР9.

3. Кран КР4 открыть.

4. Схематично параллельный способ включения насосов Н1 и Н2 представлен на рис. 41. Тонкими линиями на нем обозначены перекрытые при помощи кранов трубопроводы.

5. Включить питание системы управления.

6. Повернуть переключатели насосов Н1 и Н2 в среднее положение (II) и включить питание насосов переключением соответствующих тумблеров на блоке управления.

7. Установить переключатель на блоке контрольно-измерительной аппаратуры в положение «Показания расходомера РМ2».

8. Измерить расход насосной станции Q_n (л/мин), для этого нажать и удерживать кнопку на счетчике импульсов СИ-8, входящем в состав блока контрольно-измерительной аппаратуры.

9. Измерить давления $p_{дд1}$ (кПа) и $p_{дд2}$ (кПа) по показаниям датчиков давления ДД1 и ДД2 (цифровые индикаторы «Давление на выходе насоса 1» и «Давление на выходе насоса 2»).

10. Поворачивая рукоятку задвижки З5, установить требуемую (заданную преподавателем) величину давления $p_{дд2}$ на выходе насоса Н2 по показаниям ДД2.

11. Повторить действия по пп. 8–10 для всех значений давления $p_{дд2}$, из таблицы 18.

12. Выключить питание системы управления.

13. Выключить питание насосов Н1 и Н2.

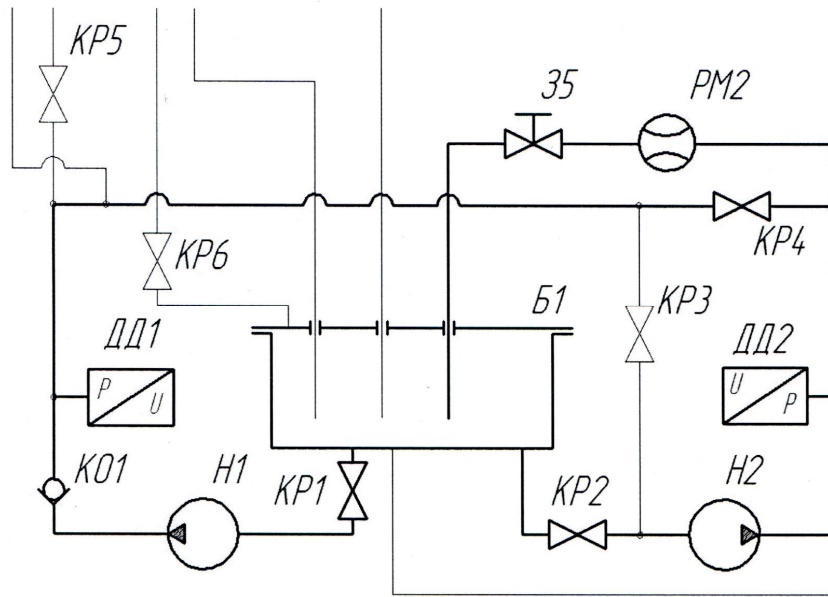


Рис. 41. Схема параллельного включения насосов Н1 и Н2

В.1. Обработка экспериментальных данных для определения характеристик насосов

1. Рассчитать напор, создаваемый насосами:

$$H_{Н1} = H_{п1} - H_0,$$

$$H_{Н2} = H_{п2} - H_0,$$

где $H_{п1} = p_{дд1}/(\rho g)$ и $H_{п2} = p_{дд2}/(\rho g)$ – пьезометрические напоры на выходе насосов Н1 и Н2, м; H_0 – высота всасывания насосов Н1 и Н2, м; $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность рабочей жидкости (воды). Здесь $p_{дд1}$ и $p_{дд2}$ подставляются в паскалях (Па).

2. Построить графики зависимости $H_{Н1} = f(Q_H)$ и $H_{Н2} = f(Q_H)$. Путем графического сложения данных характеристик получить последовательное $H_{посл}$ и параллельное $H_{пар}$ соединение насосов Н1 и Н2. Характеристики насосов складываются аналогично характеристикам трубопроводов (см. лабораторную работу №5).

3. Сделать выводы.

Таблица 15. Результаты замеров и расчетов для насоса Н1

Параметр	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
Давление на выходе насоса $p_{дд1}$, кПа						
Подача насоса Q_H , л/мин						
Напор насоса $H_{Н1}$, м						

Таблица 16. Результаты замеров и расчетов для насоса Н2

Параметр	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
Давление $p_{д2}$ на выходе насоса, кПа						
Подача насоса Q_H , л/мин						
Напор насоса H_{H2} , м						

В.2. Обработка экспериментальных данных исследования характеристик насосов при последовательном их соединении

1. Рассчитать напоры, создаваемые насосами, так же, как в пункте 1 подраздела В.1, а также напор насосной станции

$$H_{нс} = H_{H2} + H_{H1}.$$

Результаты расчетов записать в таблицу 17.

2. Построить графики зависимостей $H_{H1} = f(Q_H)$, $H_{H2} = f(Q_H)$ и $H_{нс} = f(Q_H)$ на одной координатной плоскости (пример на рис. 42). Сравнить $H_{нс} = f(Q_H)$ с характеристикой $H_{посл}$, полученной по результатам табл. 15 и 16 (на графике по пункту 2 подраздела В.1).

3. Сделать выводы.

Таблица 17. Результаты замеров и расчетов для последовательной работы насосов

Параметр	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
Давление $p_{д2}$ на выходе насоса Н2, кПа						
Давление $p_{д1}$ на выходе насоса Н1, кПа						
Подача насосов Q_H , л/мин						
Напор первого насоса H_{H1} , м						
Напор второго насоса H_{H2} , м						
Напор насосной станции $H_{нс}$, м						

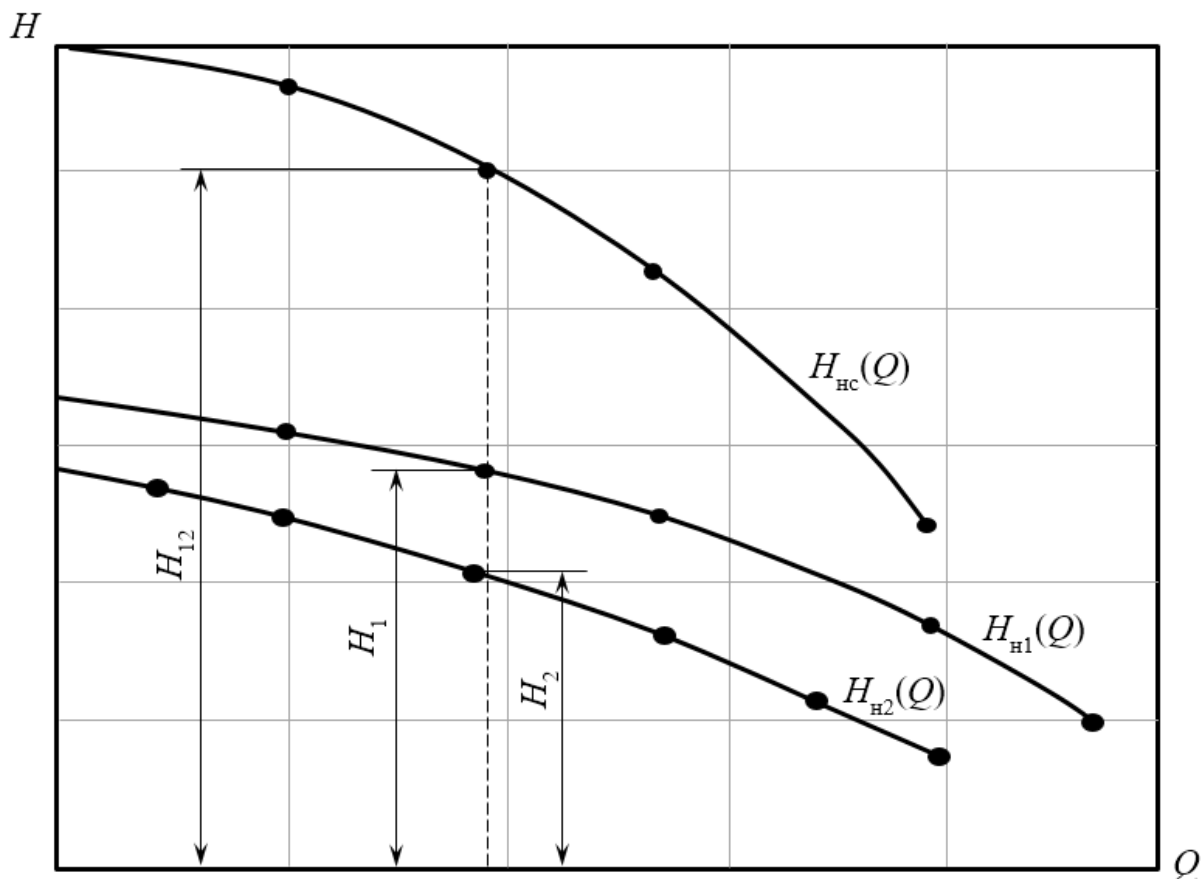


Рис. 42. Пример экспериментальной характеристики последовательной работы насосов

В.3. Обработка экспериментальных данных исследования характеристик насосов при их параллельном соединении

1. Рассчитать напоры, создаваемые насосами, так же, как в пункте 1 подраздела В.1, а также напор, создаваемый насосной станцией

$$H_{\text{нс}} = H_{\text{п2}} - H_0,$$

где H_0 – высота всасывания насосов Н1 и Н2, м; $H_{\text{п2}} = p_{\text{дд2}}/(\rho g)$ – пьезометрический напор на выходе насоса Н2.

Результаты расчетов записать в таблицу 18.

2. Построить графики зависимостей $H_{\text{н1}} = f(Q_{\text{н}})$, $H_{\text{н2}} = f(Q_{\text{н}})$ и $H_{\text{нс}} = f(Q_{\text{н}})$ на одной координатной плоскости (пример на рис. 43). Сравнить $H_{\text{нс}} = f(Q_{\text{н}})$ с характеристикой $H_{\text{пар}}$, полученной по результатам табл. 15 и 16 (на графике по пункту 2 подраздела В.1).

3. Сделать выводы.

Таблица 18. Результаты замеров и расчетов для параллельной работы насосов

Параметр	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
Давление $p_{\text{дд}2}$ на выходе насоса Н2, кПа						
Давление $p_{\text{дд}1}$ на выходе насоса Н1, кПа						
Подача $Q_{\text{н}}$ насосной станции, л/мин						
Напор 1-го насоса $H_{\text{н}1}$, м						
Напор 2-го насоса $H_{\text{н}2}$, м						
Напор насосной станции $H_{\text{нс}}$, м						

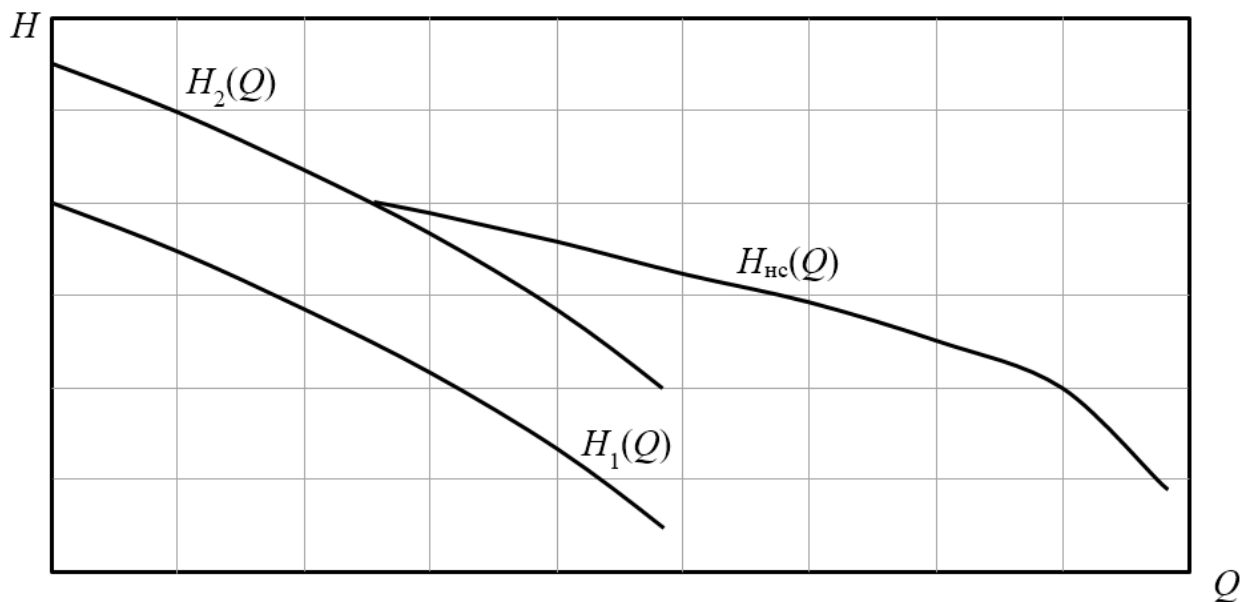


Рис. 43. Пример экспериментальной характеристики при параллельной работе насосов

Перечень вопросов для подготовки
к защите лабораторной работы №7

1. Как выглядит уравнение характеристики сети?
2. Что такое геометрические высоты всасывания и нагнетания?
3. Что такое режимная точка работы насосной установки?
4. Каким образом можно изменить характеристику сети?
5. Почему не рекомендуется производить регулирование режима работы насосной установки с помощью вентиля во всасывающем трубопроводе?
6. Что такое кавитация? Чем она опасна?
7. Что такое высота всасывания? Чем она ограничивается?
8. Назовите способы изменения характеристики насоса.
9. Может ли характеристика сети выходить из отрицательной области графика ($Q-H$)? Если да, то приведите примеры таких насосных установок.
10. Что такое помпаж?
11. Каким образом производится выбор насоса?
12. Зачем устанавливают насосы последовательно и параллельно?

Лабораторная работа № 8

«Изучение гидравлических сопротивлений потерь в промышленных элементах водопроводных систем тройник, отвод»

Цель работы – изучение местных гидравлических потерь энергии при течении через элементы трубопровода (отвод и тройник).

Теоретические положения

В отводе (колени или изгиб трубопровода) в результате искривления потока на вогнутой стороне внутренней поверхности трубы давление больше, чем на выпуклой (рис. 44). В связи с этим жидкость движется с различной скоростью, что способствует отрыву потока от стенок и приводит сначала к сужению струи, а затем (далее по течению) – к ее расширению; при этом возникают значительные потери напора.

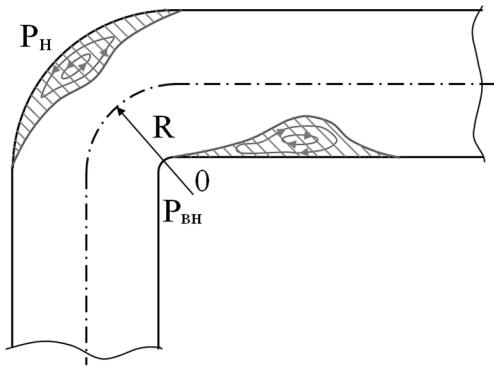


Рис. 44. Движение жидкости на повороте трубопровода

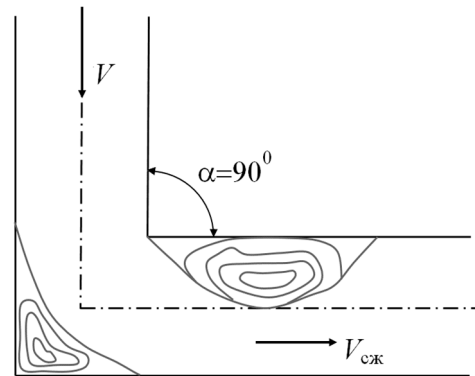


Рис. 45. Внезапный (резкий) поворот трубы

При внезапном повороте трубы (рис. 45), который называется также простым или острым коленом (незамкнутое колено), потери напора особенно велики. Их можно оценить, применив формулу Борда:

$$h = \frac{V^2}{2g} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2.$$

Таким образом, коэффициент местного сопротивления колена $\xi_{\text{кол}} = (1/\varepsilon - 1)^2$. Коэффициент сжатия струи ε зависит от угла поворота α . Так, при $\alpha = 90^\circ$ (прямоугольное колено) $\varepsilon = 0,5$, т. е. ширина вихря составляет около половины ширины трубы. Для рассматриваемого случая $\xi_{90} = (1/0,5 - 1)^2 = 1$, что хорошо согласуется с опытными данными.

Опыты показывают, что значение сопротивления резкого поворота растет с увеличением коэффициента гидравлического трения λ потока, подходящего к повороту, как это видно из формулы $\xi = 1,1 + 2000(10\lambda)^8$. Для других значений угла поворота коэффициент сопротивления определяется $\xi_\alpha = \xi_{90}(1 - \cos \alpha)$.

При плавном повороте трубы (закругленное колено, отвод) вихреобразования уменьшаются (рис. 46) и потери напора будут значительно меньше. Коэффициент сопротивления плавного поворота $\xi_{\text{пл}}$ зависит от угла поворота α , а также от отношения радиуса закругления к диаметру трубы (R/d) и коэффициента гидравлического трения λ , т. е. $\xi_{\text{пл}} = f(\alpha, R/d, \lambda)$.

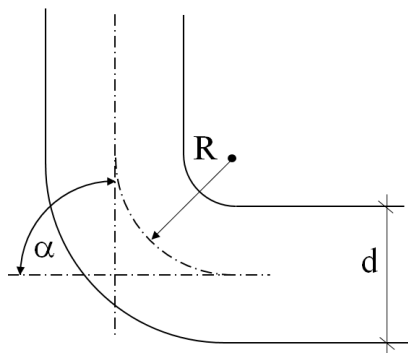


Рис. 46. Закругленное колено

Для отводов круглого сечения с углом $\alpha = 90^\circ$ значение $\xi_{\text{пл}}$ определяется формулой

$$\xi_{90}^{\text{пл}} = [0,2 + 0,001(100\lambda)^8] \sqrt{d/R}.$$

При повороте на любой угол α можно приблизительно принимать $\xi_{\alpha}^{\text{пл}} = \xi_{90}^{\text{пл}} b$ (где b – коэффициент, зависящий от угла поворота).

Потери напора в тройниках.

Тройником называется элемент трубопровода, в котором происходит слияние (соединение) или разделение (деление) потока. Движение жидкости в тройниках является примером движения жидкости с переменным по пути расходом, другим примером служит движение в дырчатых трубах.

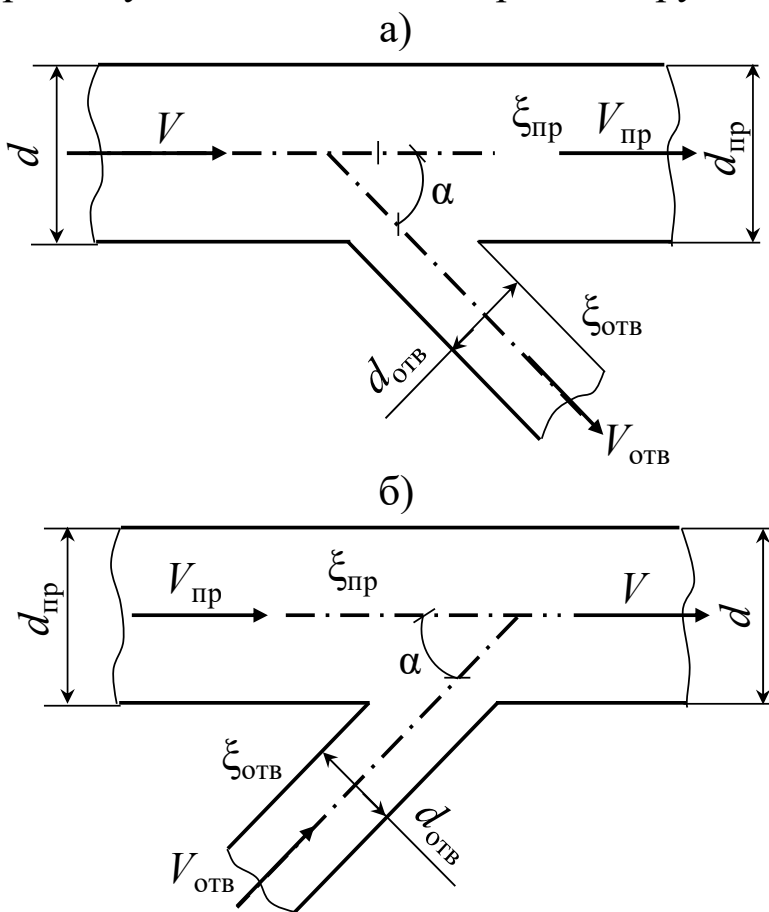


Рис. 47. Тройники:

а) – нагнетательный; б) – всасывающий

Тройник, служащий для деления потока, называется нагнетательным (рис. 47, а), а для соединения потоков – всасывающим (рис. 47, б). При гидравлическом расчете тройников следует различать потери напора на проход (и соответствующий им коэффициент сопротивления), когда течение рассматривается в направлении потока, и потери напора на ответвлении (и соответствующий им коэффициент сопротивления), когда рассматривается течение, отделяемое от потока или соединяемое с ним. Каждый из

коэффициентов сопротивления можно относить как к скорости суммарного потока (т. е. потока перед его делением или после соединения), так и к скорости потока в ответвлении и, наконец, к скорости проходящего потока (т. е. после ответвления или до соединения). При использовании таблиц и справочников всегда нужно обращать внимание на то, к какой скорости отнесен рассматриваемый коэффициент сопротивления.

Условимся значения всех коэффициентов относить к скоростному напору, соответствующему суммарному расходу Q до ответвления (при делении потока) или суммарному расходу Q' после ответвления (при соединении потоков).

Введем следующие обозначения: Q_0 и Q'_0 – расходы в ответвлении при делении и соединении потоков; $Q_{пр}$ и $Q'_{пр}$ – расход проходящего потока (т. е. после ответвления или до соединения). Коэффициенты сопротивления, относящиеся к ответвлению, обозначим через ξ_0 и ξ'_0 , относящиеся к прямому направлению – $\xi_{пр}$ и $\xi'_{пр}$.

При делении потока (рис. 48) рассмотрим три случая:

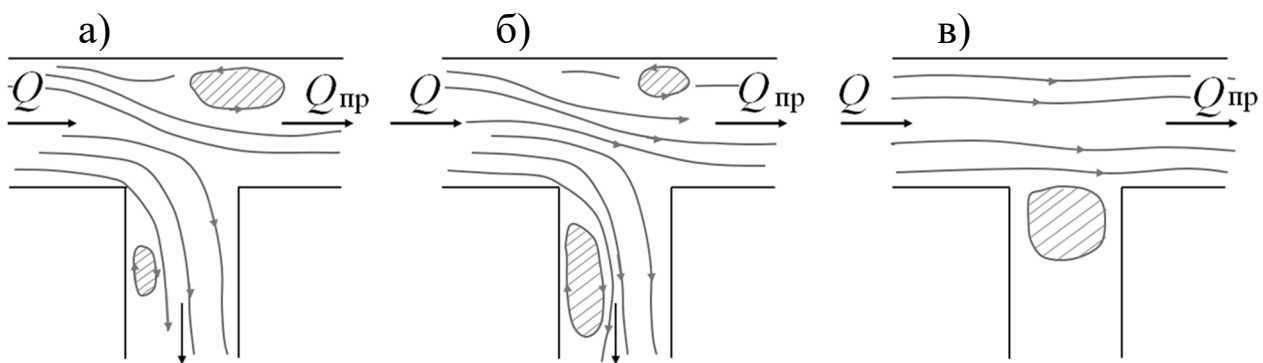


Рис. 48. Схема течения при делении потока

1) если $Q_0 \gg Q_{пр}$, т. е. расход через ответвление значительно превышает расход на проход, то в ответвлении возникает вихрь (аналогично вихреобразованию в колене); другой вихрь образуется на проходном участке непосредственно после ответвления (за счет диффузорного эффекта); оба вихря вызывают местное сжатие потока с последующим его расширением (рис. 48, а);

2) если $Q_0 \ll Q_{пр}$, т. е. расход через ответвление значительно меньше расхода на проход, то вихрь на проходном участке ослабевает (рис. 48, б);

3) если $Q_0 = 0$, т. е. поток через ответвление не поступает, то в ответвлении возникает вихрь, являющийся причиной местных потерь напора на проход; следовательно, и в этом случае, несмотря на отсутствие расхода в ответвлении, нет полной идентичности с движением жидкости по прямому участку трубопровода (рис. 48, в).

Таким образом, потери напора в тройнике в случае разделения потока складываются в основном из потерь на внезапное расширение после сжатия потока (как на прямом участке, так и в ответвлении).

Потери напора в ответвлении можно приближенно оценить по формуле

$$h_0 = K_0(1 - \cos \alpha)V^2 / 2g \text{ или } \xi_0 = K_0(1 - \cos \alpha),$$

где γ – угол ответвления относительно оси основного потока; K_0 – опытный коэффициент, зависящий от отношения $V_{\text{отв}}/V$ и геометрии тройника.

При соединении потоков основные потери возникают в результате перемешивания сливающихся потоков, а также поджатия потока с его последующим расширением.

Коэффициенты сопротивления на проход и на ответвление, отнесенные к скорости потока его соединения, можно приблизительно оценить по формулам:

$$\xi'_{\text{пр}} = \xi'_0 + K' [(V'_{\text{пр}} / V')^2 - (V'_0 / V')^2],$$

$$\xi'_0 = K' \left[1 + \left(\frac{V'_0}{V'} \right)^2 - 2 \frac{V'_0}{V'} \frac{Q'_0}{Q'} \cos \gamma - 2 \frac{V'_{\text{пр}}}{V'} \frac{Q'_{\text{пр}}}{Q'} \right],$$

где K' – опытный коэффициент, зависящий в основном от отношения $(d'_{\text{отв}}/d)^2$.

Таким образом, значения коэффициентов местных сопротивлений, как отнесенных к направлению ответвления, так и к направлению главной магистрали, могут зависеть от геометрической формы тройника (от угла соединения, от соотношения диаметров трубопроводов, образующих тройник, от направления потока) и от соотношения расходов жидкости, проходящих через магистраль и через ответвления, т. е.

$$\xi = f(\alpha, (d'_{\text{отв}} / d)^2, Q'_{\text{отв}} / Q) \text{ и } \xi' = f(\alpha, (d'_{\text{отв}} / d')^2, Q'_0 / Q').$$

Экспериментальная часть

А. Лабораторная установка

Конструкция установки (см. рис. 1 и рис. 2). Исследуются элементы пластикового трубопровода (отвод и тройник) с диаметром условного прохода $d = 16$ мм.

Б. Порядок выполнения опытов

1. Полностью закрыть задвижки 31, 32, 34, 36, 37 и краны КР3, КР4, КР8. Краны КР6, КР7, КР9 полностью открыть.
2. Поворачивая рукоятку крана КР9, установить требуемую величину давления $p_{н1}$ на выходе насоса Н1 по показаниям ДД1.
3. Закрыть кран КР7. Измерить время Δt заполнения объема W жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1. Записать значения в таблицу 19. Открыть кран КР7.
4. Записать в таблицы 19 и 20 показания пьезометров №18, 19, 20, 21. При отсутствии жидкости в одной из трубок дифференциального пьезометра спустить часть воздуха через установленный сверху дроссель.
5. Повторить действия, описанные в пунктах 3, 4 и 5, выполнить замеры для других значений давления $p_{н1}$, соответствующих таблице 19. Результаты замеров записать в табл. 19 и 20.
6. Закрыть кран КР5.
7. Выключить питание насоса Н1.

В. Обработка экспериментальных данных

1. Рассчитать расход воды и записать значения в таблицу

$$Q = W/\Delta t.$$

2. Рассчитать местные потери напора на отводе

$$\Delta h_{90} = H_{п18} - H_{п19}$$

и тройнике

$$\Delta h_{тр} = H_{п20} - H_{п21}.$$

3. Рассчитать среднюю скорость жидкости

$$V = \frac{Q}{S},$$

где $S = \pi d^2 / 4$ – площадь струи на срезе сопла; d – диаметр

трубопровода, мм; Q – расход, мм³/с.

4. Рассчитать критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{Vd}{\nu},$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости, в данной работе принять $\nu = 0,101 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Остальные величины подставлять в соответственных размерностях.

5. Определить коэффициенты сопротивления отвода и тройника.

$$\xi_{90} = \Delta h_{90} / \left(\frac{V^2}{2g} \right), \quad \xi_{тр} = \Delta h_{тр} / \left(\frac{V^2}{2g} \right).$$

6. Построить напорные характеристики отвода и тройника в координатах «подача – напор» $\Delta h = f(Q)$.

7. Построить характеристики элементов трубопровода в координатах «коэффициент сопротивления – критерий Рейнольдса» $\xi = f(Re)$.

8. Сделать выводы.

Таблица 19. Характеристика отвода

№	$p_{н1}$, КПа	W , л	Δt , с	Q , л/с	$H_{п18}$, мм	$H_{п19}$, мм	Δh_{90} , мм	V , мм/с	Re	$\frac{V^2}{2g}$	ξ_{90}
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											

Таблица 20. Характеристика приточного тройника

№	W , л	Δt , с	Q , л/с	$H_{п20}$, мм	$H_{п21}$, мм	$\Delta h_{тр}$, мм	V , мм/с	Re	$\frac{V^2}{2g}$	$\xi_{пр}$
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										

Перечень вопросов для подготовки
к защите лабораторной работы №8

1. За счет чего возникают потери напора в отводе?
2. По какой формуле можно оценить потери напора и коэффициент местного сопротивления колена?
3. Какой тройник называется нагнетательным, и какой всасывающим?
4. По какой формуле можно приблизительно оценить потери напора в ответвлении?
5. От чего могут зависеть значения коэффициентов местных сопротивлений, отнесенных как к направлению ответвления, так и к направлению главной магистрали?
6. Что произойдет, если расход через ответвление значительно превышает расход на проход?
7. Что произойдет, если расход через ответвление значительно меньше расхода на проход?
8. Что произойдет, если поток через ответвление не поступает?

Лабораторная работа № 9

«Тарировка расходомера с электронным выходным сигналом»

Цель работы – сравнение расхода, измеренного по мерной емкости и по счетчику количества жидкости.

Теоретические положения

Для определения параметров потока жидкости, таких как расход Q и давление p , пользуются различными методами и средствами. Рассмотрим некоторые из них.

Измерение давления.

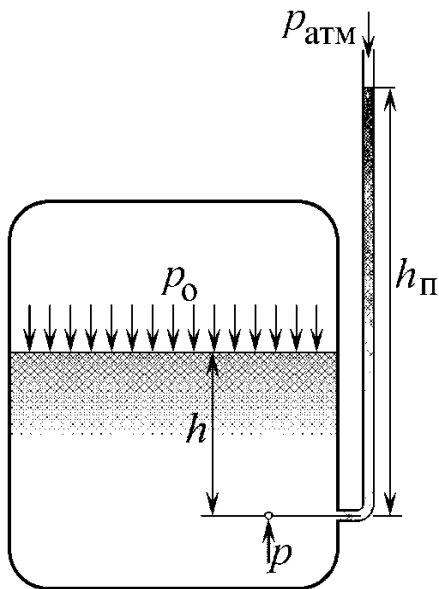


Рис. 49. Измерение давления при помощи пьезометра

Пьезометрическую высоту, соответствующую избыточному давлению, можно определить по *пьезометру*, который представляет собой вертикальную стеклянную трубку (рис. 49). Верхний конец трубки открыт в атмосферу, а нижний присоединен к сосуду, в котором измеряется давление.

Применительно к жидкости, находящейся в пьезометре, можно записать

$$p = p_{\text{атм}} + \rho g h_{\text{п}},$$

где $p = p_0 + \rho g h$ – давление в жидкости на уровне присоединения пьезометра;

$p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление; $h_{\text{п}}$ – показания пьезометра.

Тогда высота подъема жидкости в пьезометре $h_{\text{п}} = \frac{p - p_{\text{атм}}}{\rho g}$,

где $p - p_{\text{атм}} = p_{\text{изб}}$ – избыточное давление на уровне присоединения пьезометра.

Если $p_0 = p_{\text{атм}}$, то пьезометрическая высота для любой точки рассматриваемого объема жидкости равна глубине расположения этой точки.

Если абсолютное давление в жидкости или газе меньше атмосферного, то говорят, что имеет место *разряжение (вакуум)*. За

величину вакуума принимается недостаток до атмосферного давления: $p_{\text{вак}} = p_{\text{атм}} - p$ или $h_{\text{вак}} = \frac{p_{\text{атм}} - p}{\rho g}$.

Простейшим устройством для измерения вакуума может служить U-образная трубка, показанная на рис. 50 в двух вариантах.

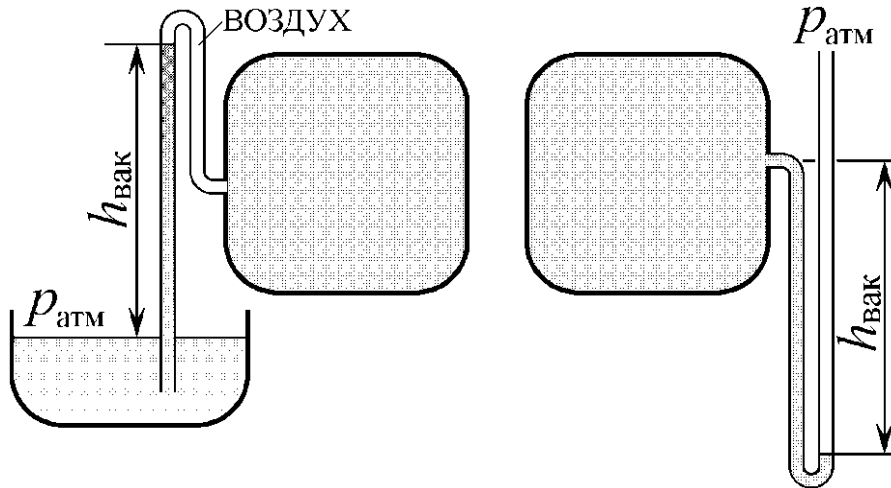


Рис. 50. Схемы измерения вакуума

Помимо пьезометров, для визуального контроля давления используются жидкостные и механические манометры (чаще всего механические). На рис. 51 показаны схемы жидкостных манометров.

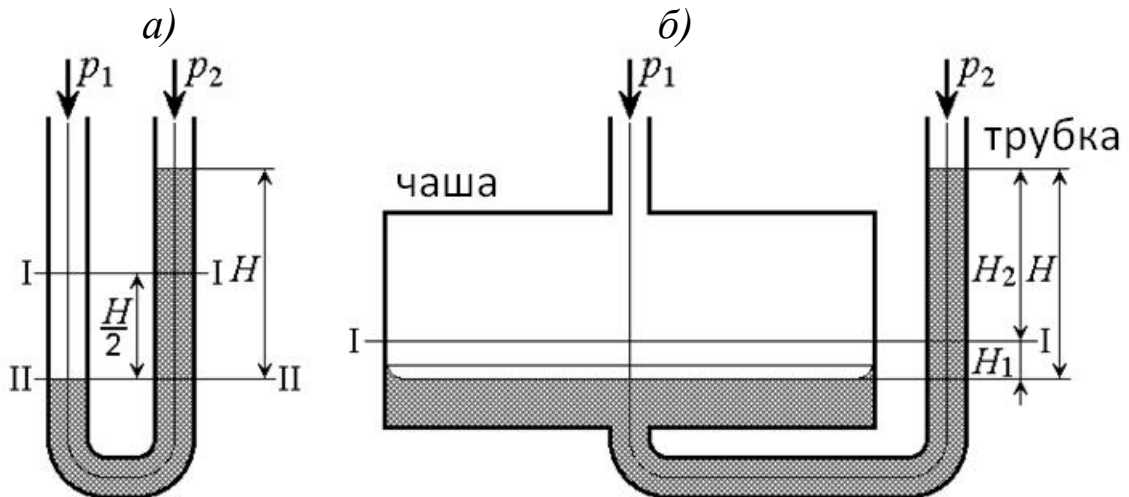


Рис. 51. Схемы жидкостных манометров

Так называемый **U-образный манометр** (рис. 51, а) представляет собой изогнутую стеклянную трубку, содержащую жидкость (чем больше плотность используемой жидкости в манометре, тем большее давление можно измерить).

В соответствии с основным уравнением гидростатики при равенстве давлений p_1 и p_2 свободные поверхности (мениски)

в обеих трубках устанавливаются на уровне I-I. Если $p_1 > p_2$, то разность давлений Δp вызовет подъем жидкости в правой трубке и опускание в левой на высоту $H/2$, а разница между уровнями менисков составит $H = \frac{\Delta p}{\rho g}$.

Чашечный жидкостный манометр (рис. 51, б).

Площадь поперечного сечения чашки $S_ч$ существенно больше, чем у трубки $S_т$. Поэтому под воздействием разности давлений Δp изменение уровня жидкости H_1 в чашке гораздо меньше, чем подъем уровня жидкости H_2 в трубке: $H_1 = H_2 \frac{S_т}{S_ч}$.

Отсюда высота столба жидкости, вес которого уравнивает измеряемое давление, $H = H_1 + H_2 = H_2 \left(1 + \frac{S_т}{S_ч}\right)$, а измеряемая разность давлений $\Delta p = p_1 - p_2 = H_2 \rho g \left(1 + \frac{S_т}{S_ч}\right)$.

Механические манометры. В качестве чувствительного элемента механических манометров чаще всего используют трубку Бурдона (рис. 52, а).

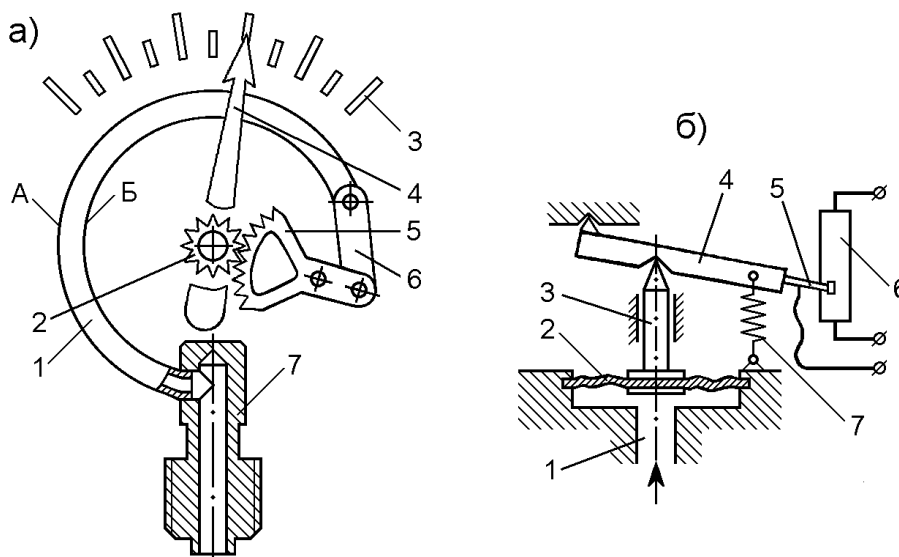


Рис. 52. Схемы манометра (а) и датчика давления (б)

Под действием давления тонкостенная трубка 1 распрямляется. Происходит это вследствие того, что площадь по наружному контуру А изогнутой трубки больше, чем по внутреннему Б. Перемещающийся конец трубки через тягу 6 и зубчатый сектор 5 поворачивает зубчатое колесо 2, жестко связанное со стрелкой 4. Последняя перемещается относительно шкалы 3 с рисками, соответствующими

давлению в контролируемой линии гидросистемы. Рабочая жидкость в трубку 1 подводится через штуцер 7.

На рис. 52, б приведена схема **датчика давления**, который позволяет передать информацию о величине давления на расстояние, например на пульт диспетчера.

Датчик связан с гидролинией, в которой измеряется давление, при помощи канала 1. Воспринимает давление упругая мембрана 2, которая, прогибаясь через толкатель 3, поворачивает рычаг 4. На свободном конце рычага установлен подвижный контакт 5 переменного резистора 6. Смещение контакта 5 приводит к изменению напряжения (потенциометрическая схема) или тока (реостатная схема) на выходных клеммах резистора 6. Возвращает рычаг 4 в исходное положение пружина 7.

Основными метрологическими характеристиками средств измерения давления являются **чувствительность** измерительной системы, которая во многом определяет точность отсчета при измерениях, и **инерционность**.

Измерение расхода.

Для непосредственного измерения расхода используют различные типы расходомеров, массометров и измерительных комплексов.

Расходомеры – технические устройства, предназначенные для измерения массового или объемного расхода. При этом в зависимости от того, для измерения какого (объемного или массового) расхода предназначены расходомеры, их подразделяют на объемные и массовые.

Ротаметр – расходомер постоянного перепада давления с поплавком, перемещающимся внутри измерительной трубки, имеющей переменную площадь сечения по высоте.

На рис. 53 приведена схема **вихревого расходомера**. В 1911 году Карман опубликовал работу, посвященную математическому анализу перемежающегося двойного ряда вихрей, образующегося после тела обтекания в турбулентном потоке жидкости. Важными чертами этого явления являются стабильность и высокая периодичность вихрей. Сейчас эта структура именуется дорожкой Кармана и является одним из наиболее известных и хорошо изученных явлений в гидродинамике.

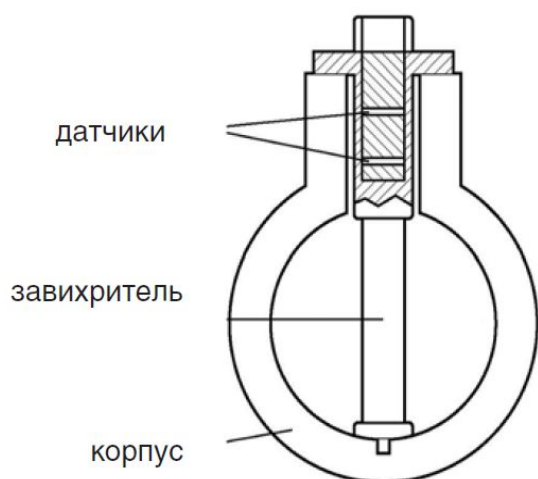


Рис. 53. Схема вихревого расходомера фирмы Yokogawa

Суть эффекта заключается в том, что образование вихрей происходит поочередно на противоположных ребрах тела обтекания. При этом частота образования вихрей прямо пропорциональна скорости потока:

$$f = St (V/d),$$

где f – частота образования вихрей Кармана; St – число Струхаля; V – скорость потока среды; d – ширина тела обтекания.

В вихревых расходомерах используется тот эффект, что в определенном диапазоне чисел Рейнольдса число Струхаля St практически равно константе, благодаря чему получается, что коэффициент преобразования скорости потока в частоту вихрей становится не зависящим ни от плотности, ни от вязкости измеряемой среды и одинаков для всех типов сред.

При том, что все вихревые расходомеры используют в своей основе одно и то же физическое явление, для регистрации вихрей существуют различные принципы.

Остановимся на рассмотрении метода изгибных напряжений. Суть этого принципа заключается в том, что формирование вихрей на теле обтекания приводит к возникновению переменного давления, приложенного к телу обтекания, что обуславливает возникновение переменной силы, которая является причиной возникновения малых изгибных напряжений в теле обтекания с той же самой частотой, что и частота образования вихрей. Эти изгибные напряжения регистрируются пьезодатчиками, расположенными в теле обтекания. Возникающая в момент срыва изгибающая сила регистрируется расположенными внутри него пьезодатчиками.

Достоинствами такого метода измерений являются:

- усреднение потока по сечению трубопровода;
- исключение контакта датчиков с процессом;
- возможность применения ультростойких материалов в качестве вихреобразователя.

Кроме того, такая конструкция позволяет выделять и анализировать не связанные с основным сигналом шумы, благодаря чему эти расходомеры имеют мощные средства дополнительной диагностики.

Помимо прямых измерений, расход жидкости можно определить через косвенные значения скоростного напора

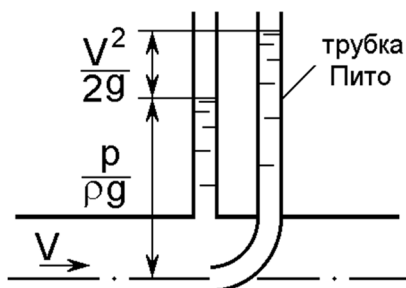


Рис. 54. Определение скоростного напора

$$H_{\text{ск}} = \alpha \frac{V^2}{2g}$$

Скоростной напор можно определить, добавив к пьезометру трубку Пито (рис. 54). Скоростной напор будет являться разностью показаний трубки Пито и пьезометра.

Средняя скорость V будет равна

$$V = \sqrt{\frac{2gH_{\text{ск}}}{\alpha}}$$

где α – коэффициент Кориолиса, характеризующий неравномерность распределения скоростей в потоке.

И через значение средней скорости можно определить объемный расход жидкости

$$Q = VS = 0,25\pi d^2 V,$$

где S – площадь живого сечения трубопровода; d – внутренний диаметр сечения трубы.

Экспериментальная часть

А. Лабораторная установка

Расход жидкости при исследовании характеристик насосов измеряется расходомером РМ 1. При переключении СИ-8 в положение «Показания расходомера РМ1» и при нажатии кнопки на табло счетчика импульсов отображается величина подачи насосной станции.

В качестве расходомера используется счетчик количества воды СГВ-20 с цифровым выходом.

Принцип работы и конструкция лопастного (пластинчатого) ротационного счетчика количества воды показана на рисунке 55. Измеряемая жидкость движется в пространстве, ограниченном цилиндрическими поверхностями корпуса 6 и ротора 8. Внутри ротора расположен неподвижный кулачок 7, на который опираются

четыре ролика 9 с закрепленными на них лопатками 1, 2, 4 и 5.

Давление жидкости, поступающей через входной патрубок на лопасть 5, приводит ротор во вращение, которое передается на счетный указатель. Ролики катятся по кулачку, лопасти при этом поочередно занимают место снаружи и внутри ротора. Таким образом, за полный оборот ротора через счетчик проходит количество жидкости, равное разности объемов цилиндра и ротора.

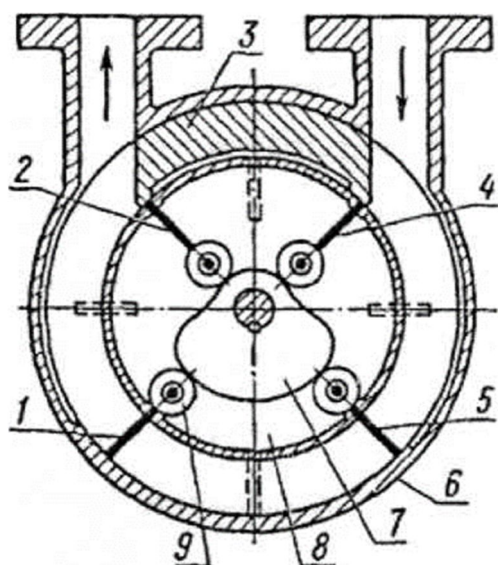


Рис. 55. Счетчик с пластинчатыми лопастями

При изготовлении ротационных счетчиков особое внимание обращают на легкость хода роторов и уменьшение неучитываемых утечек через счетчик. Легкость хода (качественный показатель малого трения в механизме, а, следовательно, и малой потери давления на счетчике) обеспечивается установкой валов ротора на подшипники качения. Уменьшение же утечек достигается тщательной обработкой и взаимной подгонкой сопрягаемых поверхностей. Погрешность показаний ротационных счетчиков обычно не превышает 1% в

пределах 10–100% номинального расхода. Показания счетчика регулируют сменой шестерен в редукторе счетного механизма.

На ротационный счетчик дополнительно установлена оптопара, позволяющая в сочетании со счетчиком импульсов СП8 подсчитывать количество оборотов счетчика в единицу времени. Дополнительные поправочные коэффициенты, задаваемые на приборе СП8, позволяют перевести значение оборотов в значение расхода жидкости, проходящей через счетчик (данные коэффициенты уже установлены производителем стенда).

Б. Порядок выполнения опытов

1. Полностью закрыть задвижки 31, 32, 34, 37, 36 и краны КР3, КР4, КР8. Краны КР7, КР9 полностью открыть.

2. Переключить электронный секундомер в ручной режим управления, обнулить его показания.

3. Закрывать кран КР7. Измерить время Δt заполнения объема W жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1. В случае автоматического измерения контрольный объем фиксирован и составляет $W = 2,7$ л. Записать значение времени в таблицу 21.

4. Измерить давление на выходе насоса Н1. Записать в таблицу значение $p_{н1}$.

5. Открыть кран КР7 и слить жидкость из мерной емкости. Обнулить показания электронного секундомера.

6. Зафиксировать показания расходомера Q_p , (см. лаб. работу №6) и занести в таблицу 21.

7. Выключить насос.

В. Обработка экспериментальных данных

1. Рассчитать расход воды

$$Q = W/\Delta t.$$

2. Вычислить процентное отклонение между измерением расхода прибором Q_p и расчетным значением Q . В зависимости от того, какое значение больше, выбрать соответствующую формулу:

- при $Q > Q_p$

$$\delta Q = (1 - Q/Q_p) \cdot 100\%;$$

- при $Q_p > Q$

$$\delta Q = (1 - Q_p/Q) \cdot 100\%.$$

3. В одной системе координат построить графики зависимости $Q_p = f(p_{н1})$ и $Q = f(p_{н1})$.

4. Сделать выводы.

Таблица 21. Результаты замеров и расчетов для лабораторной работы

№ опыта	W , л	Δt , с	Q , л/с	Q_p , л/с	$p_{н1}$, Па	δQ , %
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

Перечень вопросов для подготовки
к защите лабораторной работы №9

1. Что такое абсолютное, избыточное, вакуумметрическое давление?
2. Может ли вакуумметрическое давление быть больше атмосферного давления; или быть меньше нуля; или равно нулю?
3. Что собой представляют жидкостные манометры? Каковы их конструкции и принцип работы?
4. Объясните конструкцию и принцип действия механического манометра.
5. Объясните конструкцию и принцип действия датчика давления.
6. Как можно определить объемный расход жидкости?
7. Что такое расходомер? Каковы схема и принцип работы вихревого расходомера?
8. Чем отличается расходомер от ротаметра?
9. Принцип работы и конструкция лопастного (пластинчатого) ротационного счетчика количества воды.
10. Объясните суть метода изгибных напряжений.
11. Какие есть достоинства у метода изгибных напряжений?

Список литературы

1. Кузнецов, В. В. Гидромеханика и основы гидравлики (теоретический курс с примерами практических расчетов): учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки (специальностям) «Горное дело» и «Физические процессы горного или нефтегазового производства» / В. В. Кузнецов, К. А. Ананьев; ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева». – Кемерово, 2013. – 266 с.

2. Чугаев, Р. Р. Гидравлика (техническая механика жидкости) [Текст]: учебник для студентов гидротехнических специальностей вузов / Р. Р. Чугаев. – Москва : БАСТЕТ, 2013. – 672 с.

3. Малашкина, В. А. Гидравлика [Текст] : учебное пособие для проведения практ. занятий и самостоятельной работы студентов вузов, обучающихся по специальности «Безопасность технолог. процессов и пр-в» (в горн. пром-сти) / В. А. Малашкина; Моск. гос. горн. ун-т. – Москва : МГГУ, 2006. – 102 с.

4. Гидравлика и гидропривод [Текст] : учебное пособие для вузов / Н. С. Гудилин [и др.]; под общ. ред. И. Л. Пастоева. – Москва : Издательство МГГУ, 1999. – 520 с.

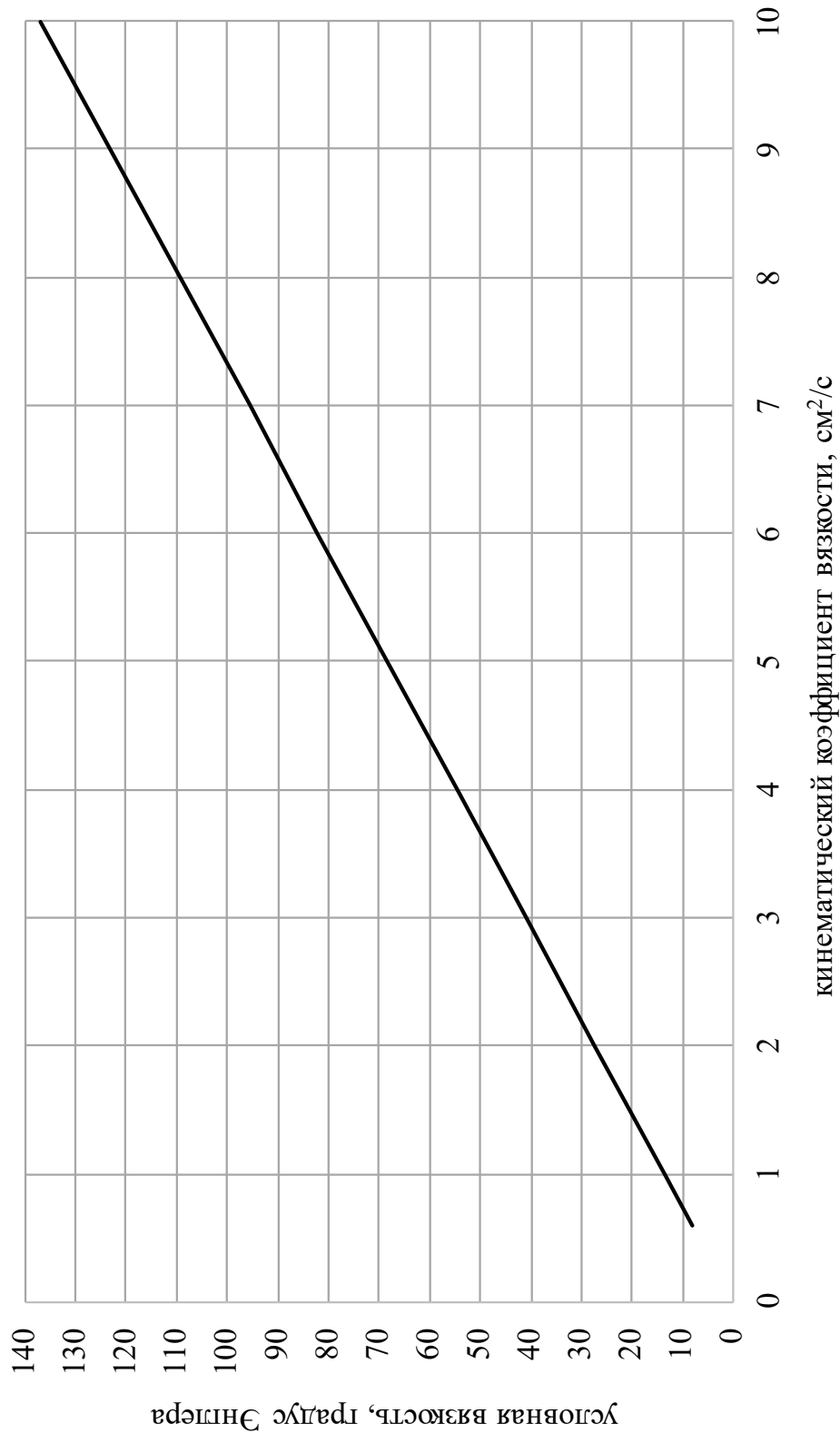
5. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы [Текст] : учебник для студентов машиностроительных вузов / Т. М. Башта [и др.]. – Москва : Альянс, 2011. – 423 с.

6. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности 010500 «Механика» / Л. Г. Лойцянский. – Москва : Дрофа, 2003. – 840 с.

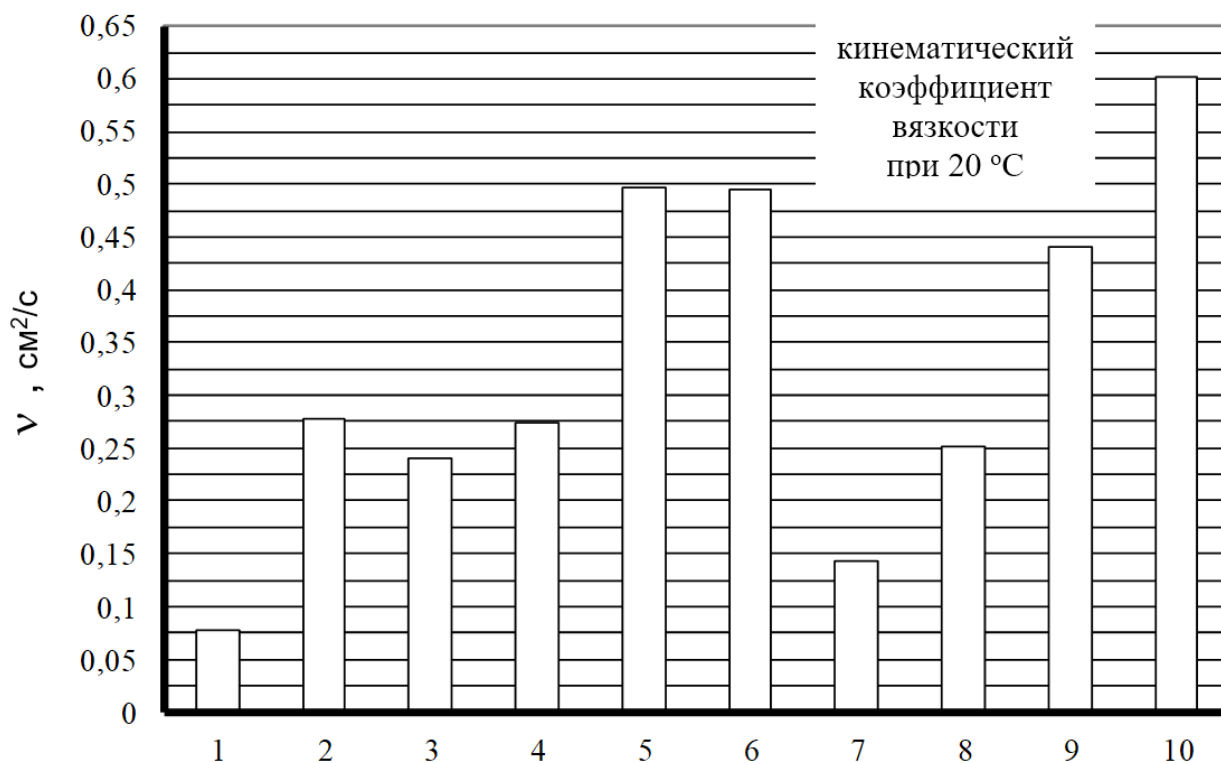
7. Кудинов, В. А. Гидравлика [Текст] : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям подгот. (специальностям) в области техники и технологии / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов. – Москва : Высшая школа, 2007. – 199 с.

8. Альтшуль, А. Д. Гидравлика и аэродинамика. Основы механики жидкости: учебное пособие для вузов / А. Д. Альтшуль, Н. П. Киселев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1975. – 323 с.

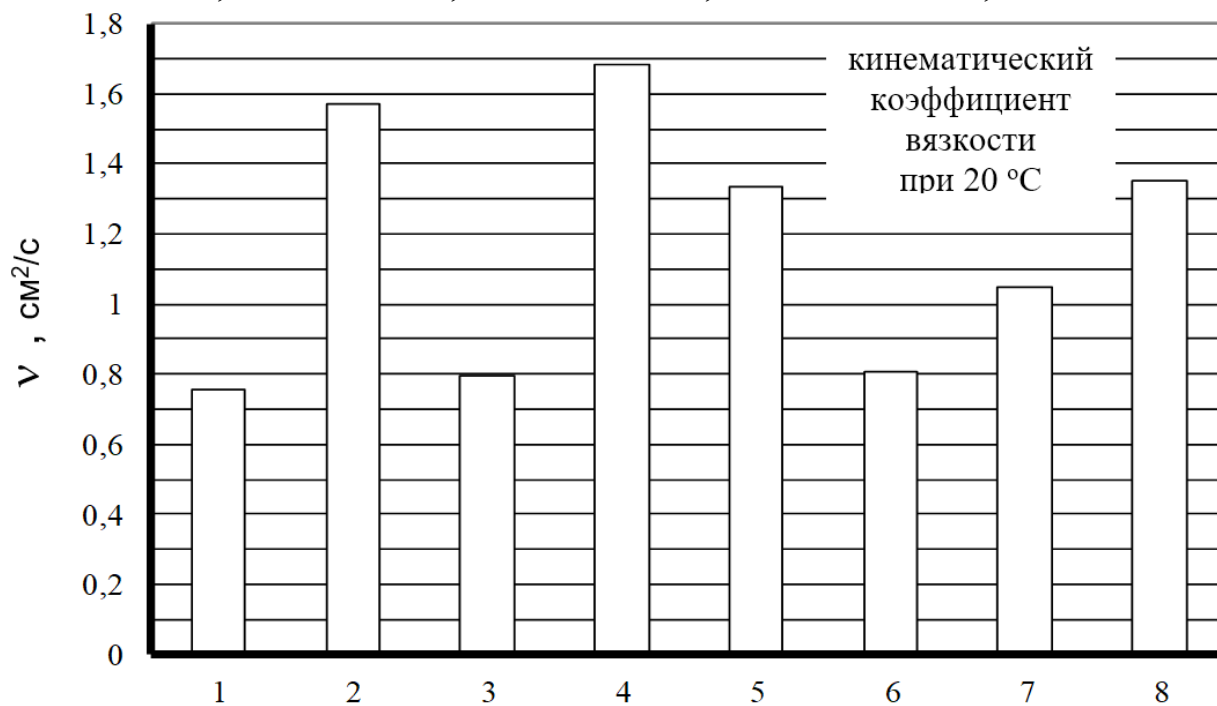
График зависимости $\theta = f(\nu)$ при 20 °С



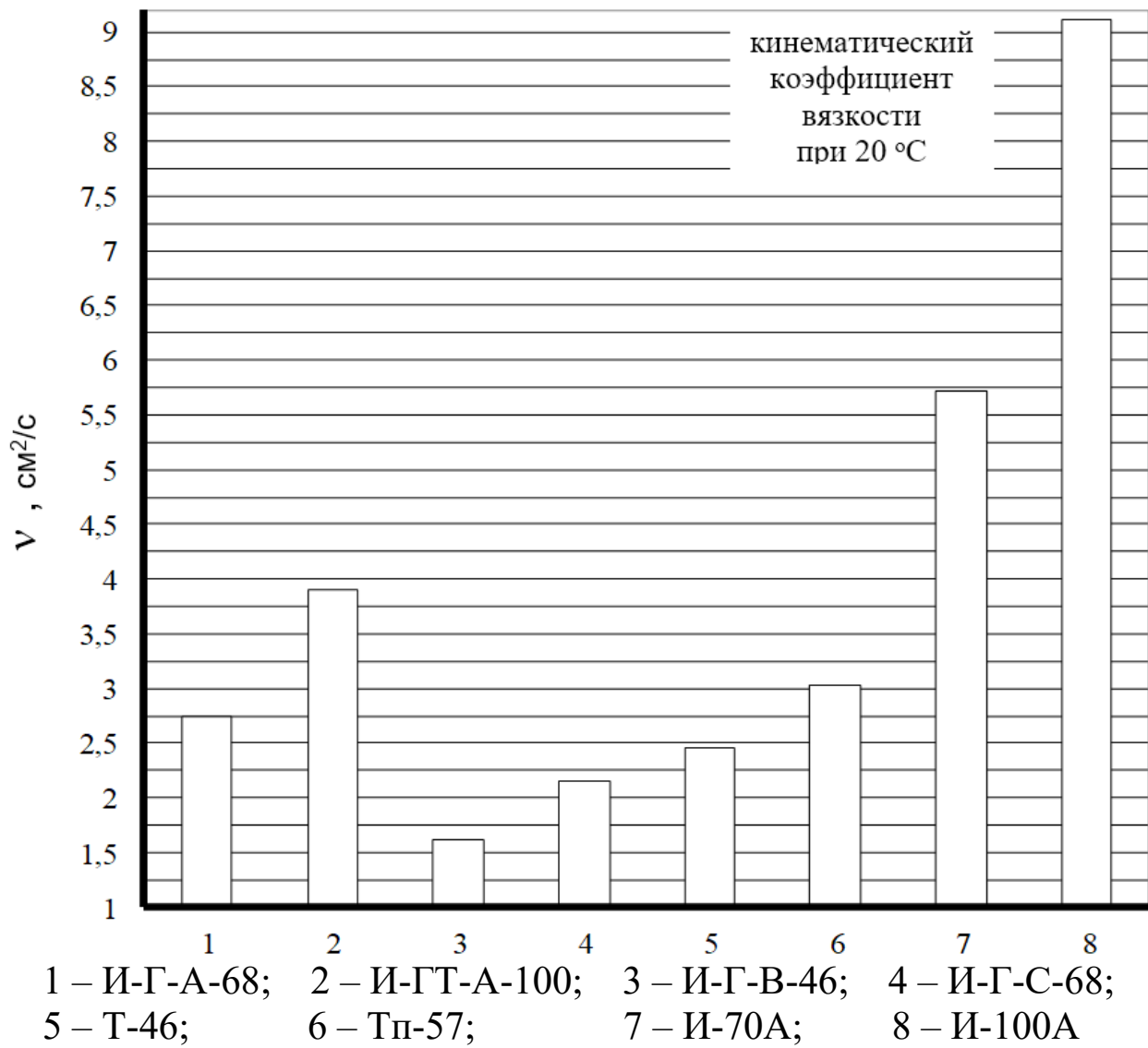
Приложение 2



1 – МГ-5-Б; 2 – МГ-15-А; 3 – МГ-15-В; 4 – МГ-15-Б; 5 – МГ-22-А;
6 – МГ-22-В; 7 – И-Л-А-7; 8 – И-Л-А-10; 9 – И-ЛГ-А-22; 10 – И-Г-С-32



1 – МГ-32-А; 2 – МГ-46-Б; 3 – И-Г-А-32; 4 – И-Г-А-46;
5 – И-Г-С-46; 6 – И-ГНЕ-32; 7 – Тп-22С; 8 – Тп-30



Составители

Кузнецов Владимир Всеволодович

Ананьев Кирилл Алексеевич

Ермаков Александр Николаевич

Дрозденко Юрий Вадимович

**ГИДРОМЕХАНИКА, ГИДРАВЛИКА,
МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА**

Лабораторный практикум

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 27.05.2019. Формат 60×84/16

Бумага офсетная. Уч.-изд. л. 6,7

Тираж 100 экз. Заказ

КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28

Издательский центр УИП КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4 а