

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

**Методическое пособие по выполнению  
лабораторных работ по курсу  
«Энергетическое оборудование паропроизводящей установки»**

Томск 2016

## Оглавление

1	Общие сведения о проведении лабораторных работ.....	4
	Меры предосторожности при работе .....	12
2	Лабораторные работы .....	13
2.1	Изучение методов определения расхода воды. Сравнение ручного и полуавтоматического способов.....	13
2.2	Изучение режима течения жидкости. Визуализация ламинарного и турбулентного режимов течения.....	15
2.3	Исследование характеристик трубопроводов при различных режимах течения от ламинарного до турбулентного в круглой трубе .....	17
2.4	Исследование потерь давления (напора) при течении через местное сопротивление в виде резкого сужения потока. Определение коэффициента гидравлического сопротивления .....	21
2.5	Исследование потерь давления (напора) при течении через местное сопротивление в виде резкого расширения потока. Определение коэффициента гидравлического сопротивления .....	24
2.6	Исследование потерь давления (напора) при течении через местное сопротивление в виде диафрагмы. Определение коэффициента гидравлического сопротивления .....	26
2.7	Исследование потерь давления (напора) при течении через местное сопротивление в виде задвижки. Определение коэффициента гидравлического сопротивления .....	29
2.8	Изучение силового взаимодействия незатопленной струи на механическую преграду .....	33
2.9	Иллюстрация уравнения Бернулли, диаграмма напоров .....	36
2.10	Определение напорных характеристик насоса .....	43
2.11	Исследование характеристик насосов при последовательном их соединении .....	47
2.12	Исследование характеристик насосов при их параллельном соединении ..	50

2.13 Тарировка расходомера с электронным выходным сигналом .....	55
2.14 Изучение гидравлических сопротивлений потерь в промышленных элементах водопроводных систем тройник, отвод.....	56

## 1 Общие сведения о проведении лабораторных работ

Лабораторные работы проводятся в соответствии с данными методическими материалами и руководством по эксплуатации ЭМЖ-09-14ЛР-01 РЭ.

Схема учебного стенда ЭМЖ-09-14ЛР-01 представлена на рисунке 1.1. Расшифровка обозначений приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Состав стенда ЭМЖ-09-14ЛР-01

Обозначение	Наименование
Б1	Бак
Б2	Бак накопительный
Б3	Бак чернильный
Н1, Н2, Н3	Насос циркуляционный центробежный
ЕМ1, ЕМ2	Мерная емкость
Т1, Т2	Простой трубопровод
Т3, Т4	Сложные трубопроводы
КР1...КР13	Кран шаровый
З1...З7	Задвижка клиновья
Д1	Мерная диафрагма
ТР1, ТР2	Тройник
О1	Отвод

Учебный стенд состоит из центробежных насосов, основного, накопительного и чернильного гидробаков, запорной арматуры, измерительных приборов и устройств, опытных трубопроводов и соединительных трубопроводов, размещенных на сварной раме и поддонах.

Учебный стенд предназначен для исследования гидравлических сопротивлений в опытных трубопроводах Т1, Т2, Т3, Т4, мерной диафрагме Д1, задвижке З3, элементах трубной арматуры О1, ТР1, ТР2 (отвод и тройник), а

также для опытного получения рабочих характеристик одного центробежного насоса или двух последовательно и параллельно соединенных насосов. При подаче струйки чернил в поток через трубопровод Т1 производится демонстрация особенностей турбулентного и ламинарного режимов течения.

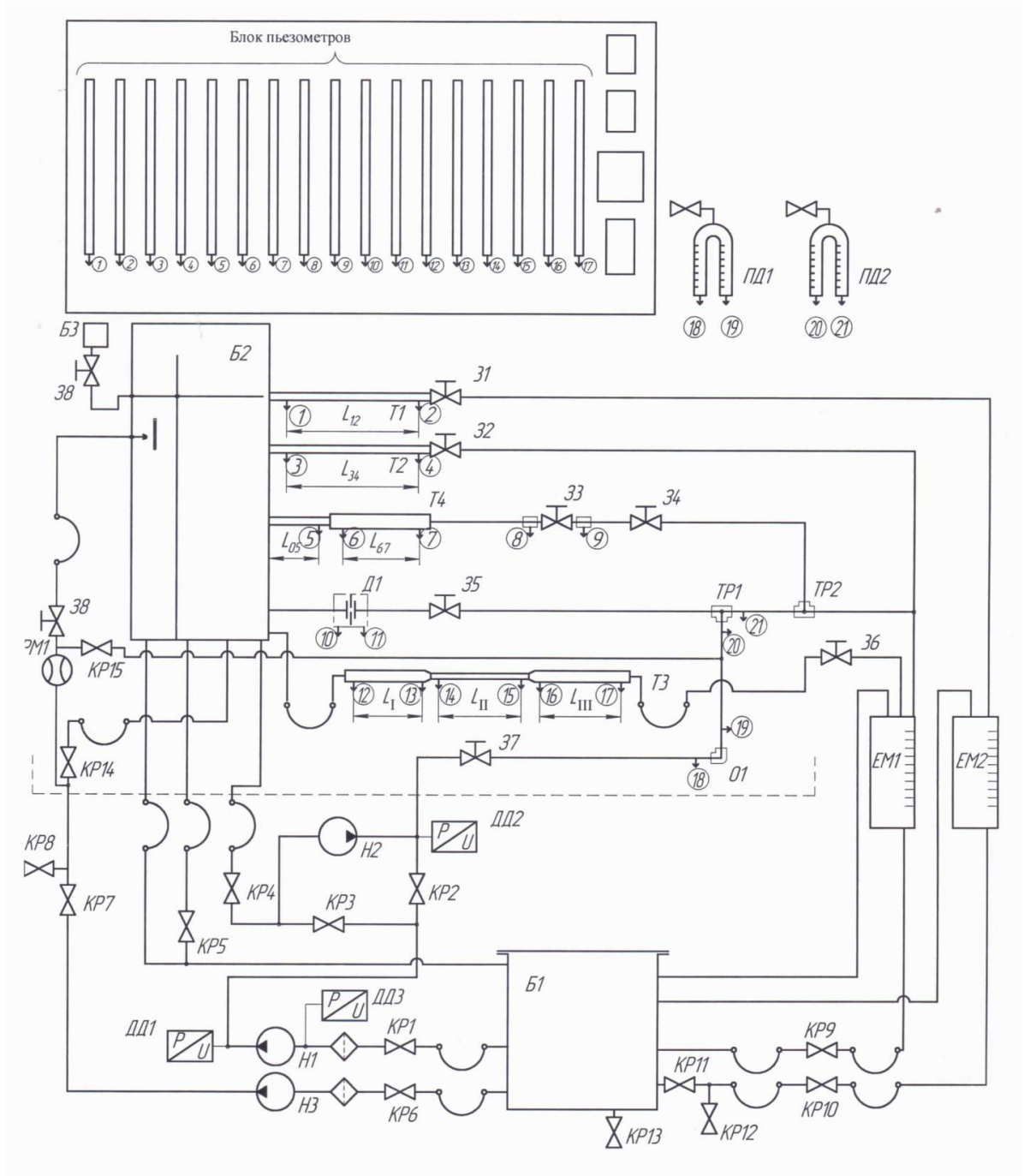


Рисунок 1.1 – Схема учебного стенда экспериментальная механика жидкости (ЭМЖ-09-14ЛР-01):

$L_{12}=800$  мм;  $L_{34}=800$  мм;  $L_{05}=115$  мм;  $L_{67}=170$  мм;

$L_I=210$  мм;  $L_{II}=200$  мм;  $L_{III}=190$  мм

Рабочая жидкость (вода) центробежным насосом НЗ по соединительным трубопроводам из бака Б1 нагнетается в накопительный бак Б2, из которого под постоянным напором поступает к исследуемым элементам (трубопроводам Т1, Т2, Т3, Т4, диафрагме Д1, и к испытываемой задвижке ЗЗ). К исследуемым элементам трубной арматуры (О1, ТР1, ТР2) жидкость из бака Б1 нагнетается насосом Н1. Схематичный вид переключателя насоса WCP 25 представлен на рисунке 1.2. Переключатель имеет три положения, соответствующие трем уровням подачи. Положение переключателя, отмеченное одной рисккой, (крайнее левое) соответствует минимальному уровню производительности насоса. Соответственно положение переключателя, отмеченное тремя рисками, (крайнее правое) соответствует максимальному уровню производительности.

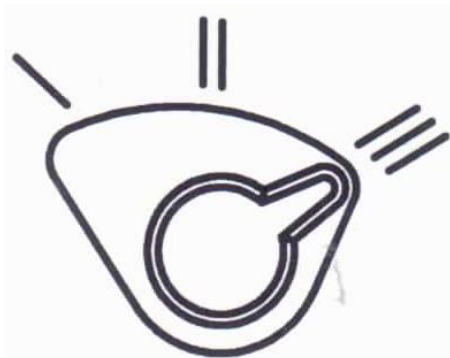


Рисунок 1.2 – Схематичный вид переключателя насоса WCP 25

Накопительный бак представляет собой емкость из оргстекла с вертикальной перегородкой, которая разделяет бак на две секции. Высота перегородки на 50 мм меньше стенок корпуса. При работе стенда жидкость от насоса НЗ постоянно поступает в секцию бака, связанную с трубопроводами. Уровень жидкости в данной напорной секции определяется высотой перегородки. При уровне жидкости меньше высоты перегородки измерения статических напоров по показаниям пьезометров №1-17 на соответствующих лабораторных работах производить нельзя.

Излишек подаваемой насосом НЗ жидкости переливается во вторую секцию и сливается в бак Б1 через гибкий трубопровод. По окончании работы из напорной секции бака Б2 жидкость может быть слита в основной бак

открытием крана КР5. При нормальной работе стенда данный кран должен быть закрыт.

Для того, чтобы избежать перемешивания основной воды с подкрашенной в ходе выполнения лабораторной работы по изучению режимов течения жидкости, предусмотрена возможность подачи жидкости в бак Б2 из внешнего источника (водопровода). Для этого следует подключить трубопровод внешней подачи к крану КР8, закрыть кран КР7 и открыть кран КР8. Подкрашенная жидкость из мерной емкости ЕМ2 должна сливаться в канализацию через открытый кран КР12, кран КР11 в этом случае следует закрыть.

Всасывающими трубопроводами центробежные насосы Н1, Н3 (WCP 25-40G), через шаровые краны КР1, КР6 соединены с баком Б1. Подача жидкости к насосу Н2 может производиться либо из накопительного бака Б2 через открытый кран КР4 (при исследовании параллельного соединения насосов Н1 и Н2), либо из бака Б1 насосом Н1 (при последовательном соединении). При работе комплекса кран КР1 и КР6 всегда должны быть открыты.

Опытные трубопроводы выполнены из прозрачных гладких труб круглого сечения. Сужения и расширения между участками с разными условными проходами трубопровода Т3 (уравнение Бернулли) выполнены в виде конусов для обеспечения безотрывности течения и отсутствия вихрей. Переход между участками трубопровода Т4 выполнен в виде внезапного расширения.

Для регулирования величины подачи жидкости, и порядка включения трубопроводов служат регулируемые задвижки 31, 32, 34, 35, 36, 37. Подача через Т1 и Т2 регулируется задвижками 31 и 32. Для включения в схему и регулировки величины расхода через диафрагму Д1 служит клиновидная задвижка 35, для этих же целей в трубопроводе подвода жидкости к внезапному расширению и исследуемой задвижке используется задвижка 34. Задвижкой 36 регулируется подача через сложный трубопровод Т3.

Переключением шаровых кранов КР2, КР3, КР4 достигается параллельная или последовательная работа насосов Н1 и Н2. Задвижка 37 предназначена для создания подпора в напорном трубопроводе, при снятии характеристик насосов. При параллельном соединении насосов Н1 и Н2 всасывание последнего происходит из накопительного бака через открытый кран КР4 при закрытом КР5.

Расходы жидкости через элементы стенда измеряются объёмным способом, при помощи мерных емкостей ЕМ1 и ЕМ2, время наполнения которых может определяться при помощи электронного секундомера по показаниям поплавковых датчиков. Расход жидкости также может быть определен при помощи визуального замера объема по шкале расположенной на мерной емкости и времени наполнения обычным, запускаемым вручную, секундомером. Для определения времени набора при визуальном

В ручном режиме наиболее удобно осуществлять замеры следующим образом: закрывается кран, установленный на сливе емкости КР9 или КР10. После того, как набирается некоторое количество жидкости, включается секундомер. После набора дополнительного объема жидкости  $V$  секундомер останавливается. Для сброса текущего времени на шкале секундомера используется кнопка «СБРОС ПАРАМЕТРОВ».

Прибор «ОВЕН» запрограммирован для работы в режиме, соответствующем измерению времени (секундомер). Параметры, введенные при программировании прибора, выделены маркером в «Руководстве по эксплуатации счетчика импульсов СИ-8».

При переключении прибора в положение «ЕМ1» или «ЕМ2» осуществляется автоматический отсчет времени заполнения соответствующей емкости. Начало и конец отсчета определяются сигналами с поплавковых датчиков уровня, расположенных в мерных емкостях. При автоматическом замере времени контрольный объем жидкости составляет  $V=2,4$  л. Слив жидкости из мерных емкостей осуществляется открытием шаровых кранов КР9 и КР10. Краны КР11 и КР12 предназначены для обеспечения двух возможных



вариантов слива с ЕМ2. При закрытом КР12 и открытом КР11 слив производится в бак Б1, при закрытом КР11 и открытом КР12.

При переключении СИ-8 в положение «Расход воды по счетчику» при нажатии кнопки на табло отображается величина подачи насоса (показания расходомера РМ1) (включается в состав стенда по согласованию с заказчиком)).

В качестве расходомера используется счетчик количества воды (СГВ-20) с цифровым выходом. Показания счетчика количества воды РМ1 (СГВ-20) используются для измерения расхода жидкости через сопло при исследовании силового воздействия струи жидкости с твердой преградой.

Принцип работы и конструкция лопастного (пластинчатого) ротационного счетчика количества воды показана на рисунке 3. 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.

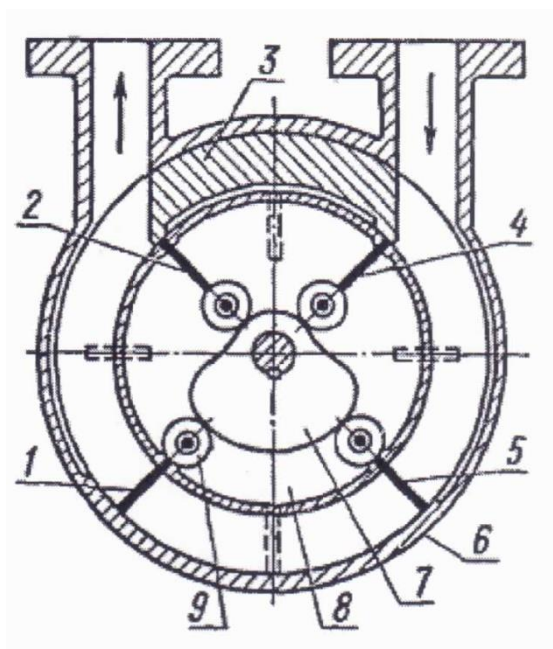


Рисунок 3 – Счетчик с пластинчатыми лопастями

Давление жидкости, поступающей через входной патрубков 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.

При изготовлении ротационных счетчиков особое внимание обращают на легкость хода роторов и уменьшение не учитываемых 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 СИ8 подсчитывать количество оборотов счетчика в единицу времени. Дополнительные поправочные коэффициенты, задаваемые на приборе СИ8, позволяют перевести значение оборотов в значение расхода жидкости, проходящей через счетчик (данные коэффициенты уже установлены производителем стенда).

Для замера перепадов статических напоров на участках трубопроводов в состав стенда включены пьезометры, размещенные на передней панели. Соответствие пьезометра точке отбора можно видеть на схеме (рисунок 1). На той же схеме обозначены дифференциальные пьезометры, которые используются для определения перепада статических напоров на элементах трубопровода (тройники, отвод).

Статическое давление на входе насоса Н1 и на выходе насосов Н1 и Н2 измеряется датчиками давления ДД1, ДД2 и ДД3, результаты замеров с которых отображаются на цифровых табло. Абсолютное давление жидкости отображается в килопаскалях (кПа).

Перед измерением давления (снятием показаний датчиков давления) следует дождаться окончания переходных процессов, возникающих при изменении перекрытий управляющих задвижек. Таким образом, замеры давления следует делать по достижении его постоянного значения.

## **Меры предосторожности при работе**

К работе с учебным стендом допускается персонал после ознакомления с руководством по эксплуатации ЭМЖ-09-14ЛР-01 РЭ и данными указаниями по проведению лабораторных работ.

Одновременно допускается проведение лабораторных работ с группой не более 4 учащихся под наблюдением преподавателя.

Во время работы и транспортировки стенда запрещается прикладывать внешние нагрузки на трубопроводы, пьезометры, измерительные емкости и накопительный бак (в.т.ч. опираться на них или класть посторонние предметы).

Запрещается также сборка-разборка соединений, их подтяжка и переключение гибких трубок пьезометров при работающих насосах или наличии воды в накопительном баке, трубопроводах и мерных емкостях.

Перед включением насосов убедиться в том, что:

1. Задвижки 34 и 35 полностью закрыты (для насосов Н1 и/или Н2).
2. Полностью закрыты краны КР8, КР12 (при отсутствии внешнего подвода и слива жидкости).
3. Кран соответствующего всасывающего трубопровода не перекрыт. Таким образом, при работе краны КР1 и КР6 должны быть постоянно и полностью открыты. Кран КР4 допускается закрывать только при открытом КР3 и работающем насосе Н1 (последовательное включение насосов).
4. Высота уровня воды в баке Б1 достаточна для нормальной работы (по показаниям указателя уровня, который расположен на торцевой стенке бака).
5. Трубопроводы и гибкие рукава не имеют внешних повреждений и смятий.

## **2 Лабораторные работы**

### **2.1 Изучение методов определения расхода воды.**

#### **Сравнение ручного и полуавтоматического способов**

Цель работы: знакомство с объемным способом измерения расхода жидкости.

1. Полностью закрыть задвижки 34, 35 и краны КР3, КР4. Задвижку 37 и краны КР1, КР2, КР9 полностью открыть.
2. Повернуть переключатель насоса Н1 в крайнее правое положение и включить питание переключением соответствующего тумблера на блоке управления.
3. Поворачивая рукоятку задвижки 37 установить запорный элемент примерно в среднее положение.
4. Повернуть переключатель прибора для измерения времени в положение «ЕМ1».
5. Закрывать кран КР9. Измерить время  $\Delta t$  заполнения объема  $V$  жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1. В случае автоматического измерения контрольный объем фиксирован и составляет  $V=2,4$  л. Записать значение времени в таблицу 2.1.1.
6. Открыть кран КР9 и слить жидкость из мерной емкости. Обнулить показания электронного секундомера.
7. Повернуть переключатель прибора для измерения времени в положение «секундомер». Измерить время  $\Delta t$  заполнения объема  $V$  жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1, используя прибор в качестве электронного секундомера, т.е. запуская и останавливая его вручную. Результаты записать в таблицу 2.1.
8. Выключить электропитание насоса.
9. Сделать выводы

Таблица 2.1 – Результаты эксперимента

Способ измерения	V, л	$\Delta t$ , сек	Q, л/с
Автоматический режим	2,4		
Ручной режим			

## **2.2 Изучение режима течения жидкости.**

### **Визуализация ламинарного и турбулентного режимов течения**

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.

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

Данная лабораторная работа выполняется только при условии подключения к крану КР8 автономного источника чистой воды (например, водопровода), а также обеспечении слива с выхода крана КР12 в канализацию.

Кран КР8 перед работой должен быть закрыт.

1. Полностью закрыть задвижки 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38 и краны КР4, КР5, КР7, КР11. Краны КР10, КР12, КР14 полностью открыть.

2. Открыть кран КР8 и дождаться наполнения напорной секции накопительного бака Н2 вплоть до возникновения перелива.

3. Открыть 31 на один оборот до возникновения минимального течения через трубопровод Т1.

4. Частично закрывая кран КР14 добиться минимальной величины перелива из рабочей полости бака, для минимизации начальных возмущений.

5. Частично открыть задвижку 38 вплоть до начала истечения красящей жидкости.

6. При необходимости уменьшать расход через трубопровод, прикрывая задвижку 31, вплоть до возникновения прямой струйки окрашенной жидкости. Отрегулировать подачу красящей жидкости (38) и минимальный перелив (КР14).

7. Закрыть кран КР10. Измерить время  $\Delta t$  заполнения объема  $V$  жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ2. Записать значения в

таблицу 2.2. Открыть кран КР10.

8. Зарисовать вид подкрашенной струйки в потоке в соответствующую графу таблицы 2.2.

9. Приоткрыть задвижку 31 и повторить действия, описанные в пунктах 6, 7 и 8. Результаты занести в табл. 2.2.

10. Повторять действия по пунктам 6, 7, 8 и 9 вплоть до полного открытия 31.

11. Закрыть задвижку 38.

12. Закрыть задвижку 31.

13. Выключить питание насоса НЗ.

14. Рассчитать величину подачи  $Q_H = V/\Delta t$  насоса и записать значения в таблицы 2.2.1.

15. Рассчитать среднюю скорость жидкости  $Q_{cp} = \frac{Q}{A}$  и критерий Рейнольдса  $Re = \frac{\vartheta \cdot d}{\nu}$ . Результаты расчетов занести в таблицу 2.2.1.

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

17. Сделать выводы.

Таблица 2.2 – Результаты эксперимента

№	V, л	$\Delta t$ , с	Q, л/с	$\vartheta$ , м/с	Re, мм	Внешний вид струйки жидкости
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						



## 2.3 Исследование характеристик трубопроводов при различных режимах течения от ламинарного до турбулентного в круглой трубе

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.

Выполняется для трубопровода Т1 (внутренний диаметр  $d_{\text{вн}}=15$  мм) и Т2 (внутренний диаметр  $d_{\text{вн}}=10$  мм).

1. Полностью закрыть задвижки 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38 и краны КР4, КР5, КР8, КР12. Краны КР6, КР7, КР10, КР11, КР14 полностью открыть.

2. Повернуть переключатель насоса НЗ в крайнее правое положение и включить питание переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

3. Дождаться наполнения напорной секции накопительного бака, вплоть до возникновения перелива.

4. Откручивая рукоятку задвижки 31 установить уровень жидкости в пьезометре №1 ( $H_{п1}$ ) в соответствии с таблицей 2.3.1.

5. Записать в таблицу 2.3.1 показания пьезометра №2 для трубопровода Т1 ( $H_{п2}$ ).

6. Закрывать кран КР10. Измерить время  $\Delta t$  заполнения объема  $V$  жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ2. Записать значения в таблицу 2.3.1. Открыть кран КР10.

7. Повторяя работы по п. 4, 5 и 6 выполнять замеры для всего интервала  $H_{п1}$  из таблицы 2.3.1.

8. Закрывать задвижку 31.

9. Откручивая рукоятку задвижки 32 установить уровень жидкости в пьезометре №3 ( $H_{п3}$ ) в соответствии с таблицей 2.3.2.

10. Записать в таблицу 2.3.2 показания пьезометра №4 для трубопровода Т2 ( $H_{п4}$ ).

11. Закрывать кран КР9. Измерить время  $\Delta t$  заполнения объема  $V$  жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1. Записать значения в таблицу 2.3.2. Открыть кран КР9.

12. Отворачивая рукоятку задвижки 32 установить следующую величину пьезометрического напора в сечении 3 (см. таблицу 2.3.2).

13. Повторяя работы по п. 9,10, 11, 12 выполнить замеры для всего интервала  $H_{п3}$ .

14. Закрывать 32.

15. Выключить питание насоса НЗ.

16. Рассчитать величину подачи  $Q_{н}=V/ \Delta t$  насоса и записать значения в таблицы 2.3.1 и 2.3.2.

17. Рассчитать потери напора по длине трубопровода. Учитывая, что расход жидкости при каждом измерении постоянен (т.е. скоростной напор по длине трубопровода неизменен) потери полного напора:

$$\Delta H_{12} = H_1 - H_2 = H_{п1} + \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2g} - H_{п2} - \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2g} = H_{п1} - H_{п2} = \Delta h ,$$

Следовательно:

$\Delta h = H_{п1} - H_{п2}$  ( $\Delta h = H_{п3} - H_{п4}$ ) для всех значений подач. Так как оси трубопроводов расположены в горизонтальной плоскости, геометрические напоры для всех сечений равны, поэтому здесь и далее в записи уравнения Бернулли они не приводятся.

18. Рассчитать среднюю скорость жидкости  $v_{ср} = \frac{Q}{A}$ , величину скоростного напора  $\frac{v^2}{2g}$ , критерий Рейнольдса  $Re = \frac{v_1 \cdot d_1}{\nu}$  (для воды кинематическая вязкость –  $\nu=10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с=1 мм<sup>2</sup>/с). Определить режим течения жидкости в трубопроводе.

19. Из формулы Дарси-Вейсбаха выразить и найти экспериментальную величину коэффициента сопротивления трубопровода  $\xi$ , и коэффициент гидравлического трения  $\lambda$ :

$$\Delta h = \xi \cdot \frac{\rho^2}{2 \cdot g};$$

$$\xi = \lambda \cdot \frac{l}{d_{\text{вн}}}.$$

20. Рассчитать теоретическую величину коэффициента гидравлического трения в предположении турбулентного течения –  $\lambda_{T1}$  (например по формуле Альтшуля:  $\lambda_T = 0,11 \left( \frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$ ) и в предположении ламинарного течения  $\lambda_{T2}$  ( $\lambda_T = \frac{64}{Re}$ ), сравнить с экспериментальной ( $\Delta=0,01$  мм – эквивалентная шероховатость испытываемых труб).

21. Построить характеристики трубопроводов в координатах подача-потребный напор  $H_{\text{потр}} = \Delta h = f(Q_H)$ . Сделать выводы.

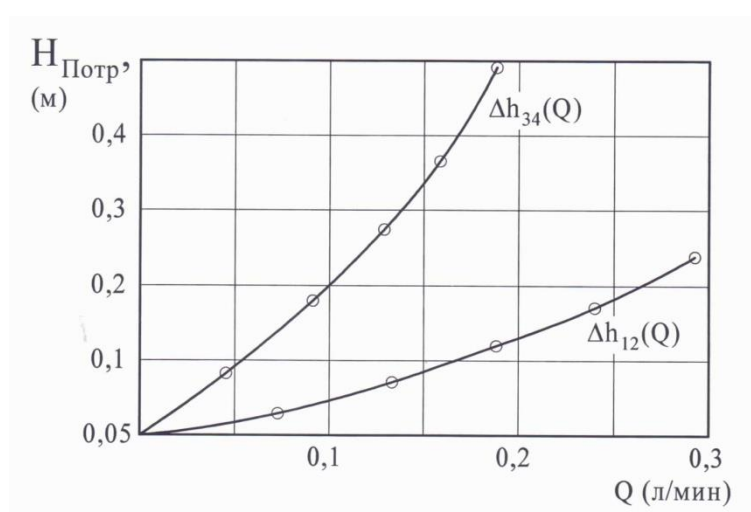


Рисунок 2.3 – Пример экспериментальных характеристик прямых трубопроводов

Таблица 2.3.1

№	V, л	$\Delta t$ , с	Q, л/с	H <sub>п1</sub> , мм	H <sub>п2</sub> , мм	g, мм/с	Re	$\frac{v^2}{2g}$	$\Delta h_{12}$ , мм	$\xi_{\text{э}}$	$\lambda_{\text{э}}$	$\lambda_{\text{т1}}$	$\lambda_{\text{т2}}$
1				900									
2				850									
3				800									
4				750									
5				700									
6				650									
7				600									

Таблица 2.3.2

№	V, л	$\Delta t$ , с	Q, л/с	H <sub>п3</sub> , мм	H <sub>п4</sub> , мм	g, мм/с	Re	$\frac{v^2}{2g}$	$\Delta h_{34}$ , мм	$\xi_{\text{э}}$	$\lambda_{\text{э}}$	$\lambda_{\text{т}}$	$\lambda_{\text{т}}^1$
1				900									
2				850									
3				800									
4				750									
5				700									
6				650									
7				600									

## 2.4 Исследование потерь давления (напора) при течении через местное сопротивление в виде резкого сужения потока. Определение коэффициента гидравлического сопротивления

Цель работы: построение зависимости потерь давления (напора) на резком сужении от расхода жидкости, а также экспериментальное определение коэффициента местного сопротивления.

Диаметр условного прохода подводящего трубопровода  $d_1 = 15$  мм. Диаметр условного прохода отводящего трубопровода  $d_2 = 10$  мм.

1. Полностью закрыть задвижки 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38 и краны КР4, КР5, КР8, КР12. Краны КР6, КР7, КР9, КР14 и задвижку 33 полностью открыть.

2. Повернуть переключатель насоса НЗ в крайнее правое положение и включить питание переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

3. Дождаться наполнения напорной секции накопительного бака, вплоть до возникновения перелива.

4. Откручивая рукоятку задвижки 34 установить уровень жидкости в пьезометре №6 ( $H_{n6}$ ) в соответствии с табл. 2.4.

5. Закрывать кран КР9. Измерить время  $\Delta t$  заполнения объема  $V$  жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1. Записать значения в табл. 2.4. Открыть кран КР9.

6. Записать в таблицу показания пьезометра №7 ( $H_{n7}$ ).

7. Повторить действия по пунктам 4, 5, 6 для всего интервала  $H_{n6}$  из табл. 2.4.

8. Полностью закрыть задвижку 34.

9. Выключить питание насоса НЗ.

10. Рассчитать величины расходов  $Q=V/\Delta t$  и записать значения в таблицу 2.4.

11. Рассчитать параметры потока в трубопроводах:

а) среднюю скорость жидкости:  $\vartheta_1 = \frac{Q}{A_1}$  и  $\vartheta_2 = \frac{Q}{A_2}$  ( $A_1 = \pi d_1^2/4$ ,  $A_2 = \pi d_2^2/4$ );

б) скоростной напор:  $\frac{v_1^2}{2g}$  и  $\frac{v_2^2}{2g}$ ;

в) критерий Рейнольдса:  $Re_1 = \frac{v_1 \cdot d_1}{\nu}$ .

12. Рассчитать местные потери напора на резком сужении:

$$\Delta h_c = H_6 - H_7 = H_{п6} + \frac{\alpha_6 \cdot v_6^2}{2g} - H_{п7} - \frac{\alpha_7 \cdot v_7^2}{2g}.$$

13. Рассчитать потери давления на резком сужении:

$$\Delta p_c = \rho \cdot g \cdot \Delta h_c$$

14. Определить коэффициент сопротивления резкого сужения:

а) приведенный к скоростному напору в малом трубопроводе (отводящей):

$$\xi_{C2} = \Delta h_c / \left( \frac{v_2^2}{2g} \right);$$

б) приведенный к скорости в подводящей трубе:

$$\xi_{C1} = \Delta h_c / \left( \frac{v_1^2}{2g} \right).$$

15. Построить напорную характеристику резкого сужения в координатах подача-потребный напор  $H_{ном1} = \Delta h_c = f(Q)$ .

16. Построить характеристики местного сопротивления (резкого сужения) в координатах коэффициент сопротивления-критерий Рейнольдса  $\xi_{C1} = f(Re_1)$ . Сделать выводы.

Таблица 2.4

№	V, л	$\Delta t$ , сек.	Q, л/с	H <sub>п7</sub> , мм	H <sub>п6</sub> , мм	$\vartheta_1$ , мм/с	$\vartheta_2$ , мм/с	Re <sub>1</sub>	Re <sub>2</sub>	$\frac{\vartheta_1^2}{2g}$	$\frac{\vartheta_2^2}{2g}$	$\Delta h_c$ , мм	$\Delta p_c$ , Па	$\xi_{C1}$	$\xi_{C2}$
1					850										
2					800										
3					750										
4					700										
5					650										
6					600										
7					550										

## 2.5 Исследование потерь давления (напора) при течении через местное сопротивление в виде резкого расширения потока. Определение коэффициента гидравлического сопротивления

Цель работы: построение зависимости потерь давления (напора) на резком расширении от расхода жидкости, а также экспериментальное определение коэффициента местного сопротивления.

Диаметр условного прохода подводящего трубопровода  $d_1 = 10$  мм.  
Диаметр условного прохода отводящего трубопровода  $d_2 = 15$  мм

1. Полностью закрыть задвижки 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38 и краны КР4, КР5, КР8, КР12. Краны КР6, КР7, КР9, КР14 и задвижку 33 полностью открыть.

2. Повернуть переключатель насоса НЗ в крайнее правое положение и включить питание переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

3. Дождаться наполнения напорной секции накопительного бака, вплоть до возникновения перелива.

4. Откручивая рукоятку задвижки 34 установить уровень жидкости в пьезометре №6 ( $H_{n6}$ ) в соответствии с табл. 2.5.

5. Закрывать кран КР9. Измерить время  $\Delta t$  заполнения объема  $V$  жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1. Записать значения в табл. 2.5. Открыть кран КР9.

6. Записать в таблицу показания пьезометра №5 ( $H_{n5}$ ).

7. Повторить действия по пунктам 4, 5, 6 для всего интервала  $H_{n6}$  из табл.2.5.

8. Полностью закрыть задвижку 34.

9. Выключить питание насоса НЗ.

10. Рассчитать величины расходов  $Q=V/ \Delta t$  и записать значения в таблицу 2.5.

11. Рассчитать параметры потока в трубопроводах:

а) среднюю скорость жидкости:  $\vartheta_1 = \frac{Q}{A_1}$  и  $\vartheta_2 = \frac{Q}{A_2}$ ; ( $A_1 = \pi d_1^2/4$ ,  $A_2 = \pi d_2^2/4$ );



б) скоростной напор:  $\frac{v_1^2}{2g}$  и  $\frac{v_2^2}{2g}$ ;

в) критерий Рейнольдса:  $Re_1 = \frac{v_1 \cdot d_1}{\nu}$ .

12. Рассчитать местные потери напора на резком сужении:

$$\Delta h_c = H_5 - H_6 = H_{п5} + \frac{\alpha_5 \cdot v_5^2}{2g} - H_{п6} - \frac{\alpha_6 \cdot v_6^2}{2g}.$$

13. Рассчитать потери давления на резком сужении:

$$\Delta p_c = \rho \cdot g \cdot \Delta h_c.$$

14. Определить коэффициент сопротивления резкого сужения:

а) приведенный к скоростному напору в малом трубопроводе:

$$\xi_{c1} = \Delta h_c / \left( \frac{v_1^2}{2g} \right).$$

б) приведенный к скорости в отводящей трубе:

$$\xi_{c2} = \Delta h_c / \left( \frac{v_2^2}{2g} \right).$$

15. Построить напорную характеристику резкого расширения в координатах подача-потребный напор  $H_{номп1} = \Delta h_c = f(Q)$ .

16. Построить характеристики местного сопротивления (резкого сужения) в координатах коэффициент сопротивления-критерий Рейнольдса  $\xi_{c1} = f(Re_1)$ . Сделать выводы.

Таблица 2.5

№	V, л	Δt, сек.	Q, л/с	H <sub>п5</sub> , мм	H <sub>п6</sub> , мм	v <sub>1</sub> , мм/с	v <sub>2</sub> , мм/с	Re <sub>1</sub>	Re <sub>2</sub>	$\frac{v_1^2}{2g}$	$\frac{v_2^2}{2g}$	Δh <sub>c</sub> , мм	Δp <sub>c</sub> , Па	ξ <sub>c1</sub>	ξ <sub>c2</sub>
1					850										
2					800										
3					750										
4					700										
5					650										
6					600										
7					550										

## **2.6 Исследование потерь давления (напора) при течении через местное сопротивление в виде диафрагмы. Определение коэффициента гидравлического сопротивления**

Цель работы: построение напорной характеристики мерной диафрагмы и экспериментальное определение коэффициента местного сопротивления.

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

1. Полностью закрыть задвижки 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38 и краны КР4, КР5, КР8, КР12. Краны КР6, КР7, КР9, КР14 полностью открыть.

2. Повернуть переключатель насоса НЗ в крайнее правое положение и включить питание переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

3. Дождаться наполнения напорной секции накопительного бака, вплоть до возникновения перелива.

4. Откручивая рукоятку задвижки 35 установить уровень жидкости в пьезометре №11 ( $H_{n11}$ ) в соответствии с табл. 2.6.1.

5. Закрывать кран КР9. Измерить время  $\Delta t$  заполнения объема  $V$  жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1. Записать значения в табл. 2.6.1. Открыть кран КР9.

6. Записать в таблицу 2.6.1 показания пьезометра №10 ( $H_{n10}$ ).

7. Повторить действия по пунктам п.4, 5, 6 для всего интервала  $H_{n11}$  из табл.2.6.

8. Полностью закрыть задвижку 35.

9. Выключить питание насоса НЗ.

10. Рассчитать величины расходов  $Q=V/ \Delta t$  и записать значения в таблицу 2.6.

11. Рассчитать местные потери напора на диафрагме. Учитывая, что расход жидкости при каждом измерении постоянен (т.е. скоростные напоры в сечениях до и после диафрагмы равно) потери полного напора:

$$\Delta H_{\partial} = H_{10} - H_{11} = H_{II10} + \frac{\alpha \cdot v_{10}^2}{2g} - H_{II11} - \frac{\alpha \cdot v_{11}^2}{2g} = H_{II10} - H_{II11} = \Delta h_{\partial},$$

следовательно:

$$\Delta H_{\partial} = H_{10} - H_{11}.$$

12. Рассчитать параметры потока в отверстии диафрагмы:

а) среднюю скорость жидкости:  $v_0 = \frac{Q}{A_0} = \frac{Q}{\pi d_0^2/4}$ ;

б) скоростной напор:  $\frac{v_0^2}{2g}$ ;

в) критерий Рейнольдса:  $Re_1 = \frac{v_0 \cdot d_0}{\nu}$ .

13. Рассчитать параметры потока в подводящем трубопроводе:

а) среднюю скорость жидкости:  $v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi d^2/4}$ ;

б) скоростной напор:  $\frac{v^2}{2g}$ ;

в) критерий Рейнольдса:  $Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$ .

14. Определить коэффициент сопротивления диафрагмы:

а) приведенный к скоростному напору в отверстии диафрагмы:

$$\xi_{d0} = \Delta h_d / \left( \frac{v_0^2}{2g} \right);$$

б) приведенный к скорости в подводящей трубе:

$$\xi_d = \Delta h_d / \left( \frac{v^2}{2g} \right).$$

15. Определить коэффициент расхода диафрагмы  $\mu$  т.к.

$$Q = \mu \cdot A_0 \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H_d};$$

$$\mu = \frac{Q}{A_0 \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H_d}}.$$

16. Построить напорную характеристику диафрагмы в координатах подача – потребный напор  $H_{нотр1} = \Delta H_d = f(Q)$ .

17. Построить характеристики диафрагмы в координатах коэффициент сопротивления-критерий Рейнольдса  $\xi_{d0} = f(Re_0)$ . Сделать выводы.

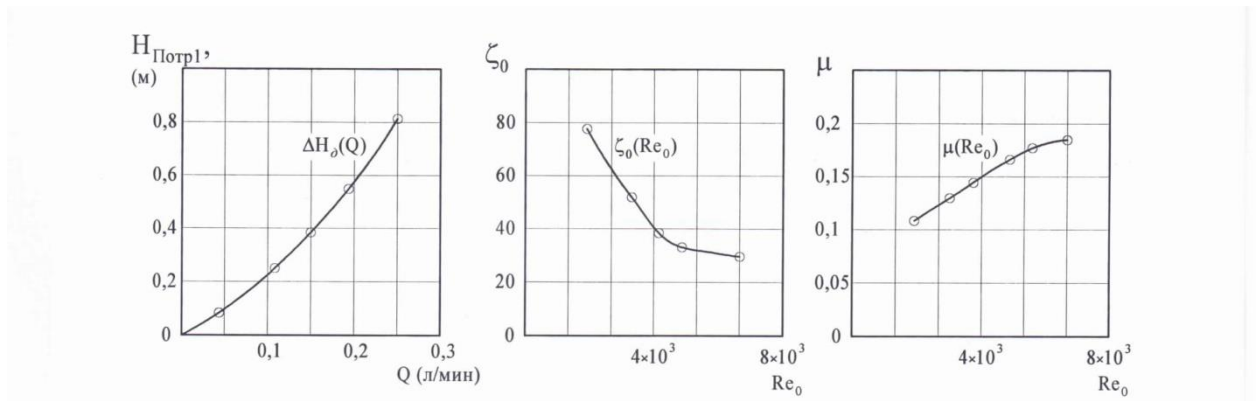


Рисунок 2.6 – Пример построения экспериментальных характеристик диафрагмы

Таблица 2.6

№	V, л.	$\Delta t$ , сек.	Q, л/с	$H_{п10}$ , мм	$H_{п11}$ , мм	$\Delta H_d$	$\vartheta_0$ , мм/с	$Re_0$	$\frac{\vartheta^2}{2g}$	$\xi_{d0}$	$\vartheta$ , мм/с	$Re$	$\frac{\vartheta^2}{2g}$	$\xi_d$	$\mu$
1					400										
2					350										
3					300										
4					250										
5					200										
6					150										
7					100										

## **2.7 Исследование потерь давления (напора) при течении через местное сопротивление в виде задвижки. Определение коэффициента гидравлического сопротивления**

Цель работы: исследование влияния величины перекрытия на напорную характеристику регулируемой задвижки и коэффициента местного сопротивления.

Исследуется клиновая задвижка переменного сечения с диаметром условного прохода  $d = 15$  мм. Точки замера пьезометрического напора №8 и №9 до и после задвижки 33 расположены во входном и выходном фитингах с тем же условным проходом.

1. Полностью закрыть задвижки 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38 и краны КР4, КР5, КР8, КР12. Краны КР6, КР7, КР9, КР14 полностью открыть.

2. Повернуть переключатель насоса НЗ в крайнее правое положение и включить питание переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

3. Дождаться наполнения напорной секции накопительного бака, вплоть до возникновения перелива.

4. Откручивая рукоятку задвижки 34 установить уровень жидкости в пьезометре №9 ( $H_{n9}$ ) в соответствии с табл. 2.7.1.

5. Закрыть кран КР9. Измерить время  $\Delta t$  заполнения объема  $V$  жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1. Записать значения в табл. 2.7.1. Открыть кран КР9.

6. Записать в таблицу 2.7.1 показания пьезометра №8.

7. Повторить действия по пунктам 4, 5, 6 для всего интервала  $H_{n9}$  из табл. 2.7.1. Таким образом, получается характеристика задвижки при фиксированной величине перекрытия. Закрыть задвижку 34.

8. Закрутить рукоятку 33 на несколько оборотов (см. табл. 2.7.2; 2.7.3; 2.7.4) (изменить величину перекрытия) и повторить действия по пунктам 4, 5, 6, 7. Таким образом получиться характеристики для нескольких значений

перекрытия сечения задвижки. Результаты замеров и количество оборотов задвижки записать в табл. 2.7.2, 2.7.3 и 2.7.4.

9. Выключить питание насоса НЗ.

10. Рассчитать величины расходов  $Q=V/\Delta t$  и записать значения в таблицу.

11. Рассчитать местные потери напора на задвижке:

$$\Delta H_{з\partial в} = H_8 - H_9 = H_{П8} + \frac{\alpha \cdot v_8^2}{2g} - H_{П9} - \frac{\alpha \cdot v_9^2}{2g} = H_{П8} - H_{П9} = \Delta h_{з\partial в},$$

следовательно:  $\Delta H_{з\partial в} = H_8 - H_9$ .

12. Рассчитать среднюю скорость жидкости:  $v = \frac{Q}{A}$ ,

критерий Рейнольдса:  $Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$ .

13. Определить коэффициент сопротивления задвижки:

$$\xi_{з\partial в} = \Delta H_{з\partial в} / \left( \frac{v^2}{2g} \right).$$

14. Построить напорные характеристики диафрагмы в координатах подача – потребный напор  $H_{потр1} = \Delta h_{з\partial в} = f(Q)$  для нескольких перекрытий задвижки.

15. Построить характеристики задвижки в координатах коэффициент сопротивления-критерий Рейнольдса  $\xi_{\partial} = f(Re)$  для нескольких перекрытий задвижки.

16. Сделать выводы.

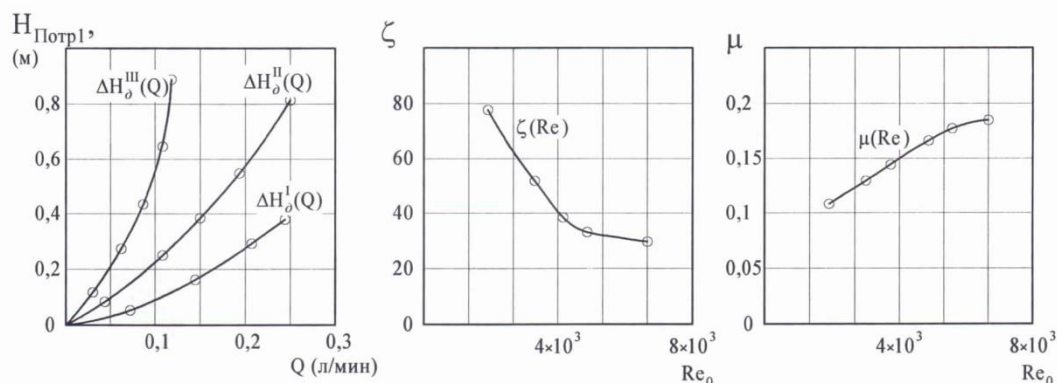


Рисунок 4 – Пример построения экспериментальных характеристик задвижки

Таблица 2.7.1 (Количество оборотов задвижки ЗЗ равно 0)

№	V, л	$\Delta t$ , сек	Q, л/с	H <sub>п8</sub> , мм	H <sub>п9</sub> , мм	$\Delta H_{з\partial e}$ мм	$\vartheta$ , мм/с	R <sub>e</sub>	$\frac{v^2}{2g}$	$\xi_{з\partial B}$
1					800					
2					700					
3					600					
4					500					
5					400					
6					300					
7					200					

Таблица 2.7.2 (Количество оборотов задвижки ЗЗ равно 3)

№	V, л	$\Delta t$ , сек	Q, л/с	H <sub>п8</sub> , мм	H <sub>п9</sub> , мм	$\Delta H_{з\partial e}$ мм	$\vartheta$ , мм/с	R <sub>e</sub>	$\frac{v^2}{2g}$	$\xi_{з\partial B}$
1					800					
2					700					
3					600					
4					500					
5					400					
6					300					
7					200					

Таблица 2.7.3 (Кол-во оборотов задвижки ЗЗ равно 6)

№	V, л	$\Delta t$ , сек	Q, л/с	H <sub>п8</sub> , мм	H <sub>п9</sub> , мм	$\Delta h_{12}$ мм	v, мм/с	R <sub>e</sub>	$\frac{v^2}{2g}$	$\xi_{з\partial B}$
1					800					
2					700					
3					600					
4					500					
5					400					
6					300					
7					200					

Таблица 2.7.4 (Кол-во оборотов задвижки 33 равно 9)

№	V, л	$\Delta t$ , сек	Q, л/с	H <sub>п8</sub> , мм	H <sub>п9</sub> , мм	$\Delta h_{12}$ мм	v, мм/с	$R_e$	$\frac{v^2}{2g}$	$\xi_{зdB}$
1					800					
2					700					
3					600					
4					500					
5					400					
6					300					
7					200					



## 2.8 Изучение силового взаимодействия незатопленной струи на механическую преграду

Целью работы является экспериментальное определение силового воздействия струи на твердую преграду.

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

- непосредственно по показаниям счетчика РМ1, замеряя промежуток времени соответствующий выбранному контрольному объему;
- снимая показания с экрана СИ-8 (при расширенной комплектации стенда).

1. Полностью закрыть задвижки 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38 и краны КР3, КР4, КР8, КР12. Краны КР6, КР7, КР5 полностью открыть.

2. Повернуть переключатель насоса НЗ в крайнее правое положение и включить питание переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

3. Постепенно откручивая рукоятку задвижки 38 против часовой стрелки увеличивать количество жидкости истекающей из сопла до тех пор пока угол поворота преграды (пластины) не достигнет первого значения из табл. 2.8.

4а. Замерить время  $\Delta t$  (замеряется секундомером) за которое объем жидкости  $V$  проходит через счетчик РМ1 в линии подачи жидкости к соплу. Значения контрольного объема  $V$  рекомендуется выбирать равными величинам из соответствующего столбца (см. табл. 2.8). Цифры на последнем барабане счетчика соответствуют объему в литрах, цена малого деления 0,2 литра. Значения  $\Delta t$  занести в табл. 2.8.

4б. Показания счетчика РМ1 поступают на вход СИ-8, показания которого отражают мгновенные значения расхода в линии подвода жидкости к соплу ( $Q$ ). Значения расхода, отображаемые на табло, заносится в таблицу 2.8, и столбик величин  $\Delta t$  не заполняется. Порядок измерения расхода в этом случае следующий:

- Переключить электронный секундомер в режим «Расход по счетчику воды».
- На счетчике импульсов нажать кнопку », на экране СИ8 будет отображаться текущее значение расхода.

5. Изменяя величину перекрытия установить остальные углы наклона из табл. 2.8 и повторить измерения по пункту 4.

6. Выключить электропитание насоса.

7. Рассчитать расход через сопло:

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

8. Определить среднее значение скорости истечения жидкости из сопла:

$$v = Q / A;$$

$$A = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} - \text{площадь струи на срезе сопла};$$

$d_c = 4,5$  мм – диаметр живого сечения на срезе сопла.

9. По известному углу наклона пластины к горизонту определить силу воздействия на преграду из условия равновесия пластины.

Сумма моментов относительно оси поворота пластины:

$$\Sigma m_A = 0; F_c \cdot h_c - m \cdot g \cdot h_G \cdot \sin(\alpha) = 0,$$

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;

$\alpha$  – угол наклона пластины.

Следовательно:

$$F_c = \frac{m \cdot g \cdot h_G \cdot \sin(\alpha)}{h_c}.$$

Найденные значения  $F_c$  занести в табл. 2.8.

10. Найдите теоретическую силу воздействия на преграду по средней скорости истечения жидкости из сопла по формуле Эйлера:

$$F_{CT} = A \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \sin(\beta);$$

$$\beta = 90 - \alpha \text{ (см. рис. 2.8).}$$

Полученные значения теоретической силы воздействия на преграду занести в таблицу 2.8 сравнить с величинами, рассчитанными по п. 9.

11. Сделать выводы.

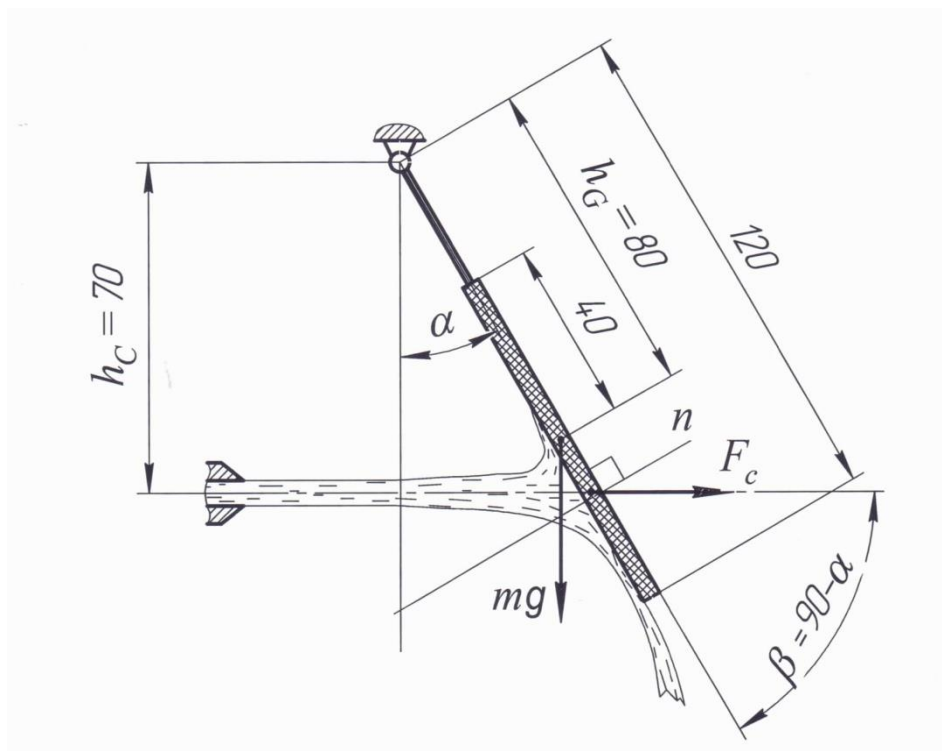


Рисунок 2.8 – Схема для определения силы воздействия струи  $F_c$  на плоскую преграду из условия равновесия пластины

Таблица 2.8

№	$\alpha$ , град.	V, л.	$\Delta t$ , сек.	Q, л/с	v, м/с	$F_c$ Н	$F_{СТ}$ , Н
1	5	1					
2	10	1					
3	20	1					
4	30	1					
5	40	1					
6	50	1					
7	60	1					

## 2.9 Иллюстрация уравнения Бернулли, диаграмма напоров

Цель работы: закономерностей течения жидкости (уравнения Бернулли) в сложном трубопроводе при последовательном соединении участков разного диаметра. Экспериментальное построение напорной характеристики, построение напорной и пьезометрической линий сложного трубопровода. Изучение влияния геометрической высоты трубопровода на величины полного и гидростатического напора и расход через трубопровод.

Сложный трубопровод состоит из трех последовательно соединенных прозрачных труб из органического стекла с внутренними диаметрами  $d_I=15\text{мм}$ ,  $d_{II}=10\text{мм}$ ,  $d_{III}=15\text{мм}$ . Расстояния между точками отбора и схему подключения пьезометров см. рис.1.

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).

1. Полностью закрыть задвижки 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38 и краны КР4, КР5, КР8, КР12. Краны КР6, КР7, КР9, КР14 полностью открыть.

2. Повернуть переключатель насоса НЗ в крайнее правое положение и включить питание переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

3. Дождаться наполнения напорной секции накопительного бака, вплоть до возникновения перелива.

4. Откручивая рукоятку задвижки 36 установить уровень жидкости в пьезометре №12 ( $H_{n12}$ ) в соответствии с табл. 2.9.1.

5. Закрыть кран КР9. Измерить время  $\Delta t$  заполнения объема  $V$  жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1. Записать значения в таблицу 2.9.1.

Открыть кран КР9.

6. Записать в таблицу 2.9.1. показания пьезометров №13, 14, 15, 16, 17

$(H_{II13}, H_{II14}, H_{II15}, H_{II16}, H_{II17})$ .

7. Повторить действия, описанные в пунктах 4, 5 и 6 для всего интервала  $H_{n12}$  из табл. 2.8.1. Результаты замеров записать в табл. 2.9.1.

8. Изменяя угол наклона трубопровода ТЗ (контролируется по специальной линейке размещенной на кронштейне трубопровода) при неизменной величине перекрытия задвижки З6 (рекомендуется перекрытие около 5 оборотов рукоятки задвижки) повторить измерения по пункту 8. Результаты записать в таблицу 2.9.2.

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.

9. Полностью закрыть задвижку З6.

10. Выключить питание насоса.

11. Рассчитать величину подачи  $Q_H = V/\Delta t$  насоса и записать в таблицу 2.9.1.

12. Рассчитать потери статического напора по длине участков трубопровода  $\Delta h_I = H_{II12} - H_{II13}$ ;  $\Delta h_{II} = H_{II14} - H_{II15}$ ;  $\Delta h_{III} = H_{II16} - H_{II17}$ .

13. Рассчитать местные потери пьезометрического напора:

а) В плавном сужении русла (конфузоре)  $\Delta h_{I-II} = H_{II13} - H_{II14}$ ;

б) В плавном расширении (диффузоре)  $\Delta h_{1516} = H_{II15} - H_{II16}$ .

14. Рассчитать средние скорости жидкости и критерии Рейнольдса для каждого участка:

$$v_I = v_{II} = v_{12} = v_{13} = v_{16} = v_{17} = \frac{Q}{A_I};$$

$$v_{III} = v_{14} = v_{15} = \frac{Q}{A_{II}};$$

$$Re_I = \frac{v_I \cdot d}{\nu}, Re_{II} = \frac{v_{II} \cdot d}{\nu}, Re_{III} = \frac{v_{III} \cdot d}{\nu}.$$

15. Рассчитать скоростные напоры на каждом участке трубопровода:

$$H_I^v = \frac{v_I^2}{2g}, H_{II}^v = \frac{v_{II}^2}{2g}, H_{III}^v = \frac{v_{III}^2}{2g}.$$

16. Рассчитать потребные пьезометрические напоры для каждого участка:

$$h_I^\Sigma = \Delta h_I + \Delta h_{1314} = H_{II12} - H_{II14};$$

$$h_{II}^\Sigma = \Delta h_{II} + \Delta h_{1516} = H_{II14} - H_{II16};$$

$$h_{III}^\Sigma = \Delta h_{III} = H_{II16} - H_{II17}.$$

Потребный пьезометрический напор сложного трубопровода:

$$h_{ПОТР} = h_I^\Sigma + h_{II}^\Sigma + h_{III}^\Sigma = H_{II12} - H_{II17}.$$

17. Рассчитать потребные полные напоры участков и трубопровода в целом:

$$H_I^\Sigma = h_I^\Sigma + \alpha \cdot \frac{v_I^2}{2g};$$

$$H_{II}^\Sigma = h_{II}^\Sigma + \alpha \cdot \frac{v_{II}^2}{2g};$$

$$H_{III}^\Sigma = h_{III}^\Sigma + \alpha \cdot \frac{v_{III}^2}{2g}.$$

Принять  $\alpha=1$  при турбулентном течении и  $\alpha=2$  при ламинарном.

Полный напор сложного трубопровода с последовательным соединением:

$$H^\Sigma = H_I^\Sigma + H_{II}^\Sigma + H_{III}^\Sigma.$$

18. Построить характеристики для участков трубопровода  $H_I^\Sigma = f(Q)$ .

$H_{II}^\Sigma = f(Q), H_{III}^\Sigma = f(Q)$  и общую характеристику сложного трубопровода с последовательным соединением участков в координатах подача-потребный напор  $H^\Sigma = f(Q_H)$ .

19. При одном фиксированном значении расхода через трубопровод (рекомендуется при максимальном) построить линии пьезометрического напора, дополнив его линиями скоростных напоров получить линию полного напора.

Линию пьезометрических напоров следует строить по показаниям

пьезометров. Для этого выбирается одна из строк таблицы 2.9.1, соответствующая какому-либо значению расхода через трубопровод ТЗ (желательно выбирать значение примерно из середины интервалов).

Линия полного напора получается при увеличении линии пьезометрического напора на величину скоростного напора.

Полный напор в сечениях

$$H_{12} = H_{II12} + H_I^v, H_{13} = H_{II13} + H_I^v;$$

$$H_{14} = H_{II14} + H_{II}^v, H_{15} = H_{II15} + H_{II}^v;$$

$$H_{16} = H_{II16} + H_{III}^v, H_{17} = H_{II17} + H_{III}^v.$$

Схематичный пример построения пьезометрической и напорной линий показан на рис.2.9.

20. Рассчитать и построить графики зависимости потерь полного напора в местных сопротивлениях от числа Рейнольдса:

а) для плавного сужения:

$$\Delta H_{ПС} = H_{13} - H_{14} = H_{II13} + \alpha \cdot \frac{v_I^2}{2g} - H_{14} - \alpha \cdot \frac{v_{II}^2}{2g};$$

$$(\Delta H_{ПС} = f(Re_{II}));$$

а) для плавного расширения:

$$\Delta H_{ПР} = H_{15} - H_{16} = H_{II15} + \alpha \cdot \frac{v_{II}^2}{2g} - H_{16} - \alpha \cdot \frac{v_I^2}{2g}$$

$$(\Delta H_{ПР} = f(Re_{II}));$$

21. Рассчитать величины коэффициентов сопротивлений плавного сужения –  $\xi_{ПС}$ , и плавного расширения –  $\xi_{ВР}$ :

$$\xi_{ПС} = \Delta H_{ПС} / \left( \frac{v_{II}^2}{2g} \right);$$

$$\xi_{ВР} = H_{ПР} / \left( \frac{v_I^2}{2g} \right).$$

22. Построить графики зависимостей  $\xi_{ПС} = f(Re_{II})$  и  $\xi_{ВР} = f(Re_{II})$ .

23. Сделать выводы.

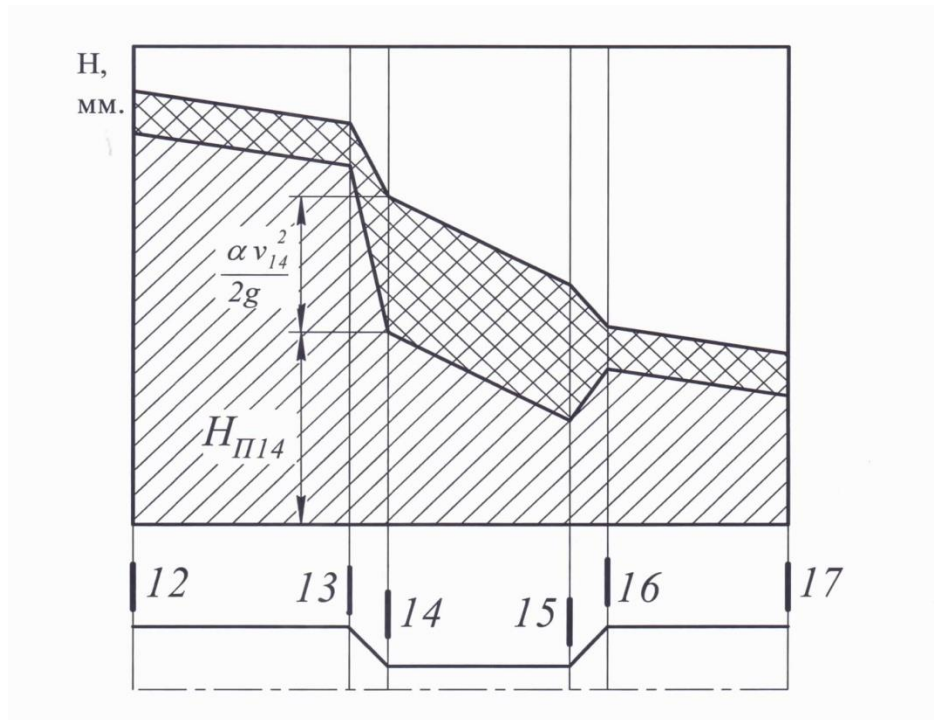


Рисунок 2.9 – Пьезометрическая и напорная линии



Таблица 2.9.1

№	V, л.	$\Delta t$ , сек.	Q, л/с	H <sub>п12</sub> , мм	H <sub>п13</sub> , мм	H <sub>п14</sub> , мм	H <sub>п15</sub> , мм	H <sub>п16</sub> , мм	H <sub>п17</sub> , мм	$\vartheta_I$ , мм/с	$\vartheta_{II}$ , мм/с	$\vartheta_{III}$ , мм/с	Re <sub>I</sub>	Re <sub>II</sub>	Re <sub>III</sub>
1				900											
2				850											
3				800											
4				750											
5				700											
6				650											
7				600											

Таблица 2.9.1 (продолжение)

№	$\Delta h_I$ мм	$\Delta h_{II}$ мм	$\Delta h_{III}$ мм	$\Delta h_{1314}$ мм	$\Delta h_{1516}$ мм	$\Delta h_{910}$ мм	$h_I^\Sigma$ мм	$h_{II}^\Sigma$ мм	$h_{III}^\Sigma$ мм	$H_I^p$ мм	$H_{II}^p$ мм	$H_{III}^p$ мм	$H_I^\Sigma$ мм	$H_{II}^\Sigma$ мм	$H_{III}^\Sigma$ мм	$H^E$ мм	$\Delta H_{ПС}$ мм	$\Delta H_{ПР}$ мм	$\xi_{ПС}$	$\xi_{БР}$
1																				
2																				
3																				
4																				
5																				
6																				
7																				

Таблица 2.9.2

№	Наклон к горизонту ТЗ	V, л	$\Delta t$ , сек	Q, л/с	H <sub>п12</sub> , мм	H <sub>п13</sub> , мм	H <sub>п14</sub> , мм	H <sub>п15</sub> , мм	H <sub>п16</sub> , мм	H <sub>п17</sub> , мм
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										

## 2.10 Определение напорных характеристик насоса

Цель работы: экспериментальное построение характеристик насоса Н1 и Н2 (WCP 25-40G) в координатах напор-подача.

1. Полностью закрыть задвижки 34 и 35 и краны КР3, КР4. Задвижку 37 и краны КР1, КР2, КР9 полностью открыть.

2. Повернуть переключатель насоса Н1 в крайнее правое положение и включить питание переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

3. Поворачивая рукоятку задвижки 37 установить требуемую (по табл. 2.10.1) величину давления  $p_{д1}$  на выходе насоса Н1 по показаниям ДД1.

4. Закрывать кран КР9. Измерить время  $\Delta t$  заполнения объема  $V$  жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1 в автоматическом режиме (переключатель в положении «ЕМ1») либо в ручном режиме (переключатель в положении «секундомер»). Записать значения в таблицу 2.10.1. Открыть кран КР9. Измерить давление перед насосом  $p_{дз}$ .

5. Повторяя работы по п. 3 и 4 выполнить замеры для всех значений давления  $p_{Н1}$  соответствующих таблице 2.10.1.

6. Выключить питание насоса Н1.

7. Рассчитать величину подачи  $Q_H = V/\Delta t$  насоса и записать значения в таблицу.

8. Рассчитать напор, создаваемый насосом  $H_H = (p_{д1} - p_{дз})/(\rho \cdot g)$  записать в таблицу ( $g=9,81 \text{ м/с}^2=9810 \text{ мм/с}^2$  – ускорение свободного падения,  $\rho=10^3 \text{ кг/м}^3=10^{-6} \text{ кг/мм}^3$  – плотность рабочей жидкости (воды)).

9. Построить график зависимости  $H_H=f(Q_H)$ .

10. Сделать выводы.

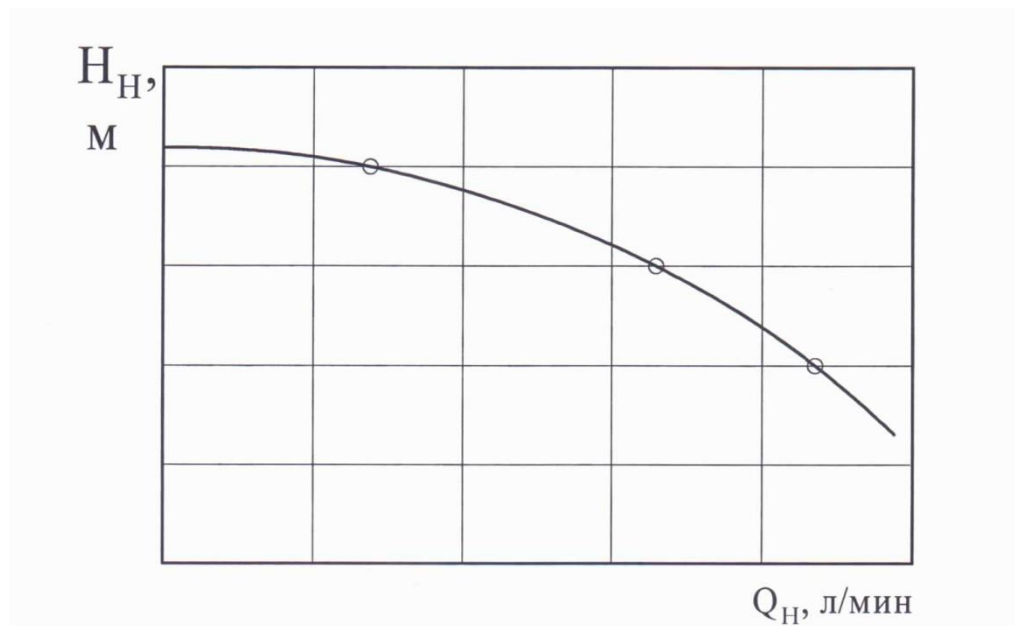


Рисунок 7 – Пример экспериментальной характеристики насоса

Характеристика насоса Н2 снимается аналогичным образом за исключением того что всасывание осуществляется из накопительного бака.

1. Полностью закрыть задвижки 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38 и краны КР2, КР3, КР5, КР8, КР12. Краны КР4, КР6, КР7, КР9, КР14 полностью открыть.

2. Повернуть переключатель насоса Н3 в крайнее правое положение и включить питание переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

3. Дождаться наполнения напорной секции накопительного бака, вплоть до возникновения перелива.

4. Повернуть переключатель насоса Н2 в крайнее левое положение (соответствующее минимальной подаче) и включить питание переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

5. Отворачивая рукоятку задвижки 37 установить требуемую (по табл. 2.10.2) величину давления  $p_{H2}$  на выходе насоса Н2 по показаниям ДД2.

6. Закрывать кран КР9. Измерить время  $\Delta t$  заполнения объема  $V$  жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1 в автоматическом режиме (переключатель в положении «ЕМ1») либо в ручном режиме (переключатель

в положении «секундомер»). Записать значения в таблицу 2.10.2. Открыть кран КР9.

7. Повторяя работы по п. 5 и 6 выполнить замеры для всех значений давления  $p_{Д1}$ , соответствующих таблице 2.10.2.

8. Полностью закрыть задвижку З7 и кран КР7.

9. Выключить питание насосов Н3 и Н2.

10. Рассчитать величину подачи  $Q_H = V/\Delta t$  насоса и записать значения в таблицу.

11. Рассчитать напор, создаваемый насосом  $H_{Н2} = (p_{Д2} - p_0)/(\rho \cdot g)$  записать в таблицу.  $p_0$  – давление на входе второго насоса. В данном случае, если пренебрегать потерями в подводящем трубопроводе:

$$p_0 = p \cdot g \cdot h,$$

где  $h = 1,16$  м расстояние от насоса до свободной поверхности в накопительном баке.

12. Построить график зависимости  $p_0 = p \cdot g \cdot h$ .

Таблица 2.10.1

Параметр	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
Давление $p_{Д1}$ на выходе насоса Н1, кПа	25	30	35	37	40	45
Давление $p_{Д3}$ на выходе насоса Н1, кПа						
Объем $V$ жидкости, поступающей в ЕМ1, л						
Промежуток времени $\Delta t$ , с						
Подача $Q_H$ насоса Н1, л/мин						
Напор насоса Н1 $H_{Н1}$ , м						

Таблица 2.10.2

Параметр	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
Давление $p_{H_2}$ на выходе насоса Н2, кПа	15	20	25	30	35	40
Объем $V$ жидкости, поступающей в ЕМ1, л						
Промежуток времени $\Delta t$ , с						
Подача $Q_H$ насоса Н1, л/мин						
Напор насоса Н2 $H_{H_2}$ , м						

## 2.11 Исследование характеристик насосов при последовательном их соединении

Цель работы: экспериментальное построение характеристик совместной работы последовательно соединённых насосов Н1 и Н2 (WSP 25-40G).

1. Полностью закрыть задвижки 34, 35, 36, 37 и краны КР2, КР4, КР5, КР7, КР8, КР12. Краны КР1, КР3, КР9 полностью открыть.

Графически способ включения насосов Н1 и Н2 представлен на рисунке 2.11.1. Тонкими линиями на нем обозначены перекрытые при помощи кранов трубопроводы.

2. Повернуть переключатель насоса Н1 в крайнее правое положение и включить питание переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

3. Повернуть переключатель насоса Н2 в крайнее правое положение и включить питание переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

4. Отворачивая рукоятку задвижки 37 установить требуемую величину давления  $p_{д2}$  на выходе насоса Н2 по показаниям ДД2. Значения  $p_{д1}$ ,  $p_{д2}$  и  $p_{д3}$  записать в таблицу 2.11.

5. Закрывать кран КР9. Измерить время  $\Delta t$  заполнения объема  $V$  жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1 в автоматическом режиме (переключатель в положении «ЕМ1») либо в ручном режиме (переключатель в положении «секундомер»). Записать значения в таблицу 2.11. Открыть кран КР9.

6. Повторяя работы по п. 5 и 6 выполнить замеры для всех значений давления  $p_2$ , соответствующих таблице 2.11.

7. Полностью закрыть задвижку 37.

8. Выключить питание насосов Н1 и Н2.

9. Рассчитать величину подачи  $Q_{Н12} = V/\Delta t$  при совместной работе

насосов и записать значения в таблицу 2.11.

10. Рассчитать напор, создаваемый  $H_{H1}=f(Q_{H12})$ .  $H_{H12}=f(Q_{H12})$ . На одной координатной плоскостной плоскости и дополнить их характеристикой  $H_{H12}=f(Q_{H2})$  из предыдущей лабораторной работы (по данным таблицы 2.10.2). Характеристика  $H_{H2}=f(Q_{H2})$ . На рис. 2.11.2 проведена штриховой линией.

11. Сделать выводы.

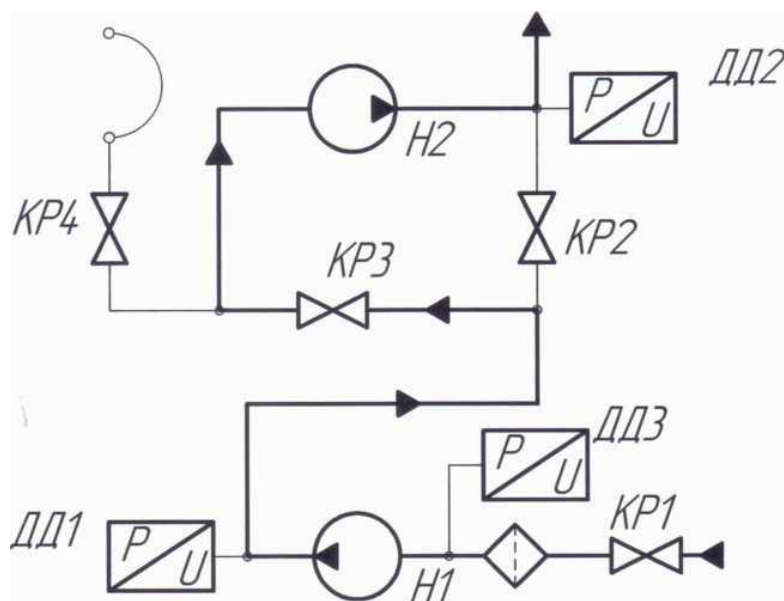


Рисунок 2.11.1 – Схема последовательного включения насосов Н1 и Н2

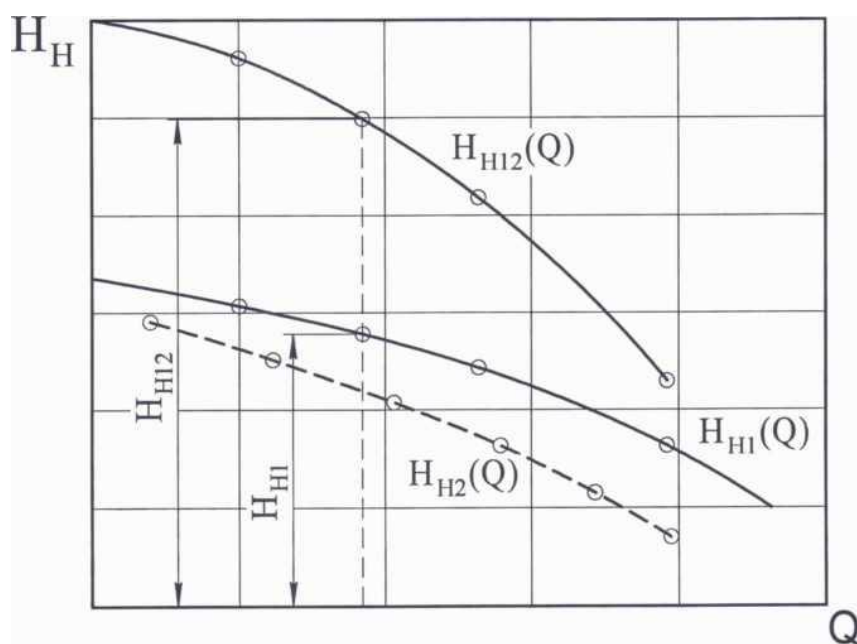


Рисунок 2.11.2 – Пример экспериментальной характеристики последовательной работы насосов



Таблица 2.11

Параметр	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
Давление $p_{H12}$ на выходе насоса Н2, кПа	30	40	50	60	70	80
Давление $p_{H1}$ на выходе насоса Н1, кПа						
Давление $p_{дз}$ на выходе насоса Н1, кПа						
Объем $V$ жидкости, поступающей в ЕМІ, л						
Промежуток времени $\Delta t$ , с						
Подача $Q_H$ насоса Н1, л/мин						
Напор насоса Н1 $H_{H1}$ , м						
Напор насоса Н2 $H_{H12}$ , м						

## **2.12 Исследование характеристик насосов при их параллельном соединении**

Цель работы: экспериментальное построение характеристики совместной работы параллельно насосов Н1 и Н2 (WCP 25-40G) в координатах напор-подача.

1.Получить напорные характеристики для насосов Н1 и Н2 при их автономной работе переключив их регуляторы в крайнее левое положение (минимальная производительность).

Последовательность действий при этом аналогична приведенным в лабораторной работе 2.11, за исключением того, что давление на выходе насосов Н1 и Н2 измеряется датчиком ДД2 (поэтому и в том и в другом случаях измеряется давление  $p_{д2}$ ). Результаты занести в таблицу 2.12.2 для насоса Н1 и 2.12.3 для насоса Н2.

2.Полностью закрыть задвижки 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38 и краны КР2, КР3, КР5, КР8, КР12. Краны КР1, КР4, КР6, КР7, КР9, КР14 полностью открыть.

Графически способ включения насосов Н1 и Н2 (после открытия крана КР2 см. пункт №7) представлен на рис. 2.12.1. Тонкими линиями на нем обозначены перекрытые при помощи кранов трубопроводы.

3.Повернуть переключатель насоса Н3 в крайнее правое положение и включить питание переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

4.Дождаться наполнения напорной секции накопительного бака, вплоть до возникновения перелива.

5.Повернуть переключатель насоса Н1 в крайнее левое положение и включить питание переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

6.Повернуть переключатель насоса Н2 в крайнее левое положение и включить питание переключением соответствующего тумблера на блоке

управления.

7.Открыть КР2.

8.Отворачивая рукоятку задвижки 37 установить требуемую величину давления  $p_{H2}$  на выходе насоса Н2 по показаниям ДД2. Значения  $p_{H1}$  и записать в таблицу 2.12.1.

9.Закрывать кран КР9. Измерить время  $\Delta t$  заполнения объема  $V$  жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1 в автоматическом режиме (переключатель в положении «ЕМ 1») либо в ручном режиме (переключатель в положении «секундомер»). Записать значения в таблицу 2.12.1. Открыть кран КР9.

10.Повторяя работы по п. 8 и 9 выполнить замеры для всех значений давления  $p_{д2}$ , соответствующих таблице 2.12.1.

11.Полностью закрыть задвижку 37.

12.Выключить питание насосов Н1 и Н2.

13.Рассчитать величину подачи  $Q_{H12} = V/\Delta t$  при совместной работе насосов и записать значения в таблицу 2.12.1.

14.Рассчитать напор, создаваемый насосами при совместной работе:

$$H_{H2} = \frac{p_{д2} - p_0}{\rho g}$$

В данном случае, если пренебрегать потерями в подводящем трубопроводе:

$$p_0 = \rho \cdot g \cdot h,$$

где  $h = 1,16$  м – расстояние от насоса до свободной поверхности в накопительном баке.

15. Построить графики зависимостей,  $H_{H1}=f(Q_{H1}), H_{H2}=f(Q_{H2}), H_{H12}=f(Q_{H12})$ .

16.Сделать выводы.

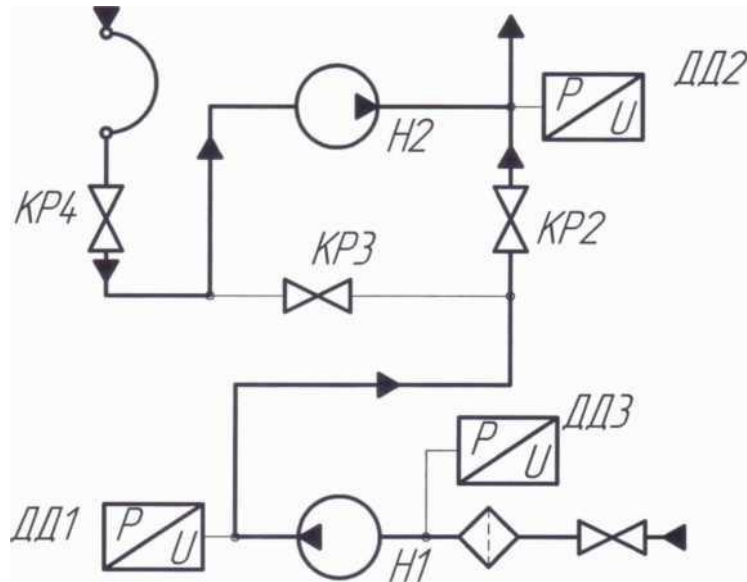


Рисунок 2.12.1 – Схема параллельного включения насосов Н1 и Н2

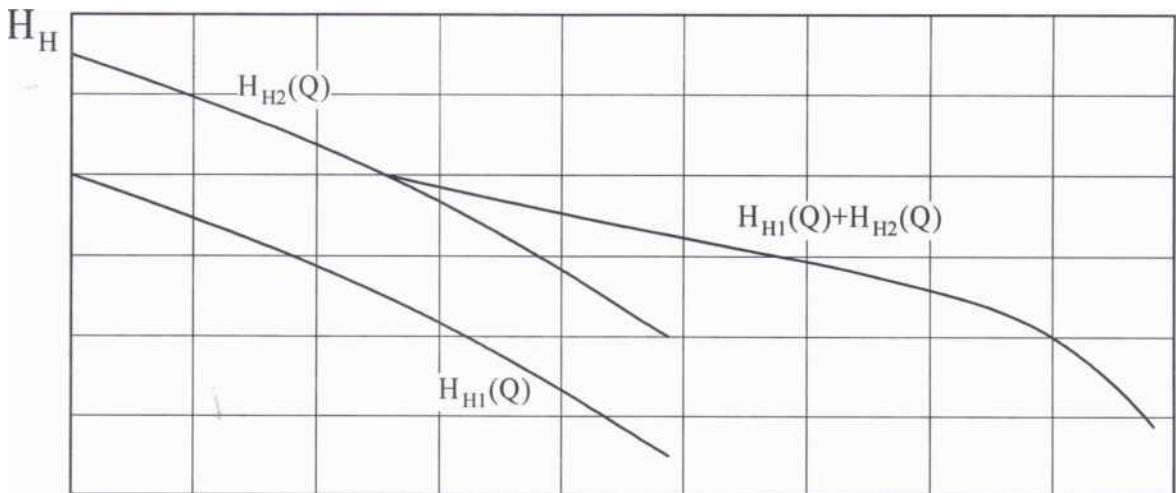


Рисунок 2.12.2 – Пример экспериментальной характеристики при параллельной работе насосов

Таблица 2.12.1 – Совместная работа Н1 и Н2 при параллельном соединении насосов

Параметр	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
Давление $p_{Н1}$ на выходе насоса Н1, кПа	25	26	28	30	32	35
Давление $p_{Н2}$ на выходе насоса Н2, кПа						
Давление $p_{Н3}$ на выходе насоса Н1, кПа						
Объем $V$ жидкости, поступающей в ЕМІ, л						
Промежуток времени $\Delta t$ , с						
Подача $Q_{Н12}$ насосов, л/мин						

Таблица 2.12.2 – Автономная работа Н1

Параметр	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
Давление $p_{Н2}$ на выходе насоса Н1, кПа	10	13	15	20	22	25
Давление $p_{д3}$ на выходе насоса Н2, кПа						
Объем $V$ жидкости, поступающей в ЕМІ, л						
Подача $Q_H$ насоса Н1, л/мин						
Напор насоса Н1 $H_{Н1}$ , м						

Таблица 2.12.3 – Автономная работа Н2

Параметр	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
Давление $p_{Н2}$ на выходе насоса Н2, кПа	15	20	25	30	32	35
Объем $V$ жидкости, поступающей в ЕМІ, л						
Промежуток времени $\Delta t$ , с						

Подача $Q_H$ насосов, л/мин						
Напор насоса Н2 $H_{H2}$ , м						

### 2.13 Тарировка расходомера с электронным выходным сигналом

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

Последовательность выполнения лабораторной работы.

1. Полностью закрыть задвижки 31, 32, 34, 35, 38 и краны КР3, КР4, КР8, КР14. Краны КР6, КР7, КР15 полностью открыть.

2. Повернуть переключатель насоса Н3 в крайнее правое положение и включить питание переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

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

4. Закрыть кран КР9, Измерить время  $\Delta t$  заполнения объема  $V$  жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1. В случае автоматического измерения контрольный объем фиксирован и составляет  $V=2,4$  л. Записать значение времени в таблицу 2.13.

5. Открыть кран КР9 и слить жидкость из мерной емкости. Обнулить показания электронного секундомера.

6. Зафиксировать показания расходомера  $Q_p$ , (см. работу 2.8) и занести в таблицу 2.13.

7. Вычислить погрешности измерения, сравнить с классом точности счетчика воды (см. инструкции).

8. Сравнить значение по п. 6 со значением расхода, измеренным объемным способом.

9. Выключить насос.

10. Сделать выводы.

Таблица 2.13.

№	V, л.	$\Delta t$ , сек.	Q, л/с	$Q_p$ , л/с	$\delta Q$ , %
1					

## 2.14 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).

Исследуются элементы пластикового трубопровода (отвод и тройник) с диаметром условного прохода  $d = 16$  мм.

1. Полностью закрыть задвижки 31, 32, 34, 35, 36, 37 и краны КР3, КР4, Краны КР1, КР2, КР9 полностью открыть.

2. Повернуть переключатель насоса Н1 в крайнее правое положение и включить питание переключением соответствующего тумблера на блоке управления.

3. Поворачивая рукоятку задвижки 37 установить требуемую (по табл. 2.14.1) величину давления  $p_{Н1}$  на выходе насоса Н1 по показаниям ДД1.

4. Закрывать кран КР9. Измерить время  $\Delta t$  заполнения объема  $V$  жидкости, поступающей в мерную емкость ЕМ1. Записать значения в таблицу 2.14.1. Открыть кран КР9.

5. Записать в таблицы 2.14.1; 2.14.2 показания пьезометров №18, 19, 20, 21.

6. Повторить действия, описанные в пунктах 3, 4 и 5 выполнить замеры для всех значений давления  $p_{Н1}$  соответствующих таблице 2.14.1. Результаты замеров записать в табл. 2.14.1 и 2.14.2.

7. Закрывать задвижку 37.

8. Выключить питание насоса Н1.

9. Рассчитать величины расходов  $Q = V/\Delta t$  и записать значения в таблицу.

10. Рассчитать местные потери напора на отводе:

$$\Delta H_{90^\circ} = H_{18} - H_{19} = H_{П18} + \frac{\alpha \cdot v_{18}^2}{2g} - H_{П19} - \frac{\alpha \cdot v_{19}^2}{2g} = H_{П18} - H_{П19} = \Delta h_{90^\circ};$$

и тройнике:



$$\Delta H_{Tl} = H_{20} - H_{21} = H_{П20} + \frac{\alpha \cdot \vartheta_{20}^2}{2g} - H_{П19} - \frac{\alpha \cdot \vartheta_{21}^2}{2g} = H_{П20} - H_{П21} = \Delta h_{Tl}.$$

11. Рассчитать среднюю скорость жидкости:  $\vartheta = \frac{Q}{A}$ ,

критерии Рейнольдса:  $Re = \frac{\vartheta \cdot d}{\nu}$ .

12. Определить коэффициент сопротивления и тройника:

$$\xi_{90^\circ} = \Delta H_{90^\circ} / \left( \frac{v^2}{2g} \right), \quad \xi_T = \frac{\Delta H_T}{\frac{v^2}{2g}}.$$

Таблица 2.14.1 – Характеристика отвода

№	$p_{Н1}$ , КПа	V, л.	$\Delta t$ , сек.	Q, л/с	$H_{П18}$ , мм	$H_{П19}$ , мм	$\Delta H_{90^\circ}$ мм	$\vartheta$ , мм/с	Re	$\frac{\vartheta^2}{2g}$	$\xi_{90^\circ}$
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											

Таблица 2.14.2 – Характеристика приточного тройника

№	$p_{Н1}$ , КПа	V, л.	$\Delta t$ , сек.	Q, л/с	$H_{П20}$ , мм	$H_{П21}$ , мм	$\Delta H_{Tl}$ мм	v, мм/с	Re	$\frac{v^2}{2g}$	$\xi_{Tl}$
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											