

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

"МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ"

Кафедра Строительства, теплоэнергетики и транспорта

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**к выполнению лабораторных работ**

по дисциплинам "Механика: гидромеханика"

для обучающихся всех форм обучения

по направлению подготовки (уровень бакалавриат):

26.03.02 Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов  
морской инфраструктуры

Мурманск

2019

Составитель: Ирина Ивановна Гаврилова, ст. преподаватель кафедры строительства, теплоэнергетики и транспорта Мурманского государственного технического университета.

Методические указания рассмотрены и одобрены кафедрой " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_  
20\_\_ года, протокол № \_\_\_\_

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ   | 4  |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1<br>ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ И ЕГО СВОЙСТВА.<br>ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ       | 5  |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2<br>ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ                                | 13 |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3<br>ИССЛЕДОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ                                       | 17 |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4<br>ТАРИРОВКА РАСХОДОМЕРА   | 21 |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5<br>ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПО ДЛИНЕ<br>ТРУБОПРОВОДА                 | 25 |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6<br>ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ<br>СОПРОТИВЛЕНИЙ                    | 32 |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7<br>ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ ПРИ<br>ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ | 37 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ  | 45 |

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания к выполнению лабораторных работ разработаны в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования направления подготовки (уровень бакалавриат) 26.03.02 Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры.

Целью настоящих методических указаний является оказание помощи студентам при подготовке и проведении лабораторных работ.

Перед проведением лабораторной работы студент обязан изучить материал, рекомендованный в методических указаниях.

Результаты наблюдений и измерений заносятся в журнал лабораторных работ. После обработки полученных данных, проведения необходимых расчетов и построения графиков отчет по лабораторной работе сдается преподавателю. При правильном выполнении и оформлении лабораторной работы и положительных ответах на вопросы преподавателя ставится зачет по каждой лабораторной работе, что вместе с другими текущими формами отчетности является основанием для допуска к зачету или экзамену по дисциплине.

Обучающиеся, не выполнившие по каким-либо причинам лабораторную работу во время занятий, обязаны выполнить и защитить ее во время дополнительных занятий согласно расписанию.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

## ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ И ЕГО СВОЙСТВА.

### ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

*Цель работы:* ознакомление с приборами для измерения давления (пьезометрами, манометрами, вакуумметрами, дифференциальными манометрами).

#### Краткие теоретические сведения

Давлением называется внутреннее напряжение сжатия в жидкости. Давление, представляющее полное напряжение сжатия от действия внешних сил (поверхностных и массовых), приложенных к жидкости, называется полным или абсолютным давлением.

Абсолютное давление в любой точке покоящейся жидкости может быть определено по уравнению, которое выражает условие равновесия жидкости (основное уравнение гидростатики):

$$P_{\text{абс}} = P_0 + \rho gh$$

где  $P_0$  – давление на поверхности жидкости;  $\rho g$  ( $\gamma$ ) – удельный вес жидкости;  $h$  – глубина погружения точки.

Абсолютное давление может быть меньше атмосферного ( $P_{\text{абс}} < P_{\text{атм}}$ ).

Избыточное (манометрическое) давление  $P_{\text{изб}}$  – это давление сверх атмосферного, т.е.

$$P_{\text{изб}} = P_{\text{абс}} - P_{\text{атм}} \quad \text{или} \quad P_{\text{изб}} = P_0 + \rho gh - P_{\text{атм}}$$

Если давление на поверхности жидкости равно атмосферному (в открытых резервуарах), то манометрическое давление

$$P_{\text{изб}} = \rho gh$$

Абсолютное давление может быть меньше атмосферного ( $P_{\text{абс}} < P_{\text{атм}}$ ). В этом случае разность между атмосферным и абсолютным давлением называется вакуумметрическим давлением  $P_{\text{вак}} = P_{\text{атм}} - P_{\text{абс}}$

Таким образом, вакуумметрическое давление означает недостаток до атмосферного.

Применяемые в гидротехнической практике единицы измерения давления и их взаимная связь следующие:

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2 = 104 \text{ кг/м}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па} = 735,6 \text{ мм рт.ст.} = 10 \text{ м вод.ст.}$$

Для измерения давления применяется много приборов, которые можно классифицировать по следующим признакам:

- а) по роду измеряемой величины;
- б) принципу действия;
- в) классу точности.

По роду измеряемой величины приборы разделяются:

1. Приборы для измерения атмосферного давления  $P_{\text{атм}}$  – барометры.
2. Приборы для измерения разности абсолютного и атмосферного давления, т.е. избыточного давления  $P_{\text{изб}}$  и вакуума  $P_{\text{вак}}$ . Приборы, измеряющие избыточное давление называют манометрами, приборы, измеряющие вакуум, – вакуумметрами. Приборы, которыми можно измерять избыточное давление и вакуум, называют мановакуумметрами.

3. Приборы для измерения абсолютного давления  $P$  – манометры абсолютного давления. Абсолютное давление можно измерять также с помощью барометра и манометра, если измеряемое давление больше атмосферного ( $P = P_{\text{атм}} + P_{\text{изб}}$ ), а также барометра и вакуумметра, если измеряемое давление меньше атмосферного ( $P = P_{\text{атм}} - P_{\text{вак}}$ ). Манометры абсолютного давления обычно применяют для измерения малых абсолютных давлений.

4. Приборы для измерения разности давлений – дифференциальные манометры.

5. Приборы для измерения малого избыточного давления и вакуума – микроманометры.

По принципу действия различают приборы жидкостные, пружинные, поршневые, электрические и комбинированные.

К жидкостным относятся приборы, основанные на гидростатическом принципе действия, заключающемся в том, что измеряемое давление уравнивается давлением, создаваемым весом столба жидкости, высота которого служит мерой давления. Основными преимуществами жидкостных приборов является простота устройства и точность измерений. Однако большие габариты, малые значения измеряемых давлений (не более 4 ат для ртутных приборов) и вредность паров ртути являются существенными недостатками этих приборов.

К жидкостным приборам относят: ртутный барометр (рис. 1), пьезометр (рис.2), U-образный манометр (рис.3), дифференциальный манометр (рис.4).

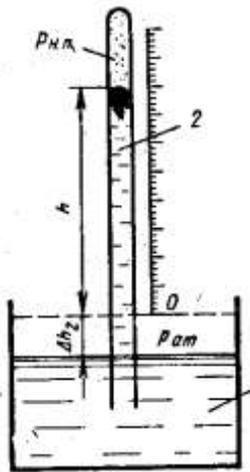


Рис. 1 Ртутный барометр

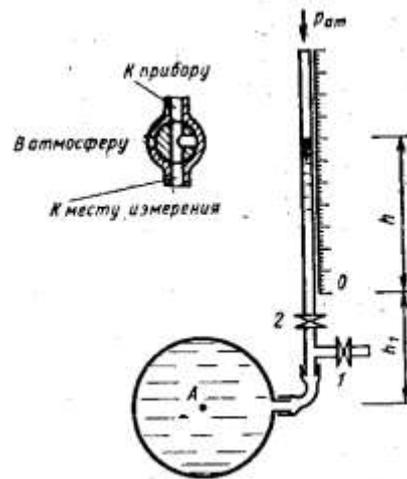


Рис. 2 Пьезометр и трехходовой кран

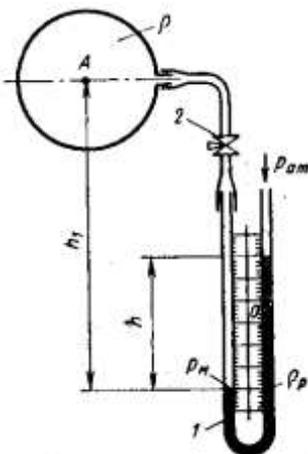


Рис.3 U-образный манометр

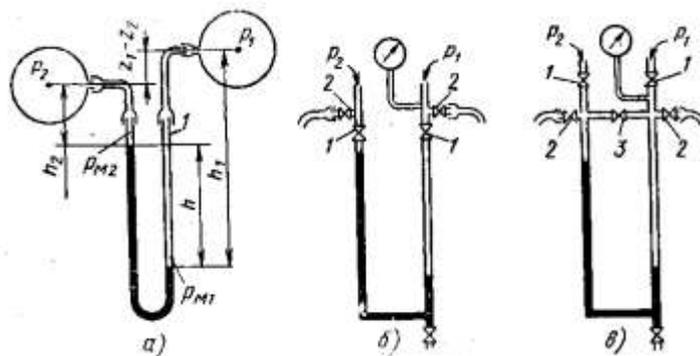


Рис. 4 Дифференциальные манометры

Ртутный барометр состоит из открытой в атмосферу чашки 1, заполненной ртутью, и стеклянной трубки 2, верхний конец которой запаян, а нижний опущен под уровень ртути. Воздух из трубки предварительно удален, в силу чего трубка заполняется насыщенным паром ртути. Атмосферное давление, действуя на поверхность ртути в чашке, поднимает ртуть в трубке на высоту  $h$ , при которой сумма давлений столба ртути и паров ртути уравнивается атмосферным давлением. Для отсчета этой высоты (показания прибора) служит линейная шкала.

Пьезометр применяется для измерения положительных и отрицательных избытков давления над атмосферным и представляет собой стеклянную трубку с открытым в атмосферу верхним концом. Нижний конец пьезометра соединяется с местом измерения давления.

U-образный манометр представляет собой U-образную стеклянную трубку 1, заполненную до некоторого уровня рабочей жидкостью. Жидкость используемая в качестве рабочей, должна быть маловязкой и иметь малый коэффициент теплового расширения. Обычно в качестве рабочих жидкостей используют воду, спирт, ртуть, бромистый этилен, бромистый этил. Конец одной ветви манометра соединяется с местом измерения, конец другой ветви открыт в атмосферу. Для отключения прибора и удаления из него воздуха на соединительной трубке установлен трехходовой кран 2. Если давление  $P_m$  на уровне рабочей жидкости в левой ветви манометра больше атмосферного, то жидкость в правой ветви поднимается. Разность высот уровней жидкости в

ветвях является показанием прибора. Для отсчета показаний прибор снабжен шкалой.

Дифференциальный манометр применяется для измерения разности давлений. Разность давлений можно определить измерением каждого из давлений в отдельности.

Действие пружинных манометров основано на применении закона Гука. Сила давления деформирует упругий элемент прибора – пружину, которая может представлять собой полую трубку, мембрану, сильфон и т.п. Деформация упругого элемента, вызванная давлением, по закону Гука пропорциональна давлению и служит его мерой.

Наибольшее распространение получили пружинные манометры с трубкой Бурдона (рис. 5). При повышении давления трубка Бурдона 1 стремится распрямиться вследствие того, что при давлении большем атмосферного равнодействующая сил, приложенных к внешней и внутренней поверхностям, направлена наружу.

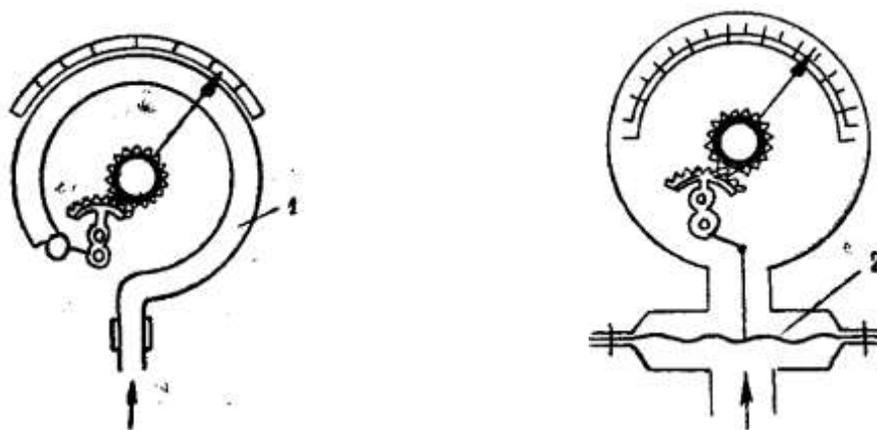


Рис. 5 Пружинные манометры с трубкой Бурдона

Помимо возможности измерять высокие давления к достоинствам механических манометров относятся их небольшие габариты. К недостаткам следует отнести сложность тарировки и изменение точности показаний с течением времени.

В основу измерения давлений поршневыми приборами положен закон равновесия твердого тела, находящегося под воздействием жидкости. Сила

измеряемого давления жидкости, приложенная к поршню прибора, уравнивается внешней силой, величина которой служит мерой давления. В том случае, когда внешней силой является вес грузов, нагружающих поршень, приборы называются грузопоршневыми.

Грузопоршневой манометр состоит из цилиндра 3, заполненного жидкостью, и плунжера 2, пришлифованного к цилиндру и опущенного нижним концом в жидкость. Зазор между цилиндром и плунжером не превышает нескольких микрометров на сторону. Уплотнения между плунжером и цилиндром отсутствуют. На верхнем конце плунжера установлена тарелка 1 для размещения грузов (грузоприемная тарелка). Полость цилиндра соединяется с местом измерения трубкой 4 с трехходовым краном 5. При измерении давления кран 5 открыт и на плунжер, кроме его собственного, действует сила давления жидкости, равная  $PF$  ( $P$  – измеряемое давление,  $F$  – площадь плунжера). Измерение давления сводится к подбору груза, при котором вес подвижной части прибора уравнивает силу измеряемого давления и силу трения между плунжером и вытекающей через зазор жидкостью.

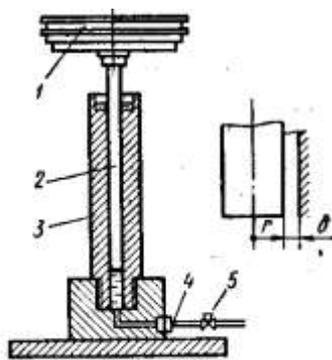


Рис. 6 Грузопоршневой манометр

Действие электрических приборов основано на использовании пропорциональности между изменением некоторых электрических свойств материалов и изменением давления. В электрических приборах приемным элементом, преобразующим величину давления в сигнал, является датчик давления (индуктивный, емкостный, полупроводниковый и т.д.). Например,

омическое сопротивление некоторых сплавов пропорционально давлению окружающей среды; это свойство используется при измерении высоких давлений. Величина электрических зарядов, появляющихся на поверхности кристаллического диэлектрика при сжатии и растяжении кристалла, пропорциональна действующему давлению; это свойство используется при измерении быстропеременных давлений.

Действие электрических приборов для измерения давления основано на свойстве проводников изменять электрическое сопротивление при деформации. Электрический проволоочный датчик давления представляет собой тонкую проволоку 1 (диаметром 0,025 – 0,03 мм), изготовленную из сплава с высоким электрическим сопротивлением и изогнутую, как показано на рис. 7. Проволока помещена между двумя слоями изоляционной пленки 2.



Рис. 7 Датчик давления и измерительный мост

Для измерения давления датчик наклеивают на упругий элемент, деформирующийся под действием измеряемого давления, и включают в одно из плеч моста Уитстона. Три другие плеча моста подбирают так, чтобы при разгруженном датчике мост был сбалансирован. Электрические датчики

Преимуществами датчиков являются малые размеры и масса, возможность измерять малые давления, малая инерционность, доступность дистанционных измерений. Электрические манометры используются в случаях, когда приборы других типов непригодны (измерение сверхвысоких, переменных давлений).

К комбинированным относятся приборы, принцип действия которых носит смешанный характер (например, электромеханические приборы).

Серийно выпускаемые приборы разделяются по классу точности. Классом точности прибора называется число, выражающее максимальное значение допустимой погрешности в процентах от предельного значения шкалы прибора. Установлены следующие классы точности приборов для измерения давления: 0,005; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 1,0; 2,0; 2,5; 4,0; 6,0. Приборы классов точности 0,5 – 6,0 используются как рабочие.

Основными характеристиками приборов, измеряющих давление, являются класс точности, диапазон измеряемых давлений, чувствительность, быстродействие и линейность (линейность прибора – линейная зависимость между измеряемой величиной и показанием прибора).

Все технические приборы для измерения давлений необходимо периодически проверять. Проверку приборов называют тарировкой.

Приборы, используемые только для целей проверки, называют образцовыми.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое гидростатическое давление? Какими свойствами оно обладает?
2. Напишите и объясните смысл основного уравнения гидростатики.
3. Что называется абсолютным давлением, избыточным давлением, вакуумом?
4. Какова наибольшая возможная величина вакуума? Чем она ограничивается?
5. Сформулируйте закон Паскаля и приведите примеры его практического применения.
6. Каковы достоинства и недостатки жидкостных манометров?
7. Каковы достоинства и недостатки механических манометров?
8. Почему трубка Бурдона с повышением давления распрямляется?
9. Объясните принцип действия основных приборов для измерения давления.

10. Что характеризует класс точности прибора?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ**

*Цели работы:*

1. Визуальное изучение ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости на напорном трубопроводе.
2. Определение чисел Рейнольдса при ламинарном и турбулентном движениях.

#### **Краткие теоретические сведения**

Для вязкой жидкости возможны два качественно отличных друг от друга режима движения: ламинарный и турбулентный.

Ламинарным режимом движения называется слоистое упорядоченное движение без перемешивания частиц жидкости по сечению.

Турбулентный режим движения характеризуется беспорядочным движением, при котором имеет место интенсивное перемешивание частиц жидкости, а также пульсация скорости (изменение вектора скорости частиц во времени).

Переход от ламинарного движения к турбулентному связан с потерей устойчивости движения. Под устойчивостью понимают способность объемов жидкости возвращаться к положению равновесия или равномерного движения при отклонении от этого положения под действием случайных возмущений.

При небольших скоростях режим движения является ламинарным (слоистым). Подкрашенная жидкость, введенная в поток, движется в нем в виде отдельной струйки, не смешиваясь с остальной массой жидкости (удельный вес подкрашенной жидкости должен быть примерно равен удельному весу жидкости, находящейся в напорном баке). Плавно увеличивая скорость, можно наблюдать, что при некотором значении

скорости движение подкрашенной струйки жидкости станет волнообразным. При последующем увеличении скорости струйка на отдельных участках разрывается и теряет свою отчетливую форму. В дальнейшем она полностью смешивается с жидкостью, протекающей в трубе, и движение становится турбулентным.

Экспериментально установлено, что переход от ламинарного движения к турбулентному характеризуется безразмерным комплексом – числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{vL}{\nu}$$

где  $v$  - средняя скорость потока;  $L$  - характерный линейный размер;  $\nu$  - коэффициент кинематической вязкости воды, зависящий от температуры (табл. 1).

Таблица 1 – Значения коэффициента кинематической вязкости в зависимости от температуры

| t, °C | $\nu$ , см <sup>2</sup> /с | t, °C | $\nu$ , см <sup>2</sup> /с |
|-------|----------------------------|-------|----------------------------|
| 0     | 0,0179                     | 16    | 0,0112                     |
| 1     | 0,0173                     | 17    | 0,0109                     |
| 2     | 0,0167                     | 18    | 0,0106                     |
| 3     | 0,0162                     | 19    | 0,0104                     |
| 4     | 0,0157                     | 20    | 0,0101                     |
| 5     | 0,0152                     | 22    | 0,00989                    |
| 6     | 0,0148                     | 24    | 0,00919                    |
| 7     | 0,0147                     | 26    | 0,00877                    |
| 8     | 0,0139                     | 28    | 0,00839                    |
| 9     | 0,0135                     | 30    | 0,00808                    |
| 10    | 0,0131                     | 35    | 0,00725                    |
| 11    | 0,0127                     | 40    | 0,00659                    |
| 12    | 0,0124                     | 45    | 0,00608                    |
| 13    | 0,0121                     | 50    | 0,00556                    |
| 14    | 0,0118                     | 55    | 0,00515                    |
| 15    | 0,0115                     | 60    | 0,00478                    |

В общем случае число  $Re$  представляет собой отношение сил инерции к силам вязкости, действующим на частицы жидкости в реальном потоке.

Для напорного движения в круглых трубах определяющим размером является диаметр трубы ( $L = d$ ):

$$Re = \frac{v_{\text{ср}} d}{\nu}$$

где  $d$  – диаметр трубы.

Для открытых потоков (безнапорное течение), а также для некруглого сечения характерным размером является гидравлический радиус.

Средняя скорость потока  $v_{\text{ср}}$  определяется из уравнения расхода:

$$v_{\text{ср}} = \frac{Q}{S}$$

где  $Q$  – расход, определяемый в данной лабораторной работе по тарировочному графику;  $S$  – площадь поперечного сечения трубы.

Переход одного режима движения в другой происходит при определенном числе Рейнольдса, которое называется критическим  $Re_{\text{кр}}$ . Принято считать, что для круглых труб  $Re_{\text{кр}} = 2320$ . При числах  $Re < Re_{\text{кр}}$  движение ламинарное, при  $Re > Re_{\text{кр}}$ , как правило, турбулентное.

На практике чаще всего встречается турбулентное движение; ламинарное имеет место при течении вязких жидкостей (смазочные масла, глицерин т.п.).

### Порядок выполнения работы

1. Замеряют температуру воды в баке и по табл. 1 определяют значение коэффициента вязкости  $\nu$ .
2. Частично открывают клапан 1 (рис. 8) и создают наименьшую скорость движения в стеклянной трубке 2.
3. Открывают кран 3 на подводящей трубке 5 и подают струйку подкрашенной жидкости из бачка 6 в стеклянную трубу.
4. При помощи двух пьезометров, установленных на расходомерной шайбе 4, и тарировочного графика определяют расход жидкости  $Q$ .

5. С помощью клапана 1 создают новый режим движения жидкости в стеклянной трубе. Опыты повторяют 3 - 4 раза.

6. При некотором новом режиме движения подкрашенная струйка начинает колебаться, приобретая волнистый характер с местными разрывами. При этом происходит смена режима движения.

7. Дальнейшее увеличение скорости открытия клапана 1 приводит к развитому турбулентному режиму. При этом режиме опыты повторяют 3 – 4 раза.

8. Определяют числа  $Re$  при каждом режиме и записывают в табл. 2 режимы движения жидкости.

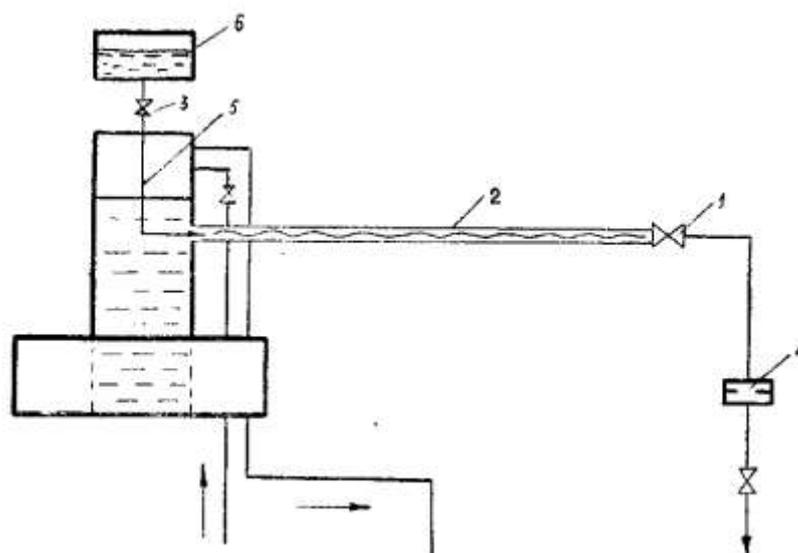


Рис. 8 Схема установки

Таблица 2 – Результаты замеров

| $\Delta h,$<br>см | $Q,$<br>см <sup>3</sup> /с | $v,$<br>см/с | $t,$<br>°С | $v_s,$<br>см <sup>2</sup> /с | $Re$ | Режим<br>движения |
|-------------------|----------------------------|--------------|------------|------------------------------|------|-------------------|
|                   |                            |              |            |                              |      |                   |

### Контрольные вопросы

1. Что называется ламинарным режимом движения жидкости?
2. Что называется турбулентным режимом движения жидкости?
3. Что такое вязкость? Укажите размерности коэффициентов вязкости и их соотношение.

4. Каков физический смысл критерия Рейнольдса?
5. Чему равно число Рейнольдса для круглых труб?
6. Что такое характерный линейный размер?

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

*Цели работы:*

1. На напорном трубопроводе переменного сечения проследить по приборам переход энергии в потоке из одного вида в другой.
2. Построить по опытным данным пьезометрическую и напорную линии.

#### Краткие теоретические сведения

Уравнение Бернулли устанавливает соотношение между скоростью движения жидкости и гидростатическим давлением для любых двух сечений потока:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \sum h_{\omega}$$

Индексы «1» и «2» указывают сечения, в которых определяется соответствующая высота (напор).

В гидравлике энергия, отнесенная к единице веса жидкости, называется напором.

Входящие в уравнение слагаемые и уравнение в целом можно характеризовать с геометрической и энергетической точек зрения следующим образом.

С геометрической точки зрения:

$z$  – геометрическая высота (высота положения) любой выбранной точки в живом сечении потока над плоскостью сравнения;

$\frac{P}{\gamma}$  – пьезометрическая высота (высота давления) – высота такого столба

жидкости с объемным весом  $\gamma$ , который у своего основания создает давление  $P$ ;

$z + \frac{P}{\gamma}$  - гидростатический напор (высота);

$\alpha \frac{v^2}{2g}$  - скоростная высота (напор), где  $\alpha$  - коэффициент Кориолиса,

характеризующий неравномерность распределения местных скоростей по живому сечению;

$z + \frac{P}{\gamma} + \alpha \frac{v^2}{2g}$  - гидродинамический (полный) напор (высота).

Представляет собой удельную (отнесенную к единице веса) механическую энергию, проносимую потоком через это сечение.

С энергетической точки зрения:

$z$  – удельная (отнесенная к единице веса) энергия положения жидкости;

$\frac{P}{\gamma}$  - удельная энергия давления;

$z + \frac{P}{\gamma}$  - удельная потенциальная энергия;

$\alpha \frac{v^2}{2g}$  - среднее значение удельной кинетической энергии;

$\sum h_{\omega}$  – значение потерь удельной энергии между сечениями.

Представляет собой уменьшение удельной механической энергии потока на участке между сечениями 1 и 2, происходящее в результате работы сил внутреннего трения, сопровождающейся переходом части механической энергии потока в тепловую энергию.

Таким образом, уравнение Бернулли является уравнением баланса энергии в потоке жидкости. Из уравнения следует, что по длине потока с ростом давления (пьезометрического напора) скорости уменьшаются, и наоборот – с увеличением скоростей уменьшается давление.

Уравнение Бернулли можно изобразить на графике, называемом диаграммой уравнения Бернулли (рис. 9), где I – пьезометрическая линия, II – линия гидродинамического (полного) напора, III – линия первоначального напора.

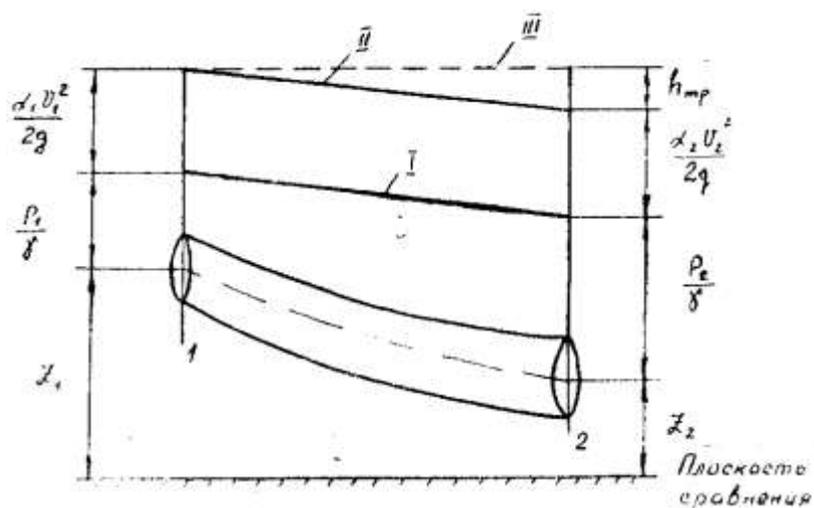


Рис. 9 Диаграмма уравнения Бернулли

### Порядок выполнения работы

1. Проверяют показания пьезометров. Если пьезометры показывают разные уровни, это означает, что в них имеется воздух. В этом случае необходимо несколько раз сдвинуть пальцами резиновые трубки, чтобы удалить воздух.

2. Открывают клапан 2 и создают движение воды в исследуемом трубопроводе (рис. 10).

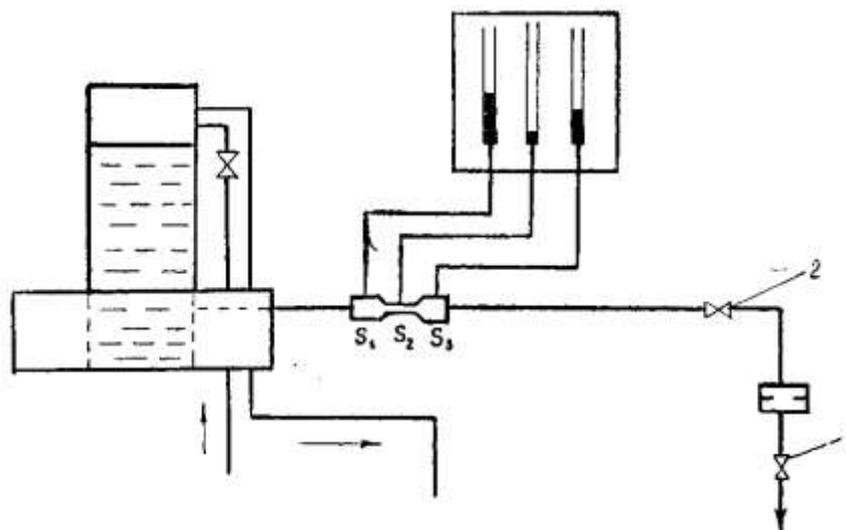


Рис. 10 Схема установки

3. Снимают показания пьезометров, установленных в сечениях  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ . Результаты заносят в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты замеров

| Сечения | Площадь сечения $S$ , см | Режим I                    |                           |   |                                 |             | Режим II                   |                           |   |                                 |             |
|---------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|---|---------------------------------|-------------|----------------------------|---------------------------|---|---------------------------------|-------------|
|         |                          | $Q_1 =$                    |                           |   |                                 |             | $Q_2 =$                    |                           |   |                                 |             |
|         |                          | $\frac{P}{\gamma}$ ,<br>см | $v_{\text{ср}}$ ,<br>см/с | $\alpha \frac{v_{\text{ср}}^2}{2g}$ ,<br>см | $\Sigma h_{1-\text{п}}$ ,<br>см | $H$ ,<br>см | $\frac{P}{\gamma}$ ,<br>см | $v_{\text{ср}}$ ,<br>см/с | $\alpha \frac{v_{\text{ср}}^2}{2g}$ ,<br>см | $\Sigma h_{1-\text{п}}$ ,<br>см | $H$ ,<br>см |
| 1       |                          |                            |                           |   |                                 |             |                            |                           |   |                                 |             |
| 2       |                          |                            |                           |   |                                 |             |                            |                           |   |                                 |             |
| 3       |                          |                            |                           |   |                                 |             |                            |                           |   |                                 |             |

4. Определяют разность  $\Delta h$  показаний пьезометров расходомерной шайбы 1 и по тарировочному графику находят величину расхода воды  $Q$ .

5. При помощи клапана 2 изменяют режим движения и повторяют операции по пп. 2 – 4.

### Обработка результатов

1. Пьезометры, установленные в трех сечениях, показывают высоту

$$h = \frac{P}{\gamma}$$

2. Средняя скорость в каждом сечении определяется из уравнения расхода

$$v_{\text{ср}} = \frac{Q}{S}$$

3. Скоростной напор в сечениях находят по формуле

$$h_{\text{ск.н.}} = \alpha \frac{v_{\text{ср}}^2}{2g}$$

где  $\alpha = 1,1$ .

4. Определяют суммарную потерю напора между первым и последующим сечениями:

$$\sum h_{1-\text{п}} = \frac{P_1 - P_{\text{п}}}{\gamma} + \alpha \frac{v_{\text{ср.1}}^2 - v_{\text{ср.п}}^2}{2g}$$

5. Для двух расходов строят пьезометрические линии (по значениям  $\frac{P}{\gamma}$ ) и линии полного напора (по значениям суммы  $\frac{P}{\gamma} + \alpha \frac{v_{\text{ср}}^2}{2g}$ ).

Правильность построения пьезометрических и напорных линий можно проверить, вычислив значение первоначального напора, которое должно быть одинаковым для трех сечений:

$$H = \frac{P}{\gamma} + \alpha \frac{v_{\text{ср}}^2}{2g} + \sum h_{1-\text{п}}$$

### Контрольные вопросы

1. В чем геометрический смысл уравнения Бернулли?
2. В чем энергетический смысл уравнения Бернулли?
3. Какую размерность имеют все слагаемые уравнения Бернулли?
4. Чем отличается уравнение Бернулли для реальной жидкости от уравнения Бернулли для идеальной жидкости?
5. Чем отличается уравнение Бернулли для потока жидкости от уравнения Бернулли для элементарной струйки?
6. Из чего складываются потери напора? От чего они зависят?
7. К каким выражениям приводится уравнение Бернулли в случае:  
а) неподвижной жидкости; б) равномерного движения без местных сопротивлений?
8. Приведите примеры практического применения уравнения Бернулли?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4 ТАРИРОВКА РАСХОДОМЕРА

*Цели работы:*

1. Определение среднего арифметического значения постоянной расходомера  $C$  с помощью трубопровода.
2. Определение среднего значения коэффициента расхода  $\mu$ .

3. Построение графика зависимости  $Q = f(h)$ .
4. Построение графика зависимости  $\mu = f(Re)$ , определение нижней границы квадратичной зоны, в пределах которой  $\mu = const$ .

### Краткие теоретические сведения

На практике широкое применение получил способ измерения расхода жидкостей и газов с помощью сужающих устройств: а) - диафрагм, б) - сопел, в) – труб Вентури (рис. 11).

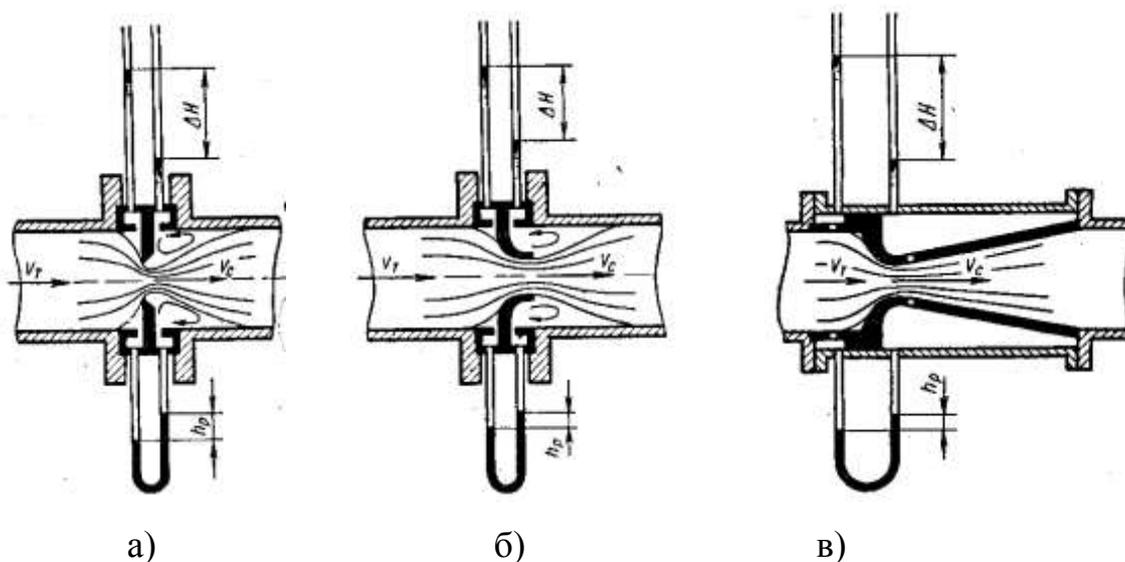


Рис. 11 Сужающие устройства

Из приведенных схем видно, что диафрагма является конструктивно наиболее простым прибором. Однако она имеет наибольшее гидравлическое сопротивление и вызывает значительные потери напора. Кроме того, острая кромка отверстия диафрагмы быстро изнашивается, что влечет за собой изменение коэффициента расхода. Наиболее совершенной в отношении гидравлического сопротивления является труба Вентури.

Этот способ основан на создании в потоке перепада давлений путем уменьшения его сечения. Между получаемыми таким образом перепадами давления и скоростью имеется определенная зависимость.

Для выявления вида этой зависимости воспользуемся уравнением Бернулли для двух сечений: перед входом в сужающее устройство и в месте наибольшего сжатия. Пренебрегая потерями энергии на коротком участке и

принимая  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ , для горизонтальной трубки имеем:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$\text{откуда } P_1 - P_2 = \frac{\gamma}{2g} v_2^2 \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Из уравнения неразрывности  $v_1 S_1 = v_2 S_2$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}$$

$$\text{где } S = \frac{\pi d^2}{4}.$$

Подставляя эту зависимость в уравнение (1), получим

$$P_1 - P_2 = \frac{\gamma}{2g} v_2^2 \left[ 1 - \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right].$$

Отсюда скорость

$$v = \sqrt{\frac{\frac{2g}{\gamma} (P_1 - P_2)}{1 - \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2}} = \sqrt{\frac{2gh}{1 - \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2}}$$

расход

$$Q = S_2 v_2 = S_2 \sqrt{\frac{2gh}{1 - \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2}} = C \sqrt{h}$$

Величина  $C = S_2 \sqrt{\frac{2g}{1 - \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2}}$  зависит от соотношения диаметров широкой и узкой частей и называется постоянной расходомера.

Фактически расход  $Q_\phi$  с учетом потерь напора на сопротивление будет меньше расхода  $Q$ :

$$Q_\phi = \mu C \sqrt{h} \quad (2)$$

где  $\mu$  - коэффициент расхода (меньше единицы).

Если фактический расход  $Q_{\text{ф}}$  в трубопроводе измерить объемным способом, то из формулы (2) можно определить коэффициент расхода  $\mu$ .

### Порядок выполнения работы

1. Проверяют отсутствие воздуха в пьезометрах.
2. Клапаном 2 (рис. 10) устанавливают режим движения воды.
3. Определяют фактический расход  $Q_{\text{ф}}$  объемным способом. Для этого измеряют длину  $L$  и ширину  $B$  бака, засекают время и по водомерной трубке отмечают высоту  $H$ , на которую опустится уровень воды в баке.
4. Снимают показания пьезометров в сечениях  $S_1$  и  $S_2$ , перепад потенциальных напоров  $h$  и заносят показания в табл. 4.
5. Опыт повторяют при других расходах, регулируя  $Q$  клапаном 2.

Таблица 4 – Результаты замеров

| Показатели                        | Единица измерения | Опыты |   |   |   |   |
|-----------------------------------|-------------------|-------|---|---|---|---|
|                                   |                   | 1     | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Площадь широкой части $S_1$       |                   |       |   |   |   |   |
| Площадь узкой части $S_2$         |                   |       |   |   |   |   |
| Постоянная расходомера $C$        |                   |       |   |   |   |   |
| Фактический расход $Q_{\text{ф}}$ |                   |       |   |   |   |   |
| Перепад уровней $h$               |                   |       |   |   |   |   |
| Коэффициент расхода $\mu$         |                   |       |   |   |   |   |
| Средняя скорость $v_{\text{ср}}$  |                   |       |   |   |   |   |
| Число Рейнольдса $Re$             |                   |       |   |   |   |   |

### Обработка результатов

1. Определяют площади поперечных сечений трубы Вентури

$$S = \frac{\pi d^2}{4}$$

2. Вычисляют фактический расход

$$Q_{\text{ф}} = \frac{LBH}{\tau}$$

где  $L$ ,  $B$  – соответственно длина и ширина бака, см;  $H$  – высота, на которую опустился уровень воды в баке, см;  $\tau$  – время опыта, с.

3. Определив постоянную расходомера  $C$  двумя способами:

а) по формуле

$$C = S_1 S_2 \sqrt{\frac{2g}{S_1^2 - S_2^2}}$$

б) через фактический расход для проведенных опытов

$$C_0 = \frac{Q_\Phi}{\sqrt{h}}$$

находят среднее арифметическое значение  $C_{0\text{ср}}$ .

4. Вычисляют коэффициент расхода

$$\mu = \frac{Q_\Phi}{C\sqrt{h}}$$

и его среднее арифметическое значение  $\mu_{\text{ср}}$ .

5. Определяют среднюю скорость потока

$$v_{\text{ср}} = \frac{Q_\Phi}{S_1}$$

6. Находят значение числа  $Re$  для каждого опыта:

$$Re = \frac{v_{\text{ср}} d_1}{\nu}$$

7. Строят графики зависимостей  $Q=f(h)$  и  $\mu = f(Re)$  и делают выводы по результатам опытов.

### Контрольные вопросы

1. Какие способы измерения расхода жидкости известны?
2. Объясните принцип действия расходомера Вентури.
3. Что такое постоянная расходомерного устройства и зависит ли она от рода жидкости.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

### ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПО ДЛИНЕ ТРУБОПРОВОДА

*Цели работы:*

1. Определение коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  при различных скоростях движения жидкости на экспериментальном трубопроводе.
2. Вычисление коэффициента  $\lambda$  по формулам для соответствующей области сопротивления и сравнение его с опытным значением.
3. Построение графика зависимости опытных значений  $\lambda_0$  от числа Рейнольдса.

#### **Краткие теоретические сведения**

При движении реальных жидкостей наличие сил трения приводит к появлению касательных напряжений. Внутренние силы трения создают сопротивление движению, на преодоление которого затрачивается часть энергии потока, переходящая в тепло. Поэтому удельная механическая энергия (полный напор) потока вдоль трубы уменьшается. Это уменьшение напора называют потерей напора на трение по длине трубопровода.

Поверхности, внутри которых протекает поток, оказывают на него тормозящее воздействие. С механической точки зрения действие указанных поверхностей на поток эквивалентно действию напряжений, которые непрерывно распределены по внешним границам потока. Касательные составляющие этих напряжений (напряжений трения) создают сопротивление движению потока, т.е. сопротивление трения.

Потеря механической энергии потока на преодоление сопротивления трения называется потерей энергии на трение по длине или просто потерей по длине.

Потери напора по длине определяются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$h_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

где  $\lambda$  - коэффициент трения (коэффициент Дарси);  $l$  и  $d$  - соответственно длина и диаметр трубопровода;  $v$  - средняя скорость потока.

Коэффициент  $\lambda$  является безразмерной переменной величиной, зависящей от вязкости жидкости, диаметра и шероховатости трубы. В общем виде:  $\lambda = f(Re, \varepsilon)$ ,

где  $\varepsilon = k/r$  - относительная шероховатость;  $k$  - высота выступов шероховатости;  $r$  - радиус трубы.

Влияние указанных факторов на величину  $\lambda$  проявляется в зависимости от числа Рейнольдса: в области малых чисел  $Re$  на величину  $\lambda$  в большей степени влияет скорость, в области больших чисел  $Re$  - относительная шероховатость.

Характер влияния  $Re$  и  $\varepsilon$  на сопротивление труб виден из графика Никурадзе (рис. 12).

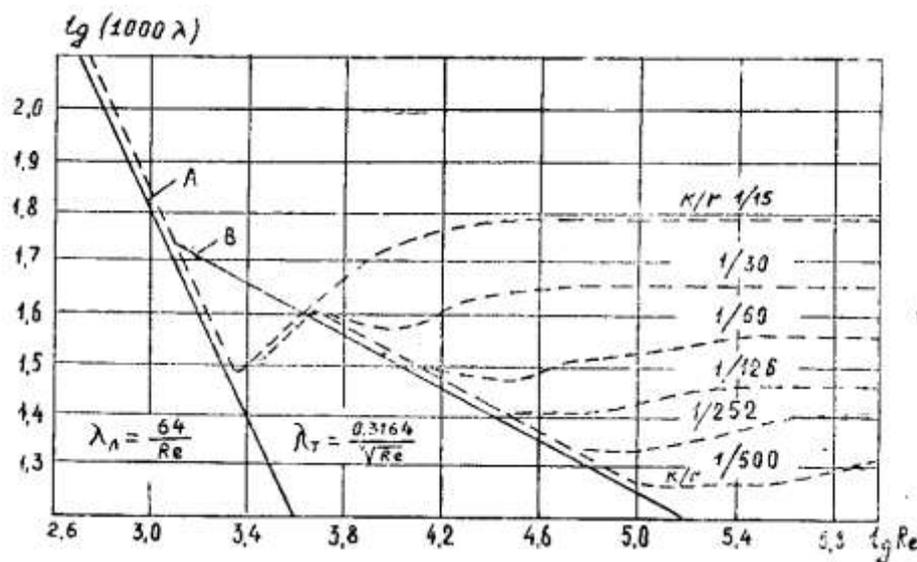


Рис. 12 График Никурадзе

Можно отметить следующие пять зон зависимости  $\lambda$  от  $Re$  и  $\varepsilon$ .

Первая зона – зона ламинарного потока, ограниченная значением  $Re < 2300$ , в которой  $\lambda$  зависит только от  $Re$  и не зависит от  $\varepsilon$ . Значение  $\lambda$  определяется по формуле Пуазейля:

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

Вторая зона – неустойчивая зона,  $2300 \leq Re \sim 4000$ . Изменение структуры потока сопровождается колебаниями  $\lambda$ . Трубопроводы с движением в этой зоне проектировать не рекомендуется.

Все остальные зоны сопротивления находятся в зоне турбулентного режима с различной степенью турбулентности.

Третья зона – зона малых чисел  $Re$  и  $\varepsilon$  ( $\sim 4000 < Re < 10 \frac{d}{k}$ ) называется зоной гидравлически гладких труб. В этой зоне  $\lambda$  не зависит от шероховатости и определяется по формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$$

Четвертая зона – переходная от гидравлически гладких труб к шероховатым, зона доквадратичного сопротивления,  $10 \frac{d}{k} < Re < 500 \frac{d}{k}$ . Коэффициент  $\lambda$  зависит одновременно от  $Re$  и  $\varepsilon$  (так как в этой зоне толщина ламинарной пленки уменьшается, вершины выступов создают дополнительную турбулентность и сопротивления в потоке).

Пятая зона – зона квадратичного сопротивления, где коэффициент  $\lambda$  не зависит от  $Re$ , а определяется лишь относительной шероховатостью  $\varepsilon$  (при больших толщинах пленки практически равна нулю, а каждый выступ способствует вихреобразованию).

Потеря напора оказывается пропорциональной квадрату скорости потока  $h = av^2$ , что и объясняет название этой зоны.

Получение расчетных формул для определения коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  для IV и V зон труб с естественной шероховатостью затруднено тем обстоятельством, что шероховатость не может быть объяснена лишь величиной выступов  $k$  (реальные трубы имеют различную высоту выступов).

Поэтому при практических расчетах вводится понятие эквивалентной абсолютной шероховатости  $k_э$ , которая эквивалентна искусственной шероховатости в опытах Никурадзе. Для определения  $\lambda$  рекомендуется универсальная формула А.Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{k_э}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25}$$

Предельные значения  $k_э$  для некоторых труб приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Предельные значения  $k_э$  для некоторых труб

| Трубы                                 | $k_э$ , мм |
|---------------------------------------|------------|
| Стеклянные                            | 0,000      |
| Высококачественные стальные бесшовные | 0,06÷0,20  |
| Стальные                              | 0,1÷0,5    |
| Стальные бывшие в употреблении        | 0,2÷0,5    |
| Чугунные                              | 0,2÷1,0    |

При малых  $Re$  ( $<10 \frac{d}{k_э}$ ) формула Альтшуля переходит в формулу Блазиуса для гладких труб, а при больших  $Re$  ( $>500 \frac{d}{k_э}$ ) обращается в формулу Шифринсона для шероховатых труб:

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{k_э}{d} \right)^{0.25}$$

Таким образом, путем сравнения численного значения отношения  $\frac{d}{k_э}$  с числом  $Re$  можно установить границы указанных зон (режимов) турбулентного течения в шероховатых трубах.

### Порядок выполнения работы

1. Проверяют отсутствие воздуха в пьезометрах.
2. Измеряют температуру воды в напорном баке.
3. Открывают клапаны 1 и 2 (рис. 13) и устанавливают не менее пяти режимов движения воды.
4. При каждом установившемся режиме снимают показания пьезометров 3 и 5, установленных в начале и в конце трубопровода. Данные заносят в табл. 6.
5. По показаниям пьезометра 4 на расходомерной шайбе 6 с помощью тарировочного графика определяют расход  $Q$ .

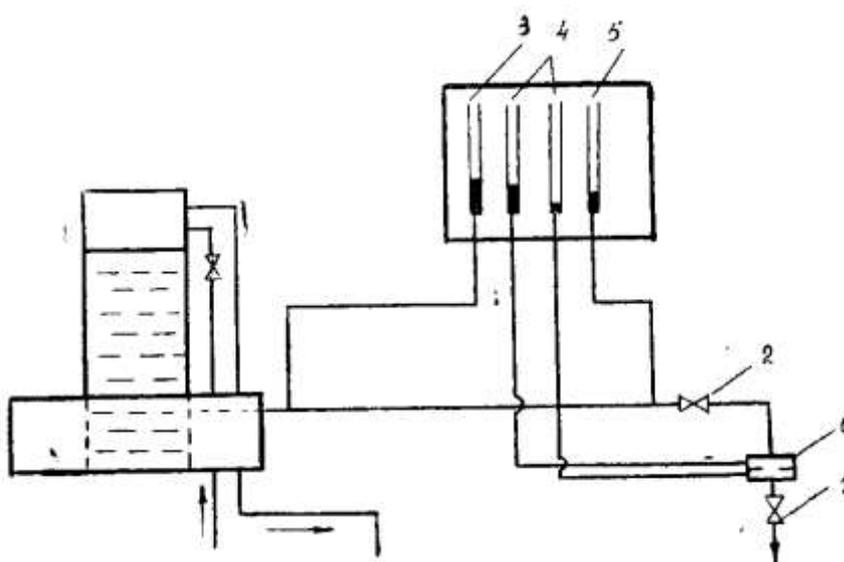


Рис. 13 Схема установки

Таблица 6 – Результаты замеров

| Показатели                                     | Единица измерения | Режим |   |   |   |   |
|--|-------------------|-------|---|---|---|---|
|  |                   | 1     | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Площадь сечения, $S$                           |                   |       |   |   |   |   |
| Расход по расходомеру, $Q$                     |                   |       |   |   |   |   |
| Средняя скорость, $v$                          |                   |       |   |   |   |   |
| Коэффициент кинематической вязкости, $\nu$     |                   |       |   |   |   |   |
| Число Рейнольдса, $Re$                         |                   |       |   |   |   |   |
| Потеря напора на участке, $h$                  |                   |       |   |   |   |   |
| Коэффициент эквивалентной шероховатости, $k_s$ |                   |       |   |   |   |   |

|  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|
| Опытное значение коэффициента Дарси, $\lambda_0$ |  |  |  |  |  |  |
| Расчетное значение коэффициента Дарси, $\lambda$ |  |  |  |  |  |  |

### Обработка результатов

1. Среднюю скорость движения в трубопроводе определяют из уравнения неразрывности

$$v = \frac{Q}{S}$$

2. При данной температуре воды с помощью табл. 1 находят коэффициент кинематической вязкости и определяют число Рейнольдса:

$$Re = \frac{vd}{\nu}$$

3. По значению  $Re$  делают заключение о характере режима движения воды в трубопроводе и области (зоне) гидравлического сопротивления. По формуле, соответствующей данному режиму движения, вычисляют  $\lambda$ .

Абсолютную шероховатость для трубы принимают  $k_s = 0,5$  мм.

4. Определяют опытное значение коэффициента сопротивления по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$\lambda_0 = 2h \frac{gd}{lv^2}$$

Полученное опытное значение  $\lambda$  сравнивают с расчетным и делают выводы.

5. Строят график  $\lambda = f(Re)$  в логарифмических координатах.

### Контрольные вопросы

1. По какой формуле определяются потери напора по длине трубопровода?

2. Что такое шероховатость? Как делятся трубы в зависимости от шероховатости?

3. В чем состоят результаты опытов Никурадзе по изучению потерь в трубах?

4. Какие зоны зависимости  $\lambda$  от числа Рейнольдса и шероховатости вы знаете?

5. Как определяется коэффициент  $\lambda$  для различных зон (при ламинарном и турбулентном движении)?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ**

*Цели работы:*

1. Экспериментальное определение коэффициента местного сопротивления при нескольких расходах жидкости в опытном трубопроводе.

2. Сравнение опытных значений коэффициента местного сопротивления со справочными.

#### **Краткие теоретические сведения**

Местные сопротивления представляют собой короткие участки трубопроводов, на которых скорости потока изменяются по величине или направлению в результате изменения размеров или формы сечений трубопровода, а также направления его продольной оси. Потери механической энергии, возникающие при деформации потока в местных сопротивлениях, относят к единице веса протекающей жидкости и называют местными потерями напора.

В зависимости от факторов, вызывающих потери напора, в местных сопротивлениях различают потери трения и вихревые потери.

Потери на трение вызываются торможением потока стенками, которое приводит к неравномерному распределению скоростей по сечениям потока и к появлению напряжений трения между смещающимися струйками жидкости. Местные деформации потока сопровождаются увеличением

неравномерности скоростей в его сечениях, вызывающим возрастание местных потерь трения.

Вихревые потери связаны с отрывами потока от стенок, происходящими при резких изменениях конфигурации каналов. Возникающие при этом интенсивные вихреобразования приводят к сильному возрастанию местной потери напора. Так, при внезапном расширении трубопровода поток по инерции срывается с внутренней угловой кромки и образует струю, которая отделяется от стенок вихревой зоной.

К местным сопротивлениям, в частности, относятся участки трубопроводов, имеющих переходы с одного диаметра на другой, колена, раструбы, тройники, крестовины, всякого рода запорные устройства и приспособления (краны, задвижки, вентили, клапаны), а также фильтры, сетки, специальные устройства входа и выхода к насосам (диффузоры, конфузоры), сужения и расширения, повороты трубопроводов.

При расчете потерь напора в местных сопротивлениях используют формулу Вейсбаха, которая выражает потери в долях от скоростного напора:

$$h_{\mu} = \xi_{\mu} \frac{v^2}{2g}$$

где  $\xi_{\mu}$  - безразмерный коэффициент местного гидравлического сопротивления;  $v$  – характерная скорость потока (обычно средняя скорость в сечении трубопровода перед местным сопротивлением или после него. Безразлично, какую из этих скоростей принимать, т.к. соответственно меняется  $\xi$  на  $\xi_1$  или  $\xi_2$ , а величина  $h_{\mu}$  остается неизменной).

В общем случае  $\xi_{\mu}$  зависит от формы, размеров и шероховатости данного местного сопротивления, а также от режима течения жидкости. Коэффициент местного сопротивления не зависит от числа Рейнольдса в области развитой турбулентности.

Значения коэффициентов местных сопротивлений, полученных экспериментально для различных изолированных местных сопротивлений,

нужно сравнить со справочными. Изолированными, т.е. не влияющими друг на друга, местные сопротивления являются тогда, когда их разделяют участки прямых труб постоянного сечения длиной не менее 20 диаметров трубы. Если это условие не соблюдается, то отдельные сопротивления рассматривают как одно сложное, для которого  $\xi_{\mu}$  определяют экспериментально.

### Порядок выполнения работы

1. Проверяют отсутствие воздуха в системе.
2. Измеряют температуру воды в напорном баке.
3. Открывают клапаны 1 и 2 и устанавливают режим движения воды (рис. 14).

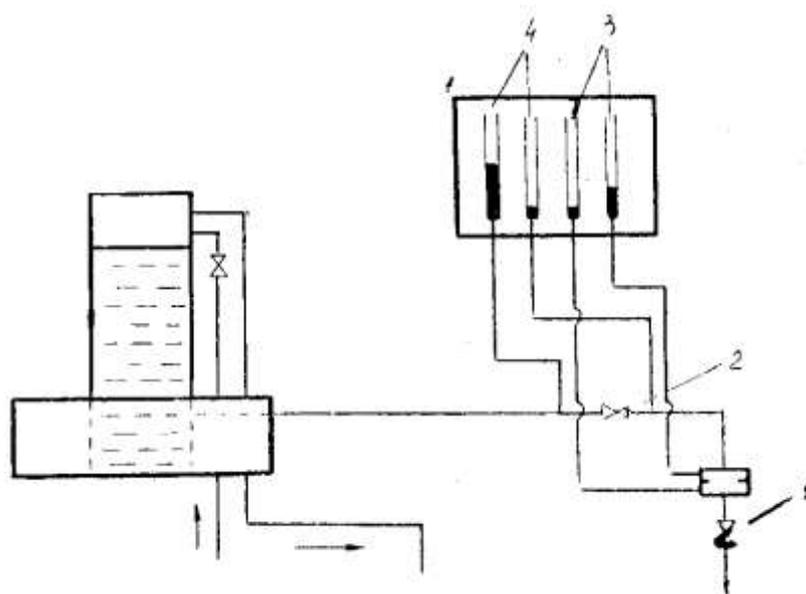


Рис. 14 Схема установки

4. Снимают разность показаний пьезометров 3, установленных на расходомерной шайбе, и с помощью тарировочного графика находят значение расхода  $Q$ . Данные заносят в таблицу 7.

5. Для каждого из пяти установившихся режимов движения снимают разность показаний пьезометров 4 до и после местного сопротивления.

Таблица 7 - Результаты замеров

| Показатели                               | Единица измерения | Опыт |   |   |   |   |
|--|-------------------|------|---|---|---|---|
|  |                   | 1    | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Площадь сечения трубы, $S$               |                   |      |   |   |   |   |
| Расход по расходомеру, $Q$               |                   |      |   |   |   |   |
| Средняя скорость, $v_{cp}$               |                   |      |   |   |   |   |
| Скоростной напор, $\frac{v_{cp}^2}{2g}$  |                   |      |   |   |   |   |
| Число Рейнольдса, $Re$                   |                   |      |   |   |   |   |
| Местные потери,                          |                   |      |   |   |   |   |
| Коэффициент потерь из опыта, $\xi_0$     |                   |      |   |   |   |   |
| Коэффициент потерь по справочнику, $\xi$ |                   |      |   |   |   |   |

### Обработка результатов

1. Средняя скорость потока жидкости определяется из уравнения

$$v_{cp} = \frac{Q}{S}$$

2. Число Рейнольдса находят по формуле

$$Re = \frac{vd}{\nu}$$

где  $\nu$  - коэффициент вязкости, определяемый по табл. 1.

3. Потеря напора в местном сопротивлении определяется как разность показаний пьезометров до и после местного сопротивления:

$$h_{\mu} = h_1 - h_2$$

4. Коэффициент местного сопротивления находят из формулы Вейсбаха:

$$\xi = \frac{2h_{\mu}g}{v^2}$$

Полученные значения коэффициента  $\xi$  следует сравнить со справочным значением (табл. 8).

Таблица 8 – Значения коэффициента местного сопротивления

| Местное сопротивление                   | Коэффициент местного сопротивления |
|---|------------------------------------|
| Задвижка                                | 0.5                                |
| Вентиль с косым шпинделем               | 0.5                                |
| Вентиль с вертикальным шпинделем        | 6.0                                |
| Обратный клапан нормальный              | 7.0                                |
| Обратный клапан «захлопка»              | 3.0                                |
| Кран проходной                          | 2                                  |
| Компенсатор однолинзовый без рубашки    | 1.6 - 0.5                          |
| Компенсатор однолинзовый с рубашкой     | 0.1                                |
| Компенсатор сальниковый                 | 0.3                                |
| Компенсатор П-образный                  | 2.8                                |
| <b>Отводы, гнутые под углом 90°</b>     | -                                  |
| со складками R=3d                       | 0.8                                |
| со складками R=4d                       | 0.5                                |
| гладкие R=1d                            | 1.0                                |
| гладкие R=3d                            | 0.5                                |
| гладкие R=4d                            | 0.3                                |
| <b>Отводы сварные одношовные под</b>    | -                                  |
| углом 30°                               | 0.2                                |
| углом 45°                               | 0.3                                |
| углом 60°                               | 0.7                                |
| <b>Отводы сварные двухшовные</b>        | -                                  |
| под углом 90°                           | 0.6                                |
| то же, трехшовные                       | 0.5                                |
| <b>Тройник при слиянии потока:</b>      | -                                  |
| проход                                  | 1.2                                |
| ответвление                             | 1.8                                |
| <b>Тройник при разветвлении потока:</b> | -                                  |
| проход                                  | 1.0                                |
| ответвление                             | 1.5                                |
| Тройник при встречном потоке            | 3.0                                |
| Внезапное расширение                    | 1.0                                |
| Внезапное сужение                       | 0.5                                |
| Грязевик                                | 10                                 |

### Контрольные вопросы

1. Укажите виды местных сопротивлений и дайте краткую оценку потерь напора для этих видов.
2. Как определить местные потери напора в трубопроводе?

3. Когда можно не учитывать местные потери напора?
4. В чем заключается сущность теоремы Борда?
5. Назовите местное сопротивление, при котором теряется весь скоростной напор и  $\xi = 1$ .
6. Укажите пути уменьшения гидравлических потерь трубопроводов.
7. Почему при вычислении местных потерь по формуле Вейсбаха можно использовать значение скорости потока до и после местного сопротивления?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7**

### **ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ**

*Цели работы:*

1. Опытным путем на установке определить числовые значения коэффициентов скорости, расхода, сжатия, сопротивления при истечении жидкости из отверстия и внешнего цилиндрического насадка.
2. Сравнить скорости и расход при истечении жидкости из отверстия и внешнего цилиндрического насадка.

#### **Краткие теоретические сведения**

Струя при выходе из отверстия претерпевает всестороннее сжатие. Причиной сжатия струи является инерционность частиц,двигающихся к отверстию изнутри резервуара по радиальным направлениям. Частицы жидкости,двигающиеся к отверстию вдоль стенок резервуара, стремясь по инерции сохранить направление движения, огибают край отверстия и образуют поверхность струи на участке сжатия. За сжатым сечением струя практически не расширяется, а при достаточно большой скорости может распадаться на отдельные капли. Наибольшее сжатие имеет место в сечении на расстоянии  $(0,5-1)d$  от плоскости отверстия; в этом сечении движение

приобретает параллельно-струйный характер, сечение называется сжатым сечением.

Отношение площади  $F_c$  сжатого сечения струи к площади отверстия  $F$  называется коэффициентом сжатия струи:  $\varepsilon = \frac{S_c}{S}$

Если рассматривать установившееся движение и написать уравнение Бернулли для сечений на свободной поверхности резервуара и сжатого сечения, то можно получить формулы для определения скорости  $v_c$  и расхода  $Q$ :

$$v_c = \varphi \sqrt{2gH} \qquad Q = \mu S_0 \sqrt{2gH}$$

где  $\varphi = \sqrt{\frac{1}{\alpha + \xi}}$  - коэффициент скорости;  $\alpha$  - коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скорости по живому сечению, практически  $\alpha = 1$ ;  $\mu = \varepsilon\varphi$  - коэффициент расхода;  $H$  - полный напор над центром тяжести отверстия;  $\xi$  - коэффициент сопротивления отверстия.

При истечении через отверстие в тонкой стенке при больших числах  $Re$  имеет место сжатие струи, поэтому площадь живого сечения струи можно представить в виде  $S_c = S_0\varepsilon$ , где  $S_0$  - площадь отверстия;  $\varepsilon$  - коэффициент сжатия струи,  $\varepsilon < 1$ .

Физический смысл коэффициента скорости  $\varphi$  представляет собой отношение действительной скорости  $v$  истечения к скорости истечения идеальной жидкости, т.е.:

$$\varphi = \frac{v}{\sqrt{2gH}} = \frac{v}{v_{ид}}$$

Коэффициент скорости может быть получен экспериментально двумя способами. Один способ требует замера площади сжатого сечения струи  $S_c$  и расхода  $Q$  при заданном  $H$ .

$$\text{При этом } \varphi = \frac{Q}{S_c \sqrt{2gH}}$$

В основу другого способа положено допущение, что струя представляет собой параболу с вершиной в сжатом сечении (рис. 15).

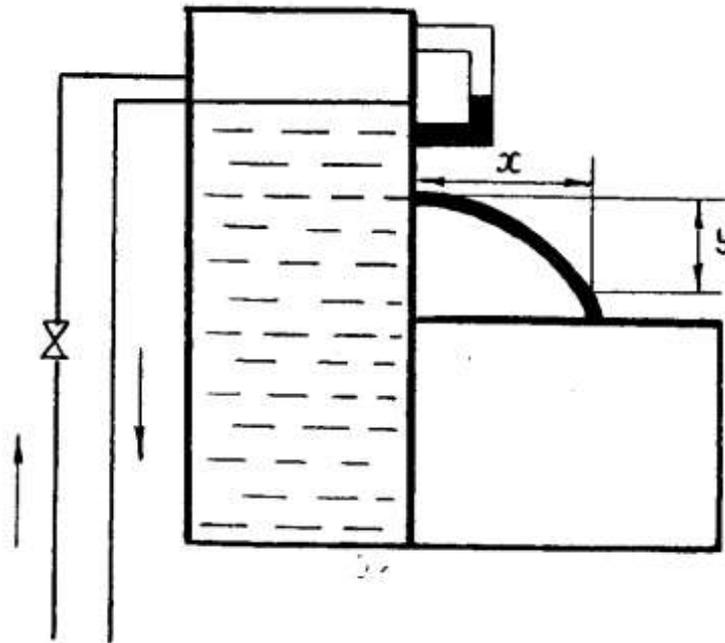


Рис. 15 Схема установки

Координаты траектории струи можно получить, допустив, что каждая частица движется как свободная материальная точка, на которую действует сила тяжести:

$$x = vt, \quad y = \frac{gt^2}{2}$$

где  $v$  – скорость в сжатом сечении;  $t$  – время перемещения частиц в струе.

Исключая  $t$ , находят

$$v = x \sqrt{\frac{g}{2y}}$$

Тогда

$$\varphi = \frac{v}{\sqrt{2gH}} = \frac{x\sqrt{g}}{\sqrt{2y} \cdot \sqrt{2gH}} = \frac{x}{2\sqrt{yH}}$$

Физический смысл коэффициента расхода  $\mu$  представляет собой отношение действительного расхода жидкости к теоретически вычисленному без учета сжатия струи и потерь напора, т.е.

$$\mu = \frac{Q}{F\sqrt{2gH}} = \frac{Q}{Q_t}.$$

Коэффициент сопротивления (потерь напора)  $\xi$  определяется по формуле:  $\xi = \frac{1}{\varphi^2 - 1}$

Коэффициенты сжатия  $\varepsilon$ , скорости  $\varphi$ , расхода  $\mu$  и сопротивления  $\xi$  зависят от формы и размеров отверстия, условий подтока к нему жидкости, а также от числа Рейнольдса  $Re$ . Также на величину коэффициентов истечения влияют тип насадка или отверстия и физические свойства жидкости, включая ее вязкость и поверхностное натяжение. Однако, при истечении воды, когда число Рейнольдса  $Re > \sim 10000$ , коэффициенты потерь  $\xi$ , сжатия  $\varepsilon$ , скорости  $\varphi$  и расхода  $\mu$  практически перестают зависеть от  $Re$ .

Увеличение коэффициента сжатия струи  $\varepsilon$  с уменьшением числа  $Re$  объясняется тем, что возрастающее влияние сил вязкостного трения ведет к утолщению подторможенного (пограничного) слоя у стенок и, следовательно, к уменьшению скоростей частиц жидкости, подтекающих сбоку к отверстию и вызывающих сжатие струи.

При уменьшении числа  $Re$  возрастает неравномерность распределения скоростей в сжатом сечении струи и увеличивается потеря напора, вызываемая силами трения в пограничном слое.

Для малых круглых отверстий в тонкой стенке при совершенном сжатии и квадратичной зоне сопротивления турбулентного режима коэффициенты истечения являются неизменными и имеют следующие численные значения:  $\mu=0,62$ ;  $\varphi=0,97$ ;  $\varepsilon=0,64$ ;  $\xi=0,065$ . Поэтому малые отверстия (диафрагмы) часто используются в качестве расходомеров.

Сужение струи при истечении через отверстие является следствием возникновения в струе местного понижения давления из-за возникновения сил инерции при обтекании потоком угла, образованного стенкой резервуара и направлением струи.

Если отверстие прилегает к одной или нескольким поперечным стенкам, то со стороны этих стенок сжатие струи не происходит. Такое отверстие называется отверстием с неполным сжатием. Если отверстие расположено на расстоянии менее трех диаметров отверстия от поперечных стенок, то их близкое присутствие отражается на поперечном размере струи. В этом случае отверстие называется отверстием с несовершенным сжатием.

Насадком называется весьма короткая напорная труба, при гидравлическом расчете которой можно пренебрегать потерями напора по длине. При гидравлических расчетах насадков учитываются только местные потери напора, а потерями по длине ввиду их малости пренебрегают. Различают следующие типы насадков: цилиндрические, конические расходящиеся и сходящиеся, коноидальные. Насадки увеличивают пропускную способность отверстия. Они широко используются в технике в качестве форсунок, жиклеров, водосбросных отсасывающих труб, сопел активных гидротурбин, применяются в струйных насосах, в гидроэлеваторах.

Расчетные зависимости при истечении из насадков те же, что и при истечении из отверстий. Однако коэффициенты истечения здесь относятся к выходному сечению, имеющему площадь  $F$ . Для цилиндрического, конически расходящегося и коноидального насадков на выходе не происходит сжатия струи, т.е.  $\varepsilon = \frac{F_c}{F} = 1$ . Поэтому коэффициент скорости  $\varphi$  равен коэффициенту расхода  $\mu$ :  $\varphi = \mu$ , а коэффициент сопротивления  $\xi$  определяется по формуле:  $\xi = \frac{1}{\varphi^2 - 1}$ .

Струя на входе в цилиндрический насадок сжимается как и при истечении через отверстия в тонкой стенке, далее расширяется и вытекает из

насадка полным сечением (при достаточной длине насадка). Между поверхностями транзитной струи в сжатом сечении и стенкой насадка образуется вихревая область. В сжатом сечении струи образуется вакуум. Увеличение расхода жидкости при истечении из насадков объясняется подсосывающим действием вакуума и отсутствием сжатия струи на выходе.

При истечении через насадок местное падение давления, сопровождающее обтекание угла, не распространяется на всю длину насадка, вакуум не наблюдается. Поэтому сжатие струи не происходит ( $\epsilon = 1$ ) и расход через насадок при одинаковых  $H$  и  $S_0$  будет больше, чем через отверстие.

### Порядок выполнения работы

1. В боковой стенке напорного бака 1 (рис. 16) устанавливают шайбу или насадок 12, закрывают отверстие пробкой.

2. Открывают клапан 9 и полностью наполняют бак 1 до уровня  $H$  (постоянный уровень удерживается поплавковым устройством в баке).

3. Открывают отверстие и производят замеры координат  $x$  и  $y$  точек струи координатником 13.

4. Производят замер расхода жидкости мерными емкостями (0,5 л и 1,0 л) за время  $\tau$ .

5. То же выполняют для внешнего цилиндрического насадка. Результаты замеров заносят в таблицу 9.

Таблица 9 – Результаты замеров

| Показатели               | Единица измерения | Отверстие круглое |   | Насадок внешний цилиндрический |   |
|--------------------------|-------------------|-------------------|---|--------------------------------|---|
|                          |                   | Опыт              |   |                                |   |
|                          |                   | 1                 | 2 | 1                              | 2 |
| Площадь отверстия, $S_0$ |                   |                   |   |                                |   |
| Напор, $H$               |                   |                   |   |                                |   |
| Координаты: $x$          |                   |                   |   |                                |   |
| $y$                      |                   |                   |   |                                |   |

|                                  |  |     |     |     |     |
|----------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|
| Объем воды в мерной емкости, $V$ |  | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 1,0 |
| Время истечения, $\tau$          |  |     |     |     |     |
| Расход, $Q$                      |  |     |     |     |     |
| Коэффициент расхода, $\mu$       |  |     |     |     |     |
| Коэффициент скорости, $\varphi$  |  |     |     |     |     |
| Коэффициент сопротивления, $\xi$ |  |     |     |     |     |

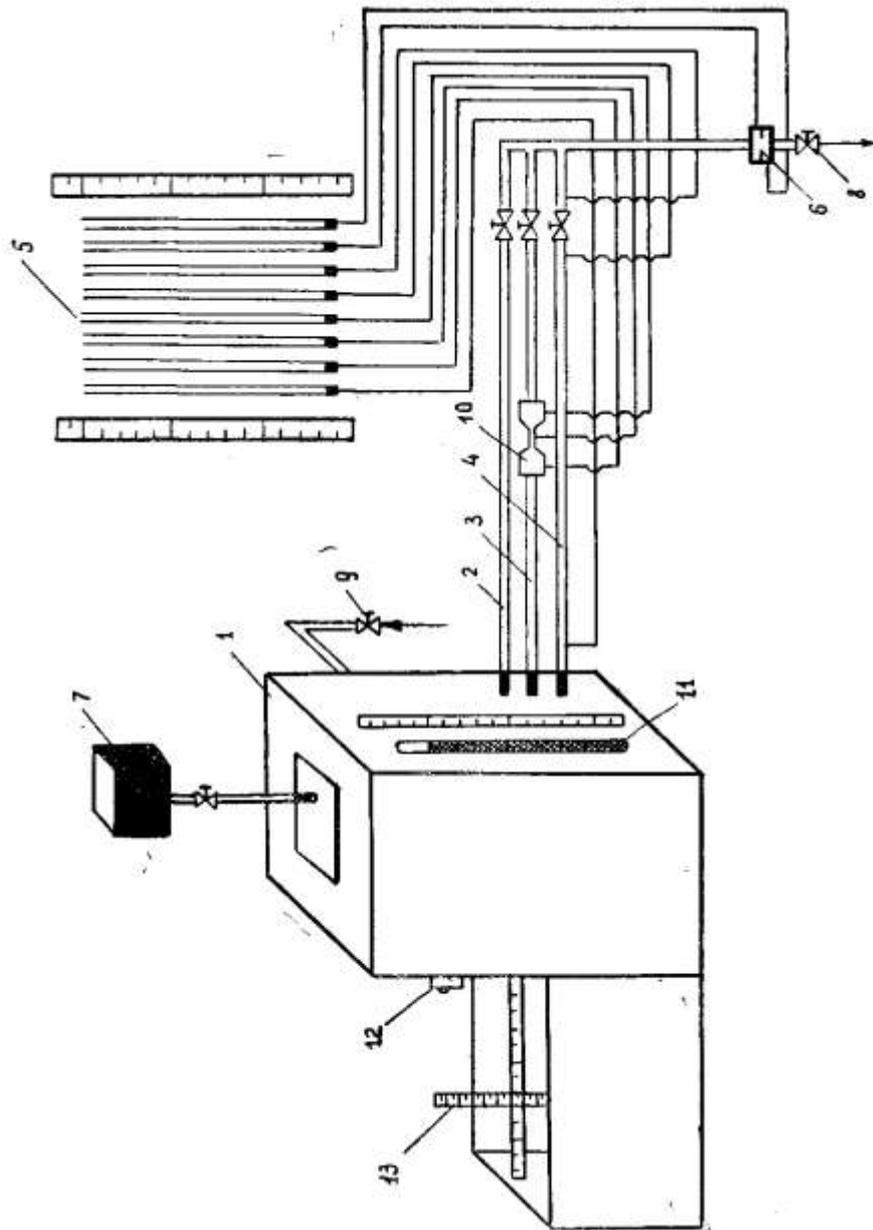


Рис. 16 Схема установки

### Обработка результатов

1. Вычисляют расход жидкости

$$Q = \frac{V}{\tau} \cdot 10^3$$

2. Определяют коэффициент расхода

$$\mu = \frac{Q}{S_0 \sqrt{2gH}}$$

где  $S_0$  – площадь отверстия.

3. Находят коэффициент скорости

$$\varphi = \frac{x}{2\sqrt{yH}}$$

4. Рассчитывают коэффициент сопротивления

$$\xi = \frac{1}{\varphi^2} - 1$$

### Контрольные вопросы

1. Какие явления, происходящие при истечении жидкости через отверстие в тонкой стенке, приводят к сужению струи жидкости?

2. Что называется коэффициентом скорости истечения? Какие параметры влияют на величину этого коэффициента?

3. Что называется неполным и несовершенным сжатием? Как изменяется коэффициент расхода через отверстие при неполном и несовершенном сжатии?

4. Что называется насадком? Как классифицируются насадки?

5. Почему при истечении через насадок не происходит сужения струи? Как это отражается на величине расхода жидкости через насадок?

6. При какой форме насадка струя сохраняет наибольшую кинетическую энергию?

7. Какая форма насадка обеспечивает наибольший расход при заданной величине отверстия в стенке сосуда?

8. Как изменяется скорость и расход жидкости при замене отверстия в тонкой стенке внешним цилиндрическим насадком?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев, В.И. Контрольно-измерительные приборы судовых энергетических установок (устройство, эксплуатация, эффективность): справочник / В.И. Агеев. – Л.: Судостроение, 1985. – 416 с., ил.
2. Башта, Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для студ. втузов / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов. – 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 2008. – 422 с.
3. Чугаев, Р.Р. Гидравлика: Учебник для вузов / Р.Р. Чугаев. – 4-е изд., доп. и перераб. – Л.: Энергоиздат, 2008. – 672 с.
4. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика: Учебник для вузов / Д.В. Штеренлихт. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 640 с.
5. Справочник по гидравлике / Под ред. В.А. Большакова. – Киев: Высшая школа, 2005. – 280 с.