



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Водоснабжение и водоотведение»

## **Сборник задач (упражнений)** по дисциплине

# **«Основы гидравлики и теплотехники»**

Авторы  
Цурикова Е.Г., Щуцкая Е.Е.,  
Смоляниченко А.С., Шишова О.П.,  
Харитоновна Т.А.

Ростов-на-Дону, 2016

## Аннотация

Для изучения специальностей: «Проектирование зданий», «Городское строительство и хозяйство», «Пожарная безопасность», «Производство строительных материалов, изделий и конструкций», «Промышленное и гражданское строительство», «Экспертиза и управление недвижимостью», «Теплогазоснабжение и вентиляция», выполнения лабораторных работ по материалам теоретического курса.

В пособии представлены методики проведения лабораторных работ по дисциплинам «Основы гидравлики и теплотехники», «Гидрогазодинамика», «Механика движения жидкостей и газов» на гидравлическом стенде.

## Авторы

к.т.н., доцент Цурикова Е.Г.,  
к.т.н., доцент Щуцкая Е.Е.,  
к.т.н., асс. Смоляниченко А.С.,  
асс. Шишова О.П.,  
инженер Харитонова Т.А.



## Оглавление

1. Организация, порядок выполнения и цель лабораторной работы .....	4
Лабораторная работа № 1 (Часть 1). .....	26
Лабораторная работа № 1 (Часть 2). .....	29
Лабораторная работа № 2. ....	31
Лабораторная работа № 3. ....	37
Лабораторная работа № 4. ....	45
Лабораторная работа № 5. ....	55
Список литературы.....	65

## 1. Организация, порядок выполнения и цель лабораторной работы

Студенты, приступающие к выполнению лабораторного практикума, должны изучить правила техники безопасности, разработанные для гидравлической лаборатории, и неуклонно их выполнять.

Все лабораторные работы проводятся студентами самостоятельно, но под руководством преподавателя.

На первом занятии преподаватель должен ознакомить студентов с лабораторией, кратко объяснить назначение всех стендов и провести инструктаж по технике безопасности.

Для осознанного и четкого выполнения лабораторных исследований студенты должны изучить методическое пособие для выполняемой работы, а также соответствующий теоретический раздел курса, страницы которого из основного учебника дает преподаватель.

В начале занятий путем краткого опроса преподаватель проверяет готовность студентов к выполнению работы, дает, по необходимости, дополнительные теоретические пояснения к работе, методику измерений, проверяет правильность получения опытных параметров.

Цель лабораторных работ, выполняемых студентами:

а) ознакомление с приборами, оборудованием, получение навыков для проведения гидравлических испытаний;

б) определение экспериментальных данных и сравнение их с данными теоретических зависимостей;

в) наблюдение условий протекания жидкостей, особенно на установках, выполненных из прозрачных материалов.

1.1. Приборы и оборудование, применяемые для измерения гидравлических параметров.

Так как, почти 70 % всех измерений, выполняемых в науке, промышленности и сельском хозяйстве, связаны с измерениями давления, расхода, количества и уровня веществ, логично начинать работу над лабораторными работами по предметам «Основы гидравлики и теплотехники», «Гидрогазодинамика», «Механика движения жидкостей и газов» с изучения способов и приборов для этих измерений.

Точность и надежность измерения давления и расхода (как основных рабочих параметров), определяет

-ценность результатов экспериментальных исследований в гидрогазодинамике;

- качество технологических процессов в химической, пищевой и бумажной промышленности;
- оптимальные режимы работы объектов в ракетной технике и авиации, энергетике и транспорте;
- эффективность систем добычи и переработки нефти и нефтепродуктов.

Разнообразие требований к технике измерений давления, расхода, количества и уровня веществ, обусловленное спецификой научного поиска и производства в различных отраслях народного хозяйства, различные физико-химические свойства измеряемых сред способствовали появлению, разработке и внедрению в практику множества различных методов и средств измерений этих величин. Ни в каких других областях измерений нет такого обилия научных идей и технических решений, как в областях измерений давления, расхода, количества и уровня. Почти все физические явления и закономерности, открытые давно или недавно, воплощаются в современной технике для измерения этих величин.

Знание физических принципов измерений, позволяет определять причины и источники возможных погрешностей измерений. Это, в свою очередь, дает возможность научиться грамотно измерять и проводить метрологическое обслуживание средств измерений. Поэтому в данных методических указаниях уделено внимание:

- физическим явлениям, лежащим в основе методов измерений;
- оценке методических погрешностей;
- обоснованию предпочтительных областей и условий применения тех или иных измерительных устройств.

Кроме того, освещены вопросы метрологического обслуживания этих измерительных устройств. Это связано с тем, что на сегодняшний день, несмотря на ряд успешно проведенных работ, эталонные и образцовые базы этих областей измерений все еще отстают от потребностей науки и производства. Совершенствование приемов и принципов метрологического обслуживания средств измерений является главной задачей метрологов любой квалификации, специализирующихся в этих областях измерений.

#### ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ.

Измерение давления необходимо практически в любой области науки и техники. Измерение давления необходимо для изучения происходящих в природе физических процессов, для

обеспечения нормального функционирования технических устройств и технологических процессов, созданных человеком. Давление определяет состояние веществ в природе (твердое тело, жидкость, газ). Под его действием происходили глобальные процессы внутри Земли, в результате которых образовались водная и воздушная ее оболочки, твердая кора. Указанные процессы продолжаются и в настоящее время. Так, под действием давления при извержении вулканов из недр Земли изливаются потоки расплавленной магмы, а в водную и воздушную оболочки поступают большие количества газообразных веществ. Перепады давления в атмосфере приводят в движение огромные массы воздуха, воздействуя тем самым на формирование погоды и на процессы взаимодействия, происходящие в атмосфере и мировом океане.

Применение давления в науке, технике и производстве невероятно разнообразно. Энергетические возможности тепло- и гидроэлектростанций и атомных электростанций определяются давлением пара или воды на лопасти турбин, под действием давления по каналам и трубопроводам на тысячи километров транспортируется вода, нефть и газ. Давление приводит в движение автомобили и самолеты, ракеты и космические корабли, открывает и закрывает двери лифта, вагонов метро, троллейбусов и автобусов, подает воду и газ в квартиры наших домов. Посредством давления осуществляется работа разнообразных станков, механизмов и установок в различных отраслях производства. По давлению контролируют состояние рабочих сред в различных технологических процессах нефтехимической промышленности, при производстве искусственных волокон и пр. Во многих отраслях науки при проведении физических, термодинамических и метрологических исследований (определение концентрации газов в твердых веществах, констант уравнений состояния различных веществ, эталонные температурные и линейные измерения) также требуется измерять давление.

Гидростатическое давление это нормальное сжимающее напряжение, возникающее в покоящейся жидкости под действием поверхностных и массовых сил,

$$P = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S} \quad (1)$$

где  $\Delta P$  - элементарная равнодействующая поверхностных сил (гидростатическая сила), Н;

$\Delta S$  - элементарная площадка действия, м<sup>2</sup>.

Из формулы (1) видно, что гидростатическое давление  $p$  есть предел отношения элементарной гидростатической силы  $\Delta P$  к элементарной площади действия  $\Delta S$ , когда последняя стремится к нулю.

За единицу гидростатического давления принято равномерно распределённое давление, создаваемое силой в 1 Н, на площади в 1 м<sup>2</sup>,

т.е.

$$p = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м}^2} = 1 \text{ Па (один паскаль)}.$$

Гидростатическое давление:

- отсчитываемое от нуля, называют абсолютным ( $p_{\text{атм}}$ ),
- отсчитываемое от атмосферного избыточным ( $p_{\text{изб}}$ ).

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}} \quad (2)$$

Очевидно,

$$p_{\text{изб}} = p_{\text{абс}} - p_{\text{атм}} \quad (3)$$

В гидравлических расчётах величину нормального атмосферного давления считают равной

$$\begin{aligned} p_{\text{атм}} &= 1 \text{ ат} = 98100 \text{ Па} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 10000 \text{ кгс/м}^2 = \\ &= 0,98 \text{ бар} = 10 \text{ м.вод.ст.} = 735 \text{ мм.рт.ст.} \end{aligned}$$

Из формулы (1.3) видно, что в зависимости от соотношения между  $p_{\text{абс}}$  и  $p_{\text{атм}}$  избыточное давление  $p_{\text{изб}}$  может быть и положительной, и отрицательной величиной. Положительное избыточное давление называют манометрическим, а отрицательное – вакуумметрическим.

Уже было отмечено, что современная наука и техника предъявляют самые разнообразные требования к приборам для измерения давления. Прежде всего, это связано с широким диапазоном измеряемых величин давления, от микропаскаля (мкПа) до гигапаскаля (ГПа). Возрастают требования к точности измерений, усложняются объекты исследований, которые накладывают дополнительные условия на конструктивное оформление приборов.

Многообразие перечисленных требований породило большое количество приборов, различных по принципу действия, точности измерения и конструктивному оформлению.

Условно все приборы для измерения давления можно классифицировать по следующим признакам:

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

По роду измеряемой величины.

В зависимости от вида измеряемого давления (избыточного  $p_{изб}$  или абсолютного  $P_{абс}$ ) существует несколько видов приборов:

а) манометры – приборы для измерения положительного избыточного давления;

б) вакуумметры – приборы для измерения отрицательного избыточного давления;

в) мановакуумметры – приборы, позволяющие измерять как положительное избыточное давление, так и отрицательное;

г) дифференциальные манометры – приборы, для измерения разности давлений в двух точках;

д) барометры – приборы для измерения абсолютного давления, равного атмосферному.

Для измерения абсолютного давления больше атмосферного используют два прибора – барометр и манометр; меньше атмосферного – барометр и вакуумметр.

По принципу действия.

Приборы для измерения давления подразделяются на несколько видов.

1. Жидкостные – работа которых, основана на гидростатическом принципе действия, то есть измеряемое давление уравнивается давлением столба жидкости, высота которого определяется непосредственно или путем расчета.

Впервые идея - измерения давления по величине столба жидкости - была высказана итальянским ученым Торричелли в 1640 г. Ее технически осуществили итальянский механик Вивiani в 1642 г. и французский ученый Паскаль в 1646 г.

Жидкостный манометр (пъезометр) представляет собой стеклянную трубку, верхний конец которой открыт в атмосферу, а нижний присоединён к точке, где измеряется манометрическое давление. Желательно, чтобы внутренний диаметр пъезометра был не менее 8 мм, в этом случае поверхностное натяжение будет создавать наименьшую погрешность измерений.

Манометрическое давление, выраженное через показания пъезометра, равно:

$$p_{изб} = \rho g h_{изб} \quad (4)$$

где  $\rho g = \gamma = \left( \frac{H}{M^2} \right)$  - объемный вес жидкости;

$h_{изб}$  - пъезометрическая высота, т.е. высота, отсчитываемая от точки подключения пъезометра до уровня жидкости в нём.



Пьезометры бывают открытого и закрытого типов. На поверхности пьезометра открытого типа действует атмосферное давление. У пьезометра закрытого типа верхний конец запаян. На поверхности жидкости в таком пьезометре можно создать давление выше или ниже атмосферного.

Максимальное давление, измеряемое жидкостными манометрами равно 4 ат (для ртутных манометров). Для пьезометров с водой измерять давление выше 0,4 ат будет затруднительно.

Дифференциальные манометры применяются для измерения разницы между двумя отдельными гидравлическими системами. Установленная разность давлений передается с помощью стрелочного механизма непосредственно на шкалу. Если измеряемые давления одинаковы, измеряемый элемент остается неподвижным и показания прибора отсутствуют. Эти приборы измеряют перепады давлений между гидравлическими системами в пределах 3 ат.

Жидкостные приборы не утратили своего значения до настоящего времени. Это объясняется достоинствами жидкостных манометров:

- высокая точность,
- простота принципа действия прибора,
- они не сложны в изготовлении,
- надежны.

Недостатками жидкостных приборов являются:

- небольшой диапазон измеряемых давлений,
- хрупкость прибора,
- громоздкость.

2. Механические – принцип действия, которых заключается в том, что под действием давления происходит деформация некоторого упругого элемента, и величина этой деформации служит мерой измеряемого давления.

Механические приборы для измерения давления разделяют по типу упругих элементов, применяемых для измерения давления на:

- пружинные (рабочим элементом является трубка скрученная пружиной, поэтому иногда их называют трубчатыми),
- мембранные (рабочим элементом является мембрана - ее иногда называют пластиной, а эти приборы часто называют пластинчатыми),
- сильфонные (рабочим элементом является сильфон, представляющий собой гофрированную тонкостенную металлическую трубку, изготовленную из высокопрочного

сплава).

Пружинные приборы получили наибольшее распространение, так как они имеют много преимуществ:

- простота устройства и использования,
- портативность,
- универсальность,
- практически неограниченный диапазон измерения, начиная от нескольких кПа и до сотен МПа.

Недостатками этих приборов являются:

- большая по сравнению с другими приборами погрешность, но находящаяся в допустимых пределах.

Пружинный манометр показывает давление в точке жидкости на уровне оси вращения его стрелки. Если же высотное положение оси вращения стрелки и точки подключения манометра не совпадают, в показания манометра ( $P_M$ ) вводят поправку ( $\pm \rho g y$ ).

Для случая, изображённого на рис.1.1,

$$p_{\text{изб}} = p_M + \rho g h_{\text{изб}} \quad (5)$$

где  $y$  - превышение оси вращения стрелки манометра над точкой его подключения, м.

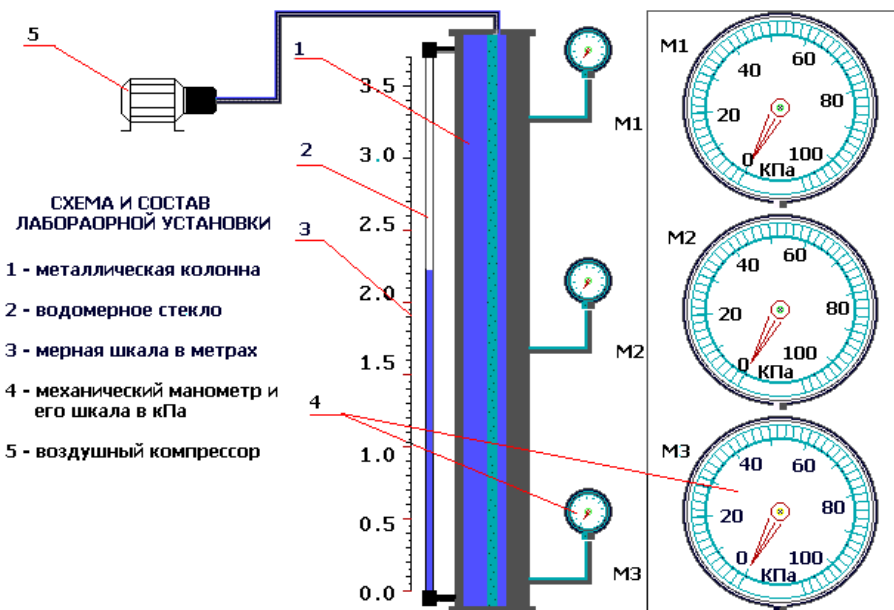


Рис.1. Подключение пружинных манометров.

Когда на покоящуюся жидкость действует только сила тяжести, распределение гидростатического давления по глубине (рис. 2) описывается основным уравнением гидростатики:

$$p = p_0 + \rho g h \quad (6)$$

где  $p$  - гидростатическое давление в жидкости на глубине  $h$ , Па;

$p_0$  - внешнее давление, т.е. гидростатическое давление на свободной поверхности жидкости, Па;

$h$  - глубина погружения в жидкость рассматриваемой точки, м;

$\rho g h$  - весовое давление, т.е. гидростатическое давление, создаваемое весом столба жидкости, Па.

Из уравнения (6) видно, что при изменении величины  $h$  давление  $p$  изменяется по линейному закону (см. рис. 2). Вычислив по уравнению давление в двух точках, заглублённых на разную величину, можно построить диаграмму распределения гидростатического давления по глубине, называемую эпюрой гидростатического давления (см. рис. 2).

Следует учитывать, что с течением времени пружина

манометра теряет свою упругость, вследствие чего стрелка прибора при выключении не становится на ноль. В тех случаях, когда погрешность в показаниях будет больше допустимой величины, проводят переградуировку шкалы.

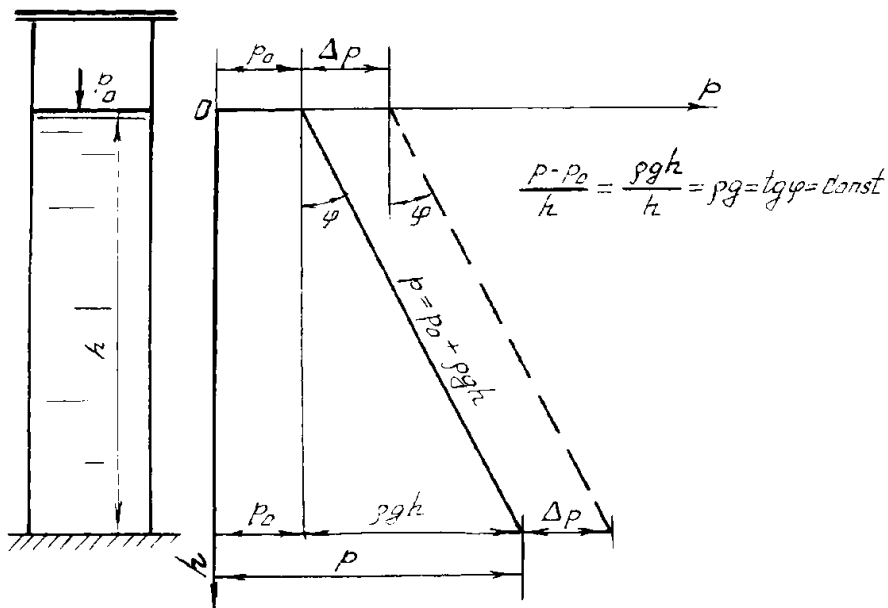


Рис. 2. Распределение гидростатического давления по высоте столба жидкости (эюра избыточного гидростатического давления).

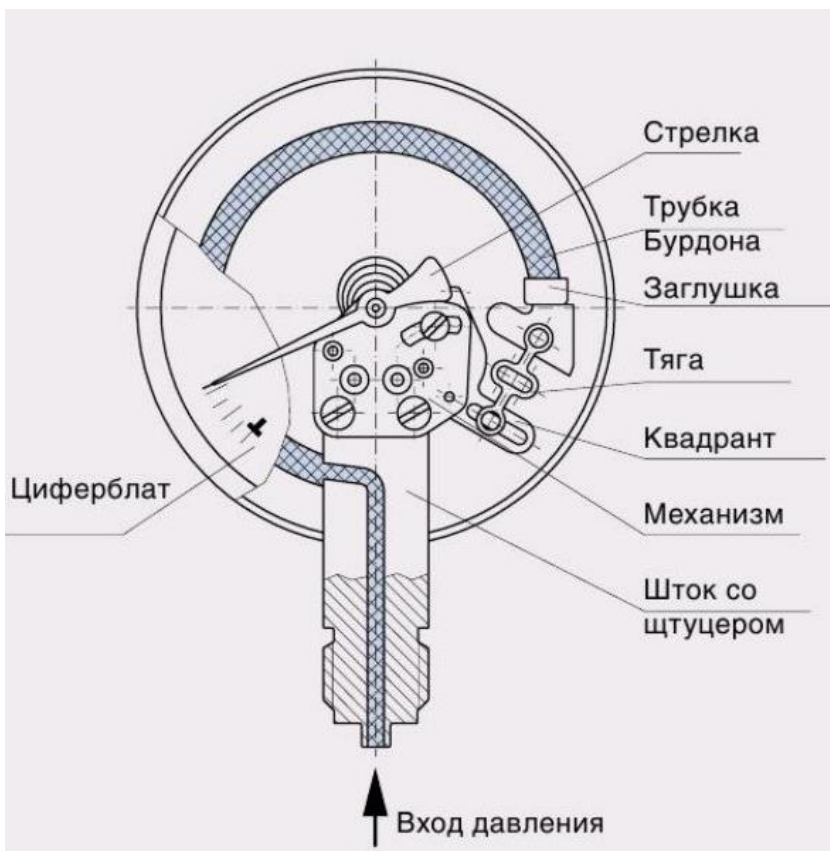


Рис. 3. Схема классического пружинного манометра.

Пластинчатые манометры получили меньшее распространение, так как они способны замерять давление в меньших диапазонах по сравнению с пружинными.

Достоинствами пластинчатых манометров являются высокая точность производимого замера.

Недостатками этих приборов являются:  
 - небольшой диапазон измеряемых давлений (по сравнению с пружинным),  
 - хрупкость прибора.

Механические приборы подразделяют также на: технические и образцовые. Образцовые используют для целей поверки, так как они сверяются с эталонными приборами. Технические используют непосредственно для измерения

давления.

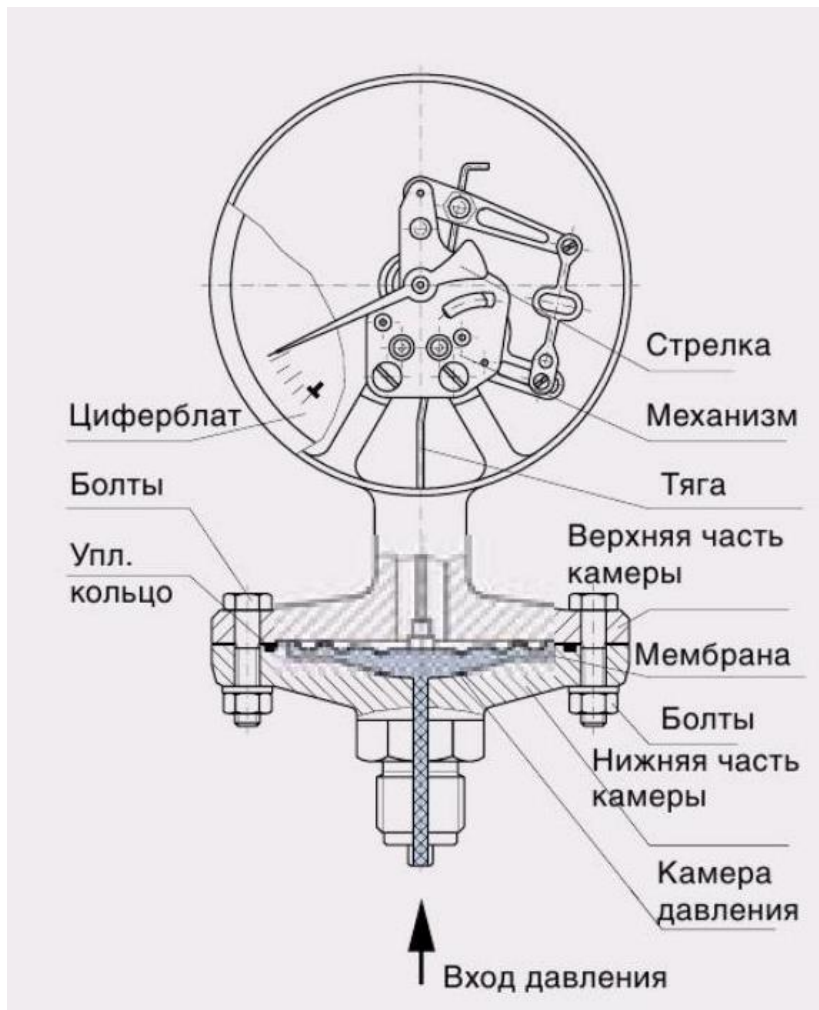


Рис. 4. Схема принципа работы мембранного манометра.

3. Грузопоршневые – манометры, в которых измеряемое давление, действуя на одну сторону поршня, уравнивается внешней силой, приложенной с противоположной стороны поршня. В качестве уравнивающей силы используют грузы. Вес груза, деленный на площадь поршня, определяет величину измеряемого давления.

4. Электрические – принцип действия основан на

изменении электрических свойств некоторых материалов или изменении каких-либо электрических параметров под действием давления.

5. Комбинированные – принцип действия, которых носит смешанный характер.

По классу точности.

По точности показаний все выпускаемые серийно приборы делятся на классы. Классом точности прибора называется основная наибольшая допустимая приведенная погрешность. Установленные классы точности для приборов давления соответствуют следующему ряду: 0,005; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Класс точности 0,1 соответствует погрешности 0,1 %

Основная допустимая погрешность приборов измеряющих давление  $\pm 2\%$  от верхнего предела шкалы.

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДОВ.

Расход бывает массовый  $M = [\text{кг/с}]$ , или объемный  $Q = [\text{м}^3/\text{с}]$ . Между обоими расходами есть связь  $M = \rho Q$   
 $\rho$  - плотность  $[\text{кг/м}^3]$ .

Расходомерами называются такие приборы, которые измеряют расход вещества, т. е. количество вещества, протекающего по трубопроводу в единицу времени.

Существует несколько способов замера расходов.

1. Объемный или весовой способ замера расхода, такой способ применяется, когда измеряются малые расходы.

При проведении эксперимента измеряется объем жидкости  $V = [\text{м}^3]$  вытекший за время  $t$ . Объемный расход будет

$$Q = \frac{V}{t} = \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right] \quad (7)$$

При проведении эксперимента измеряют массу жидкости  $m = [\text{кг}]$  вытекшую за время  $t$ . Массовый расход будет

$$M = \frac{m}{t} = \left[ \frac{\text{кг}}{\text{с}} \right] \quad (8)$$

2. Замер расхода расходомерами переменного перепада давления — приборами, принцип действия которых основан на измерении перепада давления на установленном внутри трубопровода сужающем устройстве; этот перепад давления служит мерой расхода протекающего по трубопроводу вещества.

Принцип измерения расхода расходомером переменного перепада давления основан на том, что в зависимости от расхода вещества изменяется перепад давления на неподвижном сужающем устройстве, установленном в трубопроводе или элементе

трубопровода (например колена).

Расходомеры переменного перепада давления состоят из трех элементов: сужающего устройства, дифференциального манометра для измерения перепада давления и соединительных линий с запорной и предохранительной арматурой.

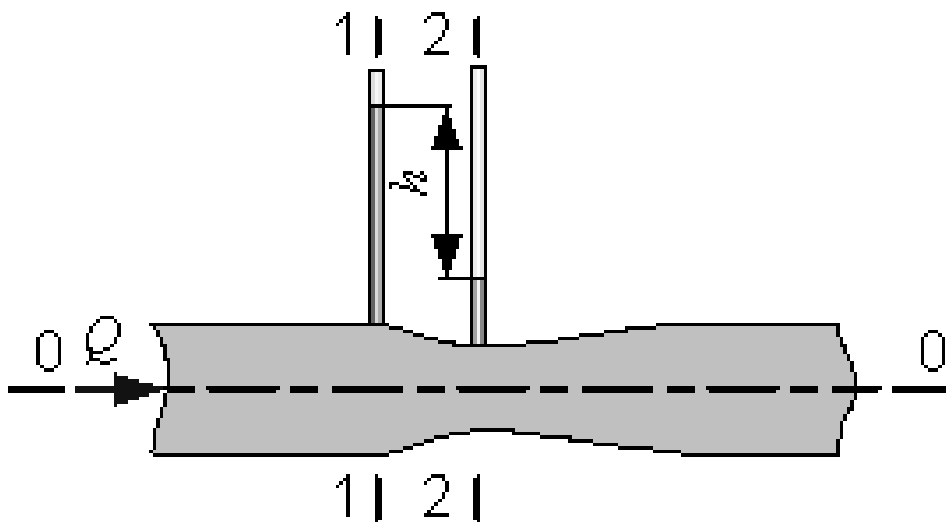


Рис.5 Труба Вентури.

Применяются следующие стандартные сужающие устройства: диафрагмы, сопла, сопла Вентури и трубы Вентури.

Установленное в трубопроводе сужающее устройство приводит к увеличению скорости в суженном сечении. В результате часть потенциальной энергии давления переходит в кинетическую, поэтому статическое давление в суженном сечении становится меньше статического давления, перед сужающим устройством. Перепад давлений зависит от скорости движения жидкости, а значит, и от расхода.

Для вывода основного уравнения расхода жидкости, протекающей через сужающие устройства, используется уравнение Д. Бернулли, составленное для сечений 1–1 и 2–2. Сечение 1–1 выбирается перед сужающим устройством, а сечение 2–2 – в сжатом сечении. Плоскость сравнения проводится по оси трубопровода. Потери напора между сечениями не учитываются.



В этом случае уравнение Бернулли имеет вид

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 \vartheta_1}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 \vartheta_2}{2g} \quad (9)$$

Принимая во внимание  $Q_1 = Q_2 = \text{const}$ , используя уравнение неразрывности

$$\vartheta_1 \omega_1 = \vartheta_2 \omega_2 \quad (10)$$

и учитывая, что

$$\frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} = h \quad (11)$$

решается уравнение относительно  $\vartheta_1$ :

$$\vartheta_1 = \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 - 1}} \sqrt{h} \quad (12)$$

Теоретический расход в трубопроводе определяется по формуле

$$Q_T = \vartheta_1 \omega_1 = \frac{\omega_1 \sqrt{2g}}{\sqrt{\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 - 1}} \sqrt{h} \quad (13)$$

Выражение  $\frac{\omega_1 \sqrt{2g}}{\sqrt{\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 - 1}}$  зависит только от

геометрических размеров

данного расходомера и является постоянной величиной:

$$\frac{\omega_1 \sqrt{2g}}{\sqrt{\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 - 1}} = C \quad (14)$$

Тогда уравнение расхода примет вид

$$Q_T = C \sqrt{h} \quad (15)$$

где  $C$  – постоянная расходомера.

При выводе зависимости (15) не учитывались потери энергии, поэтому фактический расход  $Q_\Phi$  будет меньше теоретического. Это несоответствие расходов характеризуется коэффициентом расхода

$$\mu = \frac{Q_\Phi}{Q_T} \quad (16)$$

Окончательная формула для определения расхода принимает следующий вид:

$$Q_\Phi = \mu C \sqrt{h} = A \sqrt{h} \quad (17)$$

Где  $A$  – коэффициент расхода расходомера,

$$A = \mu C \quad (18)$$

3. Определить расход можно по скорости. Известно

$$Q_1 = \vartheta_1 \omega_1 \quad (19)$$

Определив скорость в исследуемом сечении можно определить расход потока в этом сечении. Для замеров скорости в некоторой точке потока (как в небольших открытых потоках, в трубах, но главным образом, при лабораторных исследованиях) применяют трубку Пито. Если такую трубку установить в открытом потоке, например в канале, где давление на свободной поверхности жидкости равно атмосферному, то, высота  $h$  поднятия жидкости в трубке над поверхностью потока представит собой величину скоростного напора

$$h = \frac{v^2}{2g} \quad (20)$$

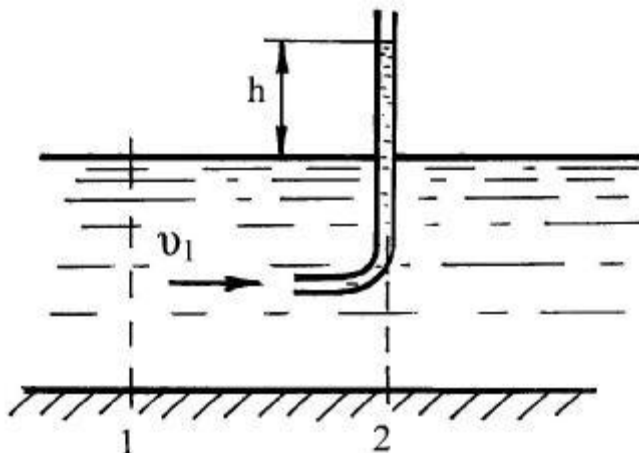


Рис.6. Трубка Пито

Откуда скорость движения жидкости определяют скорость движения открытого потока

$$v = \sqrt{2gh} \quad (21)$$

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

$$v = a \sqrt{2gh} \quad (22)$$

Где  $a$  — поправочный коэффициент, определяемый для каждой трубки опытным путем.

Дальнейшим развитием и усовершенствованием трубки Пито является устройство, применяемое для измерения скорости течения жидкости в напорных трубопроводах, состоящее из двух трубок (рис. 7), одна из которых  $a$  — обычный пьезометр показывающий пьезометрический напор  $\frac{p}{\gamma}$ , а другая  $b$  подобна трубке

Пито и измеряет полный напор

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}. \text{ Разность уровней в обеих трубках } h \text{ дает}$$

значение скоростного напора  $\frac{v^2}{2g}$ , по которому определяют скорость. Обычно обе трубки совмещаются в одном приборе, называемом трубкой Прандталя. Трубки могут быть подсоединены к дифференциальному манометру и сразу показывать  $h$ .

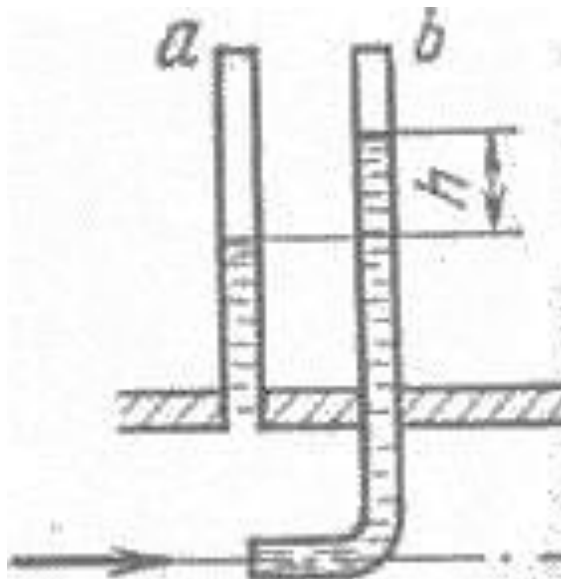


Рис.6. Трубка Прандталя.

3. Замер расхода расходомерами обтекания — это приборы, принцип действия которых, основан на восприятии динамического напора, протекающего по трубопроводу вещества чувствительным элементом прибора (поплавок, поршнем, гидродинамической трубкой и т. п.), помещенным в поток; в результате этот чувствительный элемент перемещается, и величина перемещения служит мерой расхода.

4. Замер расхода расходомерами с непрерывным движением приемных устройств — приборами, чувствительный элемент которых под действием динамических усилий потока совершает вращательное или колебательное движения; скорость движения чувствительного элемента служит мерой расхода.

5. Замер расхода электрическими расходомерами — приборами, принцип действия которых основан на измерении изменяющихся в зависимости от расхода электрических параметров системы: измеряемое вещество — чувствительный элемент прибора, величина какого-либо выбранного для

измерения электрического параметра служит мерой расход.

6. Замер расхода тепловыми расходомерами— это приборы, принцип действия которых основан на измерении, служащего мерой расхода количеств: тепла, отданного каким-либо нагретым элементом потоку вещества.

7. Замер расхода ультразвуковыми расходомерами — приборами, принцип действия которых основан на измерении параметров ультразвуковых колебаний, распространяющихся в потоке измеряемого вещества.

Погрешность способов и приборов, измеряющих расход зависит от многих факторов (расположение прибора, условия замера, особенности гидравлической системы для которой производят замер и т.п.) – этим объясняется диапазон величины возможной погрешности, которая находится в пределах 0,5 – 4 %.

#### ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЕЙ ЖИДКОСТИ.

Многообразии уровнемеров, объясняется многообразием задач по определению уровня: различные продукты, различные условия, различная точность, различная надежность, различная стоимость. Универсального уровнемера в настоящее время не существует. Каждый прибор имеет множество модификаций и опций, которые позволяют подобрать наиболее оптимальный для конкретной технической задачи.

Основные сложности работы с уровнемерами:

- широкий температурный диапазон и давления в резервуаре,
- широкий разброс свойств и, как следствие, необходимость в "индивидуальном подходе" к жидкости,
- часто присутствуют бурлящие и пенящиеся поверхности,
- часто необходима высокая точность,
- иногда требуется определять уровни для нескольких продуктов, или уровень раздела двух жидкостей

Для измерения уровней свободной поверхности жидкости в каналах, резервуарах применяют различные уровнемеры.

Гидростатические уровнемеры - ближайшие родственники датчиков давления. Они дешевы и просты по конструкции; но имеют ограниченное применение из-за относительно низкой. Для измерения уровня свободной поверхности жидкости в каналах, резервуарах применяют реечные, игольчатые, трубчатые уровнемеры. Очень удобна стеклянная трубка со шкалой, оттарированная в линейных единицах.

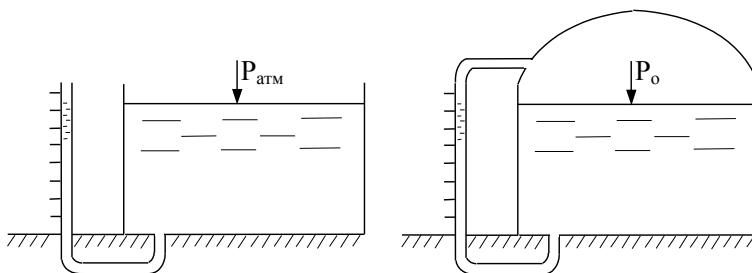


Рис.7. Измерение уровня в открытом и закрытом резервуарах.

Механические уровнемеры бывают:

- поплавковые, с чувствительным элементом (поплавок), плавающим на поверхности жидкости
- буйковые, действие которых основано на измерении выталкивающей силы, действующей на буйёк
- вибрационные

Погружные зонды - гидростатические датчики уровня для скважин. Чувствительный элемент такого датчика находится в металлическом корпусе в форме небольшого стержня; выходной сигнал снимается с помощью длинных защищенных кабелей.

Электрические уровнемеры бывают:

- Ёмкостные. В ёмкостных уровнемерах чувствительным элементом служит конденсатор, ёмкость которого изменяется пропорционально изменению уровня жидкости.
- Кондуктометрические.

Действие кондуктометрического уровнемера основано на измерении сопротивления между электродами, помещенными в измеряемую среду (одним из электродов может быть стенка резервуара или аппарата).

В акустических (ультразвуковых) уровнемерах используется явление отражения ультразвуковых колебаний от плоскости раздела сред жидкость-газ. Среди акустических уровнемеров есть класс накладных сигнализаторов уровня. Такие датчики устанавливаются на наружные поверхности резервуара и определяют "заполнены ли до данного уровня". Акустические уровнемеры самые дешевые из всех бесконтактных датчиков уровня. Радарные уровнемеры, подобно акустическим, используют явление отражения электромагнитных колебаний от плоскости раздела сред жидкость-газ. Радарные датчики уровня не имеют контакта с продуктом, что позволяет, использовать их с агрессивными

продуктами, в тяжелых условия (высокое давление, высокие температуры, пары и газы над поверхностью). По сравнению с ультразвуковыми уровнемерами, радарные - способны обеспечить большую точность измерения, обладают меньшей зоной нечувствительности, способны работать при больших давлениях в резервуаре.

Рефлексные (волноводные) уровнемеры по принципу работы подобны радарным, но электромагнитный импульс распространяется не в газовой среде, а по специальному зонду - волноводу. В качестве зондов могут выступать: стержень, трос, группа тросов.

Рефлексные уровнемеры способны работать в более жестких условиях:

- температура продукта до 600° С
- давление в резервуаре до 100 бар
- сильное бурление жидкости; резервуары с работающей мешалкой

- пары и газы над поверхностью жидкости

В радиационных уровнемерах используют просвечивание объекта измерения гамма-лучами радиоактивных элементов, интенсивность которых зависит от объёма измеряемого вещества. Используются для сложных условий эксплуатации: ядовитые, токсичные, радиоактивные, сильно корродирующие жидкости, при высокой температуре и давлениях. Для использования подобного уровнемера требуются специальные разрешения. Погрешности измерений.

Оценить доброкачественность измерений, можно исследовав точность результатов.

Погрешности измерений можно разделить на три категории.

Погрешности систематические, имеющие в производимом замере значение или постоянное, или изменяющееся по некоторому закону. Такие ошибки могут быть инструментальными, личными или теоретическими. Для устранения этих ошибок необходима систематическая тарировка приборов, бережное содержание их, наблюдения мениска производить глазом на уровне, учитывать индивидуальные особенности наблюдателей.

Погрешности грубые, вызываемые редкими, ненормальными нарушениями методики замера. Наблюдения с грубыми ошибками выделялись большими значениями результатов наблюдений. Такие ошибки обычно отбрасываются.

Погрешности случайные, вызываемые неизбежными, много-

численными и разнообразными явлениями, хотя и малыми по своему влиянию на результат, но трудно учитываемые при каждом замере.

При исследованиях обращается большое внимание на ошибки случайные. Именно они говорят о точности измерений.

Методика исследований точности в зависимости от случайных результатов такова.

Проводят серию опытов для определения точности измерений. Снимаются показания прибора для одних и тех же параметров.

Определяют частоту повторения значения по формуле

$$\eta_i = \frac{m_i}{N} \quad (22)$$

где  $N$  – число проведенных измерений,

$m_i$  - число повторений одного и того же значения.

Определили среднее арифметическое значение замера или центр группирования значений случайной величины

$$M = X = \frac{\sum x_i m_i}{N} \quad (23)$$

$x_i$  – величина, для которой ищем, среднее арифметическое,

4. Определили дисперсию генеральной совокупности значений

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum m_i(x - x_i)^2 \quad (24)$$

Величина  $\sigma$  называется среднеквадратической ошибкой или среднеквадратической погрешностью или генеральным стандартом.

5. Определяем меру изменчивости величины или коэффициент вариации.

По  $C$  определяем к какой категории изменчивости относится измеряемая величина.

$$C = \frac{\sigma}{x} 100\% \quad (25)$$

6. Определяем среднюю ошибку  $m$  среднего арифметического значения измеряемой величины по формуле

$$m = \frac{\sigma}{N-2} \quad (26)$$

7. Определяем достоверность по критерию Стьюдента  $N = 1 - \alpha$

где  $\alpha$  – уровень вероятности. Отклонение от среднего зна-



чения должно быть ограничено точностью измерений. Допустимая погрешность для приборов, измеряющих давление и разрежение, 1-2,5 %. Уровень вероятности 0,01 – 0,025, а уровень надежности  $H = 0,975$  или 97,7% надежности. Задаваясь уровнем надежности, по таблице Стьюдента, определяем  $t$  – достоверность

8. Определяем доверительный интервал, указывающий пределы, в которых с данным уровнем надежности лежит среднее всей совокупности значений.

$$x - mt \leq x \leq x + mt \quad (27)$$

9. Устанавливаем необходимое число опытов для получения надежного значения.

$$\Delta = t \frac{\sigma}{\sqrt{N-2}} \quad (28)$$

Где  $\sigma$  - стандартное отклонение,

$N$  - число опытов,

$t$  - критерий Стьюдента,

$\Delta$  - допустимая суммарная погрешность измерений, определяемая для каждого эксперимента отдельно.

10. Для определения грубых ошибок (среди случайных) пользуются правилом  $3\sigma$ . Иначе говоря, предельной ошибкой отдельного измерения - считают тройное значение  $\sigma$ . Считают, что отклонение от среднего значения измерений более  $3\sigma$  недопустимо, т.к. является недостоверным, и замером с таким отклонением пренебрегают.

11. Бытовые приборы для измерения расхода и давления имеют допустимую погрешность в пределах 2 % от общего диапазона шкалы используемого прибора.

## Лабораторная работа № 1 (Часть 1).

Определение силы давления воды на дно сосуда.

Цель работы: экспериментальная проверка гидростатического парадокса.

1. Краткая теоретическая часть.

Основными понятиями гидростатики являются понятия гидростатического давления в данной точке покоящейся жидкости и силы гидростатического давления действующего на плоскость.

Гидростатическим давлением называют давление, возникающее в каждой точке объема жидкости, обозначают его –  $p = (Па)$ . Гидростатическое давление в точке жидкости на глубине  $h$ , определяют по формуле

$$p = p_0 + \rho g h \quad (29),$$

$p_0$  - поверхностное давление,  $\rho$  - плотность жидкости.

Эту формулу называют основным уравнением гидростатики или основным законом гидростатики.

Сила давления жидкости, действующая на рассматриваемую площадь  $S$ , называется силой гидростатического давления [или суммарным гидростатическим давлением] и обозначается  $P = (Н)$ .

$$P = p S = (\rho) \quad (30)$$

В случае, когда стенка расположена горизонтально (угол наклона к горизонту  $\alpha=0$ ), т.е. представляет собой не боковую стенку, а горизонтальное дно сосуда, суммарное давление определяется по тем же формулам и составляет

$$P = p S \quad \text{и} \quad p = p_0 + \rho g h, \quad \text{следовательно}$$

$$P = (p_0 + \rho g h) S \quad (31).$$

Где  $h$  - в этом случае, высота столба жидкости в сосуде.

Из формулы следует, что сила давления на дно зависит не от формы и объема сосуда, а от площади дна, плотности жидкости (рода жидкости) и высоты столба этой жидкости в сосуде. Поэтому для сосудов разной формы заполненных одной и той же жидкостью до одного и того же уровня  $h$  и имеющих одинаковую площадь дна, сила полного давления на дно будет одинакова. Это свойство жидкости, на первый взгляд противоречащее обычным представлениям, известно под названием гидростатического парадокса. Действительно обычно сложно понять, что сила давления на дно сосуда не зависит от его объема. Только после детального разбора физики этого

явления, сравнения понятий сила давления и сила тяжести - все становится понятным.

### 2. Описание лабораторной установки.

Опытная установка (рис. 8) представлена прибором Паскаля с тремя сосудами различной формы. Сосуды без дна имеют одинаковую площадь нижнего отверстия.

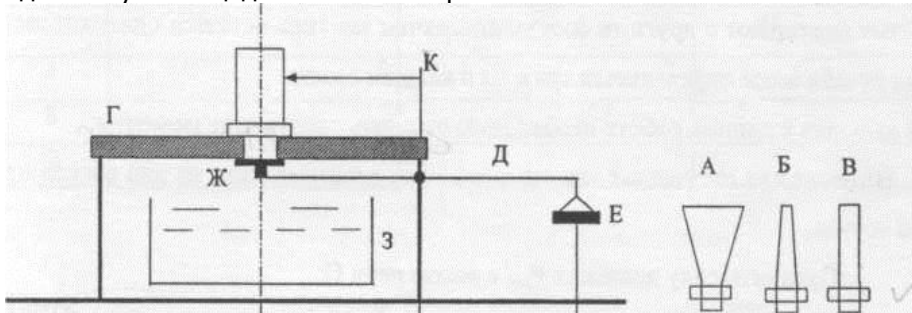


Рис.8 Прибор Паскаля для доказательства гидростатического парадокса.

В верхней доске - «Г» прибора имеется отверстие, в которое вставляется каждый из сосудов по очереди. Коромысло весов «Д» имеет, с одной стороны, под веску для гирь «Е», а с другой - пластину «Ж», которая служит дном сосудов. Бачок — «З» устанавливается для сбора воды из сосудов. Высота столба наливаемой вода в сосудах измеряется с помощью уровнемера «К».

### 3. Методика проведения опыта.

1. В отверстие доски «Г» прибора устанавливается один из опытных сосудов.

2. На подвеску для гирь устанавливается гиря, которая будет прижимать пластинку «Ж», закрывая нижнее отверстие сосуда.

3. В сосуд наливается вода до тех пор, пока сила от давления столба жидкости не оторвет пластинку «Ж», и вода станет выливаться в бачок — «З». В этот момент с помощью указателя уровня необходимо зафиксировать высоту столба воды в сосуде. Открытие нижнего отверстия происходит в тот момент, когда сила давления столба воды  $P_{изб}$  преодолет вес гири  $G$ , поставленной на подвеску. В этом легко убедиться, если теоретически определить силу давления воды на дно сосуда по формуле:

$$P_{изб} = \omega \gamma h \quad (32)$$

## Основы гидравлики и теплотехники

где  $\gamma$  - удельный вес воды, Н/м<sup>3</sup>;

$h$  — высота столба воды, открывающая пластинку, м;

$\omega$  - площадь дна сосуда, м<sup>2</sup>.

Высота столба воды определяется трижды в каждом опыте.

Записать результаты замеров в таблицу 1.

4.Опыт повторяют с другими сосудами, причем вес гирь остается одинаковым. Высота столба воды определяется трижды в каждом опыте.

Записать результаты замеров в таблицу 1.

4.Расчеты исследовательской части работы.

Табл.1. Таблица измерений для лабораторной работы № 1 (часть 1).

Форма сосуда	Диаметр отверстия дна, D	Масса гири, m	Высота столба в момент отрыва пластинки от дна, h		
	м	кг	м	м	м
А					
Б					
В					

Табл.2. Таблица расчетов для лабораторной работы № 1(часть 1).

Форма сосуда	Удельный вес воды, $\gamma = \rho g$	Площадь сечения дна, $\omega$	Вес гири, G	Средняя высота столба воды в момент отрыва пластинки от дна, $h_{cp}$	Сила давления воды на дно, $P_{изб} = \omega \gamma h_{cp}$
	Н/М <sup>3</sup>	М <sup>2</sup>	Н	М	Н

5.Вопросы к лабораторной работе №1 (часть 1).

Что такое гидростатический парадокс?

Почему исследуемое в этой части работы явление называют парадоксом?

Что такое сила гидростатического давления? Что такое гидростатическое давление? В чем разница этих понятий?

С какими погрешностями измерений сталкиваются при выполнении данной работы?

Напишите основное уравнение гидростатики.

## Лабораторная работа № 1 (Часть 2).

Определение разрывающего усилия гидравлического пресса (Паскаля).

Цель работы: опытное определение разрывающего усилия, которое может развить гидравлический пресс на большом поршне и усилия, которое необходимо для этого приложить к малому поршню (табл. 3 и табл.4).

### 1. Краткая теоретическая часть.

Из понятия «гидростатическое давление» и основного закона гидростатики следует весьма важное следствие – давление, приложенное к поверхности покоящейся жидкости передается во все точки этой жидкости с одинаковой величиной, без изменения. Это является формулировкой закона Паскаля.

### 2. Описание опытной установки.

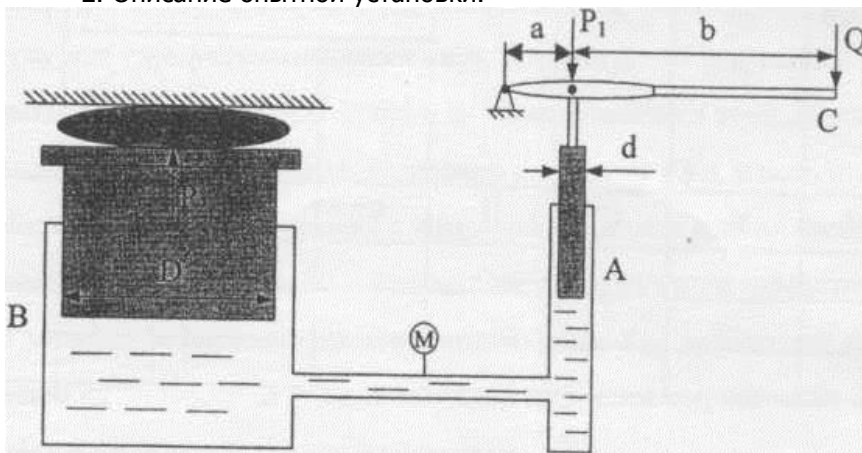


Рис.9. Схема гидравлического пресса.

Опытная установка (рис. 9) представляет собой действующую

щую модель гидравлического пресса, которая состоит из двух сообщающихся цилиндров, малого - А и большого - В; поршней диаметрами D и d, рычага С с ручным приводом.

3. Методика проведения опыта.

При опускании рукоятки малого поршня вниз под действием силы Q перемещаем малый поршень вниз, оказывая давления на масло, которым заполнен гидравлический пресс. Создавая добавочное давление, оказываем воздействие на большой поршень с силой  $P_2$ , вследствие чего поршень перемещается вверх и деформирует заготовку. В момент разрыва фиксируется давление на манометре М. Записать результаты замеров в таблицу 3.

По результатам эксперимента определяют:

1. Усилие на большом поршне:

$$P_2 = p \Omega = (н) \quad (33)$$

где p - показание манометра (избыточное давление) в момент разрушения заготовки, кгс/см<sup>2</sup>;

$\Omega$  - площадь большого поршня, м<sup>2</sup>.

2. Усилие на малом поршне  $P_1$  по формуле (33), подставляя в нее площадь малого поршня  $\omega$ ;

3. Усилие Q, приложенное к рычагу малого поршня,

$$Q = \frac{P_2 a}{a+b} = (н) \quad (34)$$

a и b – плечи рычага, м.

В выводах к данной работе необходимо объяснить, почему в гидравлическом прессе получают усилие на большем поршне большей величины, чем создают рукояткой.

Расчеты для исследовательской части работы.

Табл.3. Таблица измерений для лабораторной работы № 1 (часть 2).

Диаметр поршня		Плечи рычага		Показания манометра
большого, D	малого, d	a	b	М
м	м	м	м	МПа

Табл.4. Таблица расчетов для лабораторной работы № 1 (часть 2).

Площадь поршня,		Усилие на б. поршне $P_2 = \rho \Omega$	Усилие на м. поршне	Усилие на рычаге, $Q = \frac{F_2 \cdot a}{a+b}$
большого, $\Omega$	малого, $\omega$	$P_2$	$P_2$	Q
$m^2$	$m^2$	H	H	H

5. Вопросы к лабораторной работе № 1 (часть 2).

Сформулируйте Закон Паскаля.

Во сколько раз усилие на большом поршне больше чем усилие на малом поршне? Объясните это.

Где в технике применяют Закон Паскаля.

4. С какими погрешностями измерений сталкиваются при выполнении данной работы?

## Лабораторная работа № 2.

Исследование режимов движения потока жидкости.

Цель работы: визуальное и аналитическое определение ламинарного и турбулентного режимов движения потоков жидкости, определение параметров характеризующих каждый из режимов.

1. Краткая теоретическая часть.

Одной из основных задач практической гидравлики является – точная оценка потерь напора на преодоление гидравлических сопротивлений, возникающих при движении потока жидкости в различных гидравлических системах. Точный расчет этих потерь во многом определяет надежность технических расчетов, степень совершенства и экономическую целесообразность инженерных решений принимаемых при проектировании.

Чтобы правильно определить эти потери, необходимо иметь ясное и четкое представление о механизме самого движения потока жидкости. Впервые этот механизм был основательно исследован Рейнольдсом, на экспериментальной уста-

новке, представленной им в 1883 году.

На основе простых и наглядных опытов, проведенных на установке, Рейнольдс сделал вывод о существовании двух различных, резко отличающихся друг от друга режимов движения потока жидкости.

Движение жидкости при малых скоростях, когда отдельные струйки жидкости движутся параллельно оси потока, называют ламинарным [лат, ламина - слой], или струйчатым. Ламинарное движение можно рассматривать, как движение отдельных слоев жидкости, происходящее без перемешивания частиц.

Второй вид движения жидкости, наблюдаемый при больших скоростях, называют турбулентным [лат, турбулентус - вихревой]. В этом случае в движении жидкости нет видимой закономерности. В действительности и при турбулентном режиме есть свой порядок.

Обобщив результаты своих опытов, проведенных на круглых трубах, а также исходя из некоторых теоретических соображений, Рейнольдс нашел общие условия, при которых возможны существование того или другого режима, а также определил условия перехода от одного режима к другому. Он установил: основными параметрами, определяющими характер режима потока жидкости являются - средняя скорость движения жидкости  $v$ , диаметр трубопровода  $d$ , плотность жидкости  $\rho$ , ее вязкость  $\nu$ .

Для характеристик режима движения потока жидкости Рейнольдс ввел безразмерный параметр  $Re$ , учитывающий влияние перечисленных выше факторов, называемый числом [критерием] Рейнольдса.

$$Re = \frac{v d}{\nu} \quad (35)$$

Границы существования того или иного режима движения жидкости определяются критическим значением числа Рейнольдса.

$$Re = 2300$$

По исследованиям проведенным после Рейнольдса приняли, что:

- для потоков с  $Re < 2300$  режим считается ламинарным,

- для потоков с  $Re > 2300$  - турбулентным.

Без особого труда могут быть получены значения  $Re$  для сечения потока любой формы. Значение  $Re$  для некруглых



труб можно получить, введя в формулу числа Рейнольдса вместо диаметра сечения  $4R$ .

Величину  $R$  называют гидравлическим радиусом. Гидравлический радиус определяют по формуле

$$R = \frac{\omega}{\chi} = (м) \quad (36)$$

Тогда для круглого сечения гидравлический радиус будет определять формула

$$R = \frac{D^2 \pi}{4 \cdot 2\pi r}$$

после преобразования эта формула будет иметь вид

$$R = \frac{d}{4} \quad (37)$$

Тогда можно получить формулу для числа Рейнольдса, выраженного через гидравлический радиус откуда

$$Re = \frac{4Rv}{\nu} \quad (38).$$

Принимая по-прежнему для критического значения числа Рейнольдса независимо от формы живого сечения  $Re_{кр.} = 2300$ , находим, что для сечения любой формы критерием для суждения о характере режима движения является величина, равная  $2300 / 4 = 575$ .

Таким образом,

если  $\frac{Rv}{\nu} < 575$ , режим ламинарный,

если  $\frac{Rv}{\nu} > 575$ , режим турбулентный.

Необходимо обратить внимание при расчетах на одно из основных условий достоверности выведенной Рейнольдсом формулы. Она справедлива для установившегося потока жидкости. Установившимся потоком жидкости называется поток, у которого в каждой точке постоянная скорость и постоянное давление у частиц жидкости протекающих через эту точку.

2. Описание экспериментальной установки.

Экспериментальная установка выполнена в соответствии со схемой установки Рейнольдса, и представлена на рисунке 10, где:

1 – кран, установленный на водопроводе;

2 – водопровод, из которого наполняется накопительный резервуар 3, при проведении эксперимента кран 1 на водопроводе открыт;

3 – напорная емкость с водосливом, наполнена полностью и лишняя вода постоянно, в процессе проведения опытов, стекает в сливную емкость 4, это обеспечивает постоянное давление в каждой точке потока жидкости в экспериментальном трубопроводе 7;

4 – сливная емкость, в которую по водосливу стекает лишняя вода, так создают постоянное давление в каждой точке потока в стеклянной трубе 7;

5 – емкость с окрашенной жидкостью;

6 – кран на трубке, ведущей от емкости в окрашенной жидкостью 5 в экспериментальный трубопровод 7;

7 – экспериментальный трубопровод, в котором наблюдают различные режимы потока;

8 – кран на экспериментальном трубопроводе, позволяющий менять скорости потока жидкости;

9 – мерная емкость, которая позволяет определить, какой объем  $V$  вытекает за определенное время  $t$ ,

10 – кран на мерной емкости;

11 – канализация.

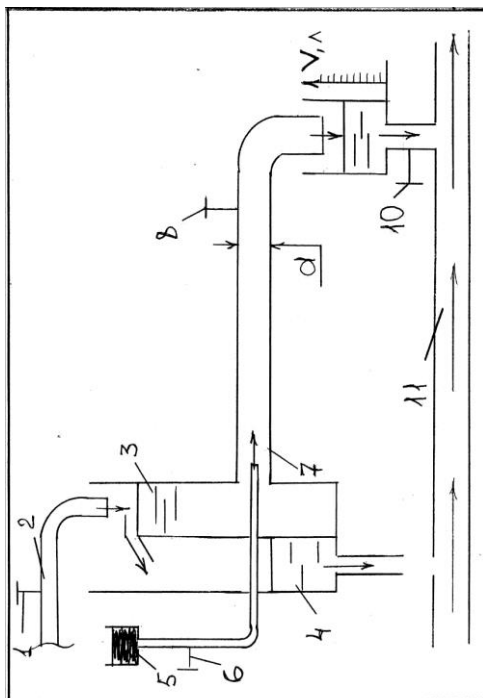


Рис 10. Схема установки Рейнольдса

3. Методика проведения эксперимента.
  1. Открыть кран 1.
  2. Наполнить резервуар 3, в процессе проведения опытов необходимо следить за тем, чтобы вода все время переливалась через водослив. Это обеспечивает наличие установившегося движения потока в трубе 7.
  3. Частично открыть кран 8 на трубопроводе 7. Степень открытия крана должна обеспечивать небольшую скорость в трубопроводе.
  4. Подождать несколько минут, для того чтобы режим скоростей в трубопроводе 7 окончательно установился.
  5. Визуально классифицировать поток в стеклянном трубопроводе. Сделать соответствующую запись о принадлежности режима к ламинарному или турбулентному в таблицу наблюдений 5.
  6. Закрыть кран 10 на мерной емкости. Произвести замер объема  $V$ , вытекающий за время  $t$  в мерную емкость 9. Записать результаты замеров в таблицу 5.
  7. Значительнее открыть кран 8 на экспериментальном трубопроводе, что обеспечит в этом трубопроводе большую скорость, по сравнению с предыдущим опытом.
  8. Подождать несколько минут, для того чтобы режим скоростей в трубопроводе 7 окончательно установился.
  9. Визуально классифицировать поток в стеклянном трубопроводе. Сделать соответствующую запись о принадлежности режима к ламинарному или турбулентному в таблицу наблюдений 5.
  10. Закрыть кран 10 на мерной емкости. Произвести замер объема  $V$ , вытекающий за время  $t$  в мерную емкость 9. Записать результаты замеров в таблицу 5.
  11. Значительнее открыть кран 8 на экспериментальном трубопроводе, что обеспечит в этом трубопроводе большую скорость, по сравнению с предыдущим опытом.
  12. Подождать несколько минут, для того чтобы режим скоростей в трубопроводе 7 окончательно установился.
  13. Визуально классифицировать поток в стеклянном трубопроводе. Сделать соответствующую запись о принадлежности режима к ламинарному или турбулентному в таблицу наблюдений 5.
  14. Закрыть кран 10 на мерной емкости. Произвести замер объема  $V$ , вытекающий за время  $t$  в мерную емкость 9. Записать результаты замеров в таблицу 5.

Табл.5. Таблица измерений для лабораторной работы № 2.

№ опыта	Объем вытекшей воды, V	Время t, за которое вытек объем V	Внешний вид струйки жидкости, режим по результату визуального наблюдения
	л	Сек	
1			
2			
3			

Диаметр экспериментального трубопровода, в котором наблюдаем за структурой режима, равен 20 мм.  $D = 20$  мм.

4. Методика проведения расчетов результатов эксперимента.

1. Результаты проведенных расчетов и выводов заносят в таблицу 6.

2. Рассчитываем объемный расход, протекающий по экспериментальному трубопроводу 7, во время каждого из трех опытов

$$Q = \frac{V}{t} \quad (39).$$

3. Рассчитываем среднюю скорость потока жидкости, протекающего по экспериментальному трубопроводу 7, во время каждого из трех опытов.

$$U_{\text{ср}} = \frac{Q}{\omega} \quad (40).$$

$\omega$  - площадь живого сечения потока, т.к. трубопровод круглый, будет определяться по нижеследующей формуле.

$$\omega = \frac{\pi D^2}{4} \quad (41).$$

$D = 20$  мм

4. Чтобы определить по расчетам принадлежность к режиму потока, необходимо:

а) подсчитать число Рейнольдса для каждого из потоков по приведенной ниже формуле

$$Re = \frac{\rho d}{\nu};$$

б) сравнить полученное значение в каждом опыте с критическим числом Рейнольдса  $Re_{кр.} = 2300$ ,

в) после сравнения классифицировать режим, как ламинарный или турбулентный, и записать это в таблицу 6.

Табл.6. Таблица расчетов для лабораторной работы № 2.

№ опыта	Расход, Q	Средняя скорость	Число Рейнольдса $Re = \frac{v d}{\nu}$	Режим потока по результатам расчета
	$\frac{M^3}{с}$	$\frac{M}{с}$		
1				
2				
3				

5. Вопросы к лабораторной работе №2.

1. Как определяют число Рейнольдса для круглых и некруглых труб? Для чего его необходимо определять?

2. Как определить характер режима потока, зная число Рейнольдса этого потока?

3. Для чего необходимо определять режим потока. Какое практическое значение имеет это число?

4. Нарисуйте эпюры распределения скоростей для каждого из режимов потока.

5. В каких единицах измеряют число Рейнольдса?

### Лабораторная работа № 3.

Исследование уравнения Бернулли.

Цель работы. Экспериментально определить слагаемые уравнения Бернулли (УБ) и дать их энергетическую, гидравлическую и геометрическую интерпретацию.

1. Краткая теоретическая часть.

УБ выражает закон сохранения энергии, который гласит: энергия любой замкнутой системы сохраняется (при всех процессах, происходящих в ней). При этом энергия может превращаться

из одной формы в другую и перераспределяться между этими формами.

В случае УБ это три различных удельных энергии: удельная энергия положения, удельная энергия давления, удельная энергия скорости.

При увеличении скорости, в каком либо сечении замкнутой гидравлической системы, произойдет увеличение доли удельной энергии скорости. Увеличение доли удельной энергии скорости в выбранном сечении приведет к уменьшению доли удельной энергии давления для этого сечения (так как удельная энергия положения неизменна), как и общее количество энергии в сечении.

Уравнение Бернулли справедливо для плавноизменяющихся установившихся потоков жидкости.

УБ для потока реальной жидкости в трех сечениях будет иметь вид:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_1 \frac{v_2^2}{2g} + h_{1-2} = Z_3 + \frac{P_3}{\gamma} + \alpha_1 \frac{v_3^2}{2g} + h_{1-3} \quad (42)$$

$Z_1, Z_2, Z_3$  - геометрический напор или удельная энергия положения, удельная потенциальная энергия, вертикальные координаты оси потока над произвольно выбранной плоскостью сравнения 0-0. Эта плоскость для горизонтально расположенного трубопровода обычно совмещается с осью трубы.

$\frac{P_1}{\gamma}; \frac{P_2}{\gamma}; \frac{P_3}{\gamma}$  - пьезометрический напор или удельная энергия давления, удельная потенциальная энергия, соответственно для сечений 1, 2, 3.

$\alpha_1 \frac{v_1^2}{2g}; \alpha_1 \frac{v_2^2}{2g}; \alpha_1 \frac{v_3^2}{2g}$  - скоростной напор или удельная энергия скорости, удельная кинетическая энергия, соответственно для сечений 1, 2, 3.

$h_{1-2}, h_{1-3}$  – потери напора, неизбежно происходящие при движении потока между сечениями 1 и 2, 1 и 3.

## 2. Описание экспериментальной установки.

На рисунке 11 представлена схема стенда для исследования уравнения Бернулли. Схема предполагает следующие основные элементы гидравлической системы.

- 1 – кран, установленный на водопроводе;
- 2 – водопровод, из которого наполняется накопительный

резервуар 3, при проведении эксперимента кран 1 на водопроводе открыт;

3 – напорная емкость с водосливом, наполнена полностью и лишняя вода постоянно, в процессе проведения опытов, стекает в сливную емкость 4, это обеспечивает постоянное давление в каждой точке потока жидкости в экспериментальном трубопроводе 7;

4 – сливная емкость, в которую по водосливу стекает лишняя вода, так создают постоянное давление в каждой точке потока в стеклянной трубе 7;

5 - Труба Вентури,

6 - пьезометрический ряд, с пьезометрами №12, №13, №14, №15 и №16 .

7 – экспериментальный трубопровод, в котором наблюдают различные механизмы потока;

8 – кран на экспериментальном трубопроводе, позволяющий менять скорости потока жидкости;

9 – мерная емкость, которая позволяет определить, какой объем  $V$  вытекает за определенное время  $t$ ,

10 – кран на мерной емкости;

11 – канализация.

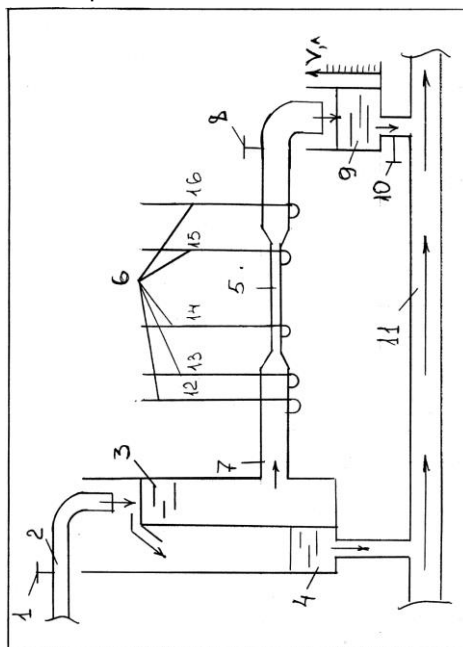


Рис 11. Схема установки для исследования уравнения Бернулли.

3. Методика проведения эксперимента.
  1. Открыть кран 1.
  2. Наполнить резервуар 3, в процессе проведения опытов необходимо следить за тем, чтобы вода все время переливалась через водослив. Это обеспечивает наличие установившегося движения потока в трубе 7.
  3. Частично открыть кран 8 на трубопроводе 7. Степень открытия крана должна обеспечивать небольшую скорость в трубопроводе.
  4. Подождать несколько минут, для того чтобы режим скоростей в трубопроводе 7 окончательно установился.
  5. Поворачивая кран 8 в разные стороны создать этим определенный напор в системе, определяемый уровнем воды в пьезометре №12. Уровень в пьезометре №12 в первом эксперименте должен соответствовать 900 мм.
  6. Подождать несколько минут, для того чтобы режим скоростей в трубопроводе 7 окончательно установился.
  7. Снять показания всех пьезометров №13, №14, №15 и №16, при постоянном уровне в пьезометре №12, соответствующем 900 мм.
  8. Замерить объем  $V$  (при созданном режиме), втекающий за время  $t$  в мерную емкость 9.
  9. Записать результаты замеров в таблицу 7.
  10. Поворачивая кран 8 в разные стороны создать этим определенный напор в системе, определяемый уровнем воды в пьезометре №12. Уровень в пьезометре №12 в втором эксперименте должен соответствовать 800 мм.
  11. Подождать несколько минут, для того чтобы режим скоростей в трубопроводе 7 окончательно установился.
  12. Снять показания всех пьезометров №13, №14, №15 и №16, при постоянном уровне в пьезометре №12, соответствующем 800 мм.
  13. Замерить объем  $V$  (при созданном режиме), втекающий за время  $t$  в мерную емкость 9.
  14. Записать результаты замеров в таблицу 7.
  15. Подождать несколько минут, для того чтобы режим скоростей в трубопроводе 7 окончательно установился.
  16. Снять показания всех пьезометров №13, №14, №15 и №16, при постоянном уровне в пьезометре №12, соответствующем 700 мм.
  17. Замерить объем  $V$  (при созданном режиме), втекающий



за время  $t$  в мерную емкость 9.

18. Записать результаты замеров в таблицу 7.

Табл.7. Таблица измерений для лабораторной работы № 3.

№ опыта	Показания пьезометров по номерам					Объем	Время $t$ , за которое вытек
	№12	№13	№14	№15	№16		
Ед.измерения	м	м	м	м	м	л	сек
1							
д диаметр живого сечения, мм	0,015	0,015	0,011	0,011	0,015		

4. Методика проведения расчетов результатов эксперимента.

1. Результаты проведенных расчетов и выводов заносят в таблицу 8.

2. Так как трубопровод расположен горизонтально, то в таких случаях считают, что плоскость сравнения проходит через ось симметрии трубопровода. Это означает, что все геометрические напоры равны между собой и равны 0. Можно записать

$$Z_{12} = Z_{13} = Z_{14} = Z_{15} = Z_{16} = 0 \quad (43)$$

3. Рассчитываем объемный расход, протекающий по экспериментальному трубопроводу 7, во время каждого из трех опытов

$$Q = \frac{V}{t} \quad (39).$$

4. Рассчитываем среднюю скорость потока жидкости, протекающего по экспериментальному трубопроводу 7 в исследуемых сечениях – №13, №14, №15, №16, во время каждого из трех опытов.

$$v_{\text{ср}} = \frac{Q}{\omega} \quad (40).$$

$\omega$  - площадь живого сечения потока в каждом сечении, т.к. трубопровод круглый, будет определяться по нижеследующей формуле.

$$\omega = \frac{\pi D^2}{4} \quad (41).$$

5. Определяем скоростной напор  $\frac{v^2}{2g}$  для каждого сечения (№13, №14, №15, №16) в каждом эксперименте, результаты вычислений заносим в таблицу №8.

6. Пьезометрический напор  $\frac{p}{\gamma}$  в каждом сечении, для каждого опыта, определяют показания пьезометров. Переносим их из таблицы 7.

7. Полный напор для каждого сечения в каждом эксперименте определяют суммой

$$H = Z + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} \quad (42),$$

т.к.  $Z$  во всех случаях будет равна 0. Полный напор будет определяться формулой

$$H = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} \quad (43).$$

Определяем полный напор для каждого сечения в каждом эксперименте.

8. Определяем потери напора (удельной энергии) между соседними сечениями разностью

$$h_{13-14} = H_{13} - H_{14} \quad (44)$$

$$h_{13-15} = H_{13} - H_{15} \quad (45)$$

$$h_{13-16} = H_{13} - H_{16} \quad (46)$$

Потери напора возникают из-за трения струек потока, струйки трутся друг о друга в потоке (вязкость), трутся о стенки трубопровода (шероховатость). Они есть в любом потоке реальной жидкости.

9. По таблице № 8 необходимо построить график уравнения Бернулли для первого опыта (для построения графика обычно выбирается максимальный расход из всех опытов). Для построения необходимо по оси ординат ( $y$ ) отложить величину  $H$  в м. По оси абсцисс ( $x$ ) через равные отрезки провести вертикальные линии, которые обозначить номерами пьезометров №13, №14, №15, №16.

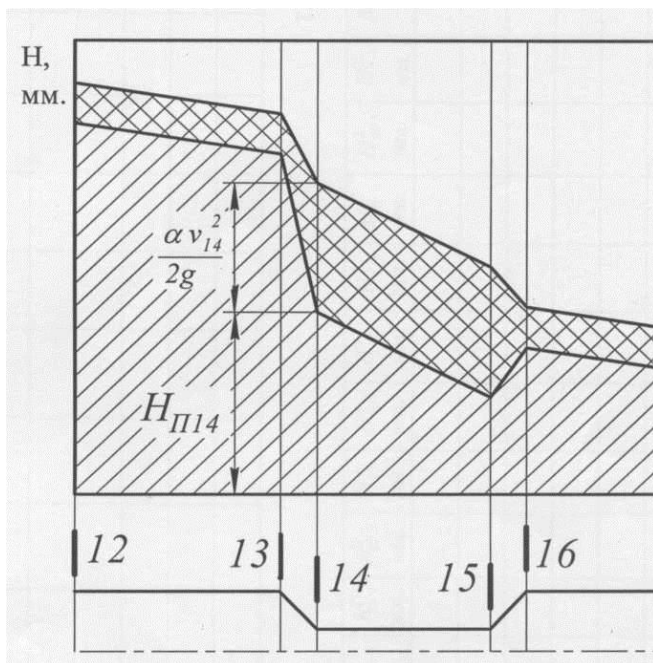


Рис.12. Схема построения графика уравнения Бернулли.  
Табл.8. Таблица расчетов для лабораторной работы № 3.

$h_{13-16}$	$\Sigma$			
$h_{13-15}$	$\Sigma$			
$h_{13-14}$	$\Sigma$			
$H_{16}$	$\Sigma$			
$H_{15}$	$\Sigma$			

$H_{14}$	$\Sigma$			
$H_{13}$	$\Sigma$			
$\frac{P_{16}}{\gamma}$	$\Sigma$			
$\frac{P_{15}}{\gamma}$	$\Sigma$			
$\frac{P_{14}}{\gamma}$	$\Sigma$			
$\frac{P_{13}}{\gamma}$	$\Sigma$			
$\frac{v_{16}^2}{2g}$	$\Sigma$			
$\frac{v_{15}^2}{2g}$	$\Sigma$			
$\frac{v_{14}^2}{2g}$	$\Sigma$			
$\frac{v_{13}^2}{2g}$	$\Sigma$			
$v_{16}$	$\text{М}$			
$v_{15}$	$\text{М}$			
$v_{14}$	$\text{М}$			
$v_{13}$	$\text{М}$			
Q	$\frac{\text{М}^3}{\text{с}}$			
№ опыта	Ед. измерения	1	2	3

10. Выбрать масштабный коэффициент для напора, таким образом, чтобы по вертикали от оси абсцисс можно было отложить вверх все значения  $H$ .

11. От оси абсцисс ( $x$ ) вверх по вертикальным линиям №13,

№14, №15, и №16 отложить значения величин  $\frac{P_{13}}{\gamma}$ ,  $\frac{P_{14}}{\gamma}$ ,  $\frac{P_{15}}{\gamma}$ ,  $\frac{P_{16}}{\gamma}$  в выбранном масштабе.

12. Соедините эти отрезки ломаной линией. Так получим линию пьезометрического напора.

13. От каждого отрезка  $\frac{P_{13}}{\gamma}$ ,  $\frac{P_{14}}{\gamma}$ ,  $\frac{P_{15}}{\gamma}$ ,  $\frac{P_{16}}{\gamma}$  на графике вверх по вертикальной линии отложить соответствующий линии скоростной напор  $\frac{v_{13}^2}{2g}$ ,  $\frac{v_{14}^2}{2g}$ ,  $\frac{v_{15}^2}{2g}$ ,  $\frac{v_{16}^2}{2g}$ .

Вверх от  $\frac{P_{13}}{\gamma}$  отложить  $\frac{v_{13}^2}{2g}$ , от  $\frac{P_{14}}{\gamma}$  отложить  $\frac{v_{14}^2}{2g}$  и так далее. Так получим линию полной удельной энергии или полного напора. Сложение  $\frac{P_{14}}{\gamma}$  и  $\frac{v_{14}^2}{2g}$  дают полный напор  $H$  в сечении.

14. Если из точки отражающий полный напор в сечении №13 провести горизонтальную линию, то эта линия обозначит потери напоров в каждом сечении.

5. Вопросы к лабораторной работе №3.

1. Написать уравнение Бернулли для потока реальной жидкости.

2. Объясните физический, гидравлический и геометрический смыслы уравнения Бернулли.

3. Необходимые условия для достоверности уравнения Бернулли.

4. Что такое  $h_{n-n+1}$  в уравнении Бернулли?

5. Как строят и для чего график уравнения Бернулли?

### Лабораторная работа № 4.

Определение коэффициента гидравлического трения по длине  $\lambda$ .

Цель работы. Экспериментальное и аналитическое определение коэффициента трения по длине. Сравнительный анализ полученных результатов.

## 1. Краткая теоретическая часть.

В уравнении Бернулли для потока реальной жидкости есть слагаемое  $h_{n-n+1}$ , которое учитывает все потери, возникающие при движении потока от одного сечения до другого (от  $n$ -го до  $n+1$ ). Эта величина определяется по формуле

$$h_{n-n+1} = h_{\text{дл}} + \sum h_{\text{м.с.}}, \quad (47)$$

где

$h_{\text{дл}}$  - потери удельной энергии, возникающие по длине трубопровода,

$\sum h_{\text{м.с.}}$  - сумма всех местных потерь удельной энергии, возникающих в местах, где поток меняет или направление, или величину, или одновременно и направление и величину.

Считается, что потери энергии преобразуются в тепловую энергию, которая рассеивается в окружающей среде.

Потери по длине потока (линейные потери) обычно обозначаются  $h_{\text{дл}}$ .

Это затраты удельной энергии потока (напора) на преодоление сопротивления трению (трению потока о стенки трубопровода, трение струек друг о друга).

Эти потери определяются по формуле Дарси-Вейсбаха.

$$h_{\text{дл}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (48),$$

где

$l$  – длина трубопровода,

$d$  – диаметр трубопровода, когда трубопровод не круглый,

то

необходимо воспользоваться гидравлическим радиусом

$R$ ,

$v$  - скорость потока в конечном сечении трубопровода.

$\lambda$  - коэффициент гидравлического трения, теоретически определяемый:

а) для турбулентного потока по формуле Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (49)$$

б) для ламинарного потока

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (50),$$

Re – число Рейнольдса, определяемое по формуле

$$Re = \frac{\vartheta d}{\nu};$$

$\nu$  - коэффициент кинематической вязкости.

$u$  - средняя скорость потока в трубопроводе,

$d$  - диаметр трубопровода, если он не круглый воспользоваться

гидравлическим радиусом,  $4R = D$ , где

$$R = \frac{\omega}{\chi} = (м)$$

$\omega$  - площадь живого сечения трубопровода,

$\chi$  - смоченный периметр.

## 2. Описание экспериментальной установки.

Принцип работы стенда заключается в изменении структуры и параметров потока воды (скоростей, давлений, расходов), протекающих через исследуемые модули при различных условиях.

Модули представляют собой трубопровод круглого сечения, на которых установлено по два пьезометра, отстоящие друг от друга на расстоянии 1 метр.

Внутренние диаметры исследуемых трубопроводов имеют следующие размеры :  $d = 15$  мм,  $d = 11$  мм.

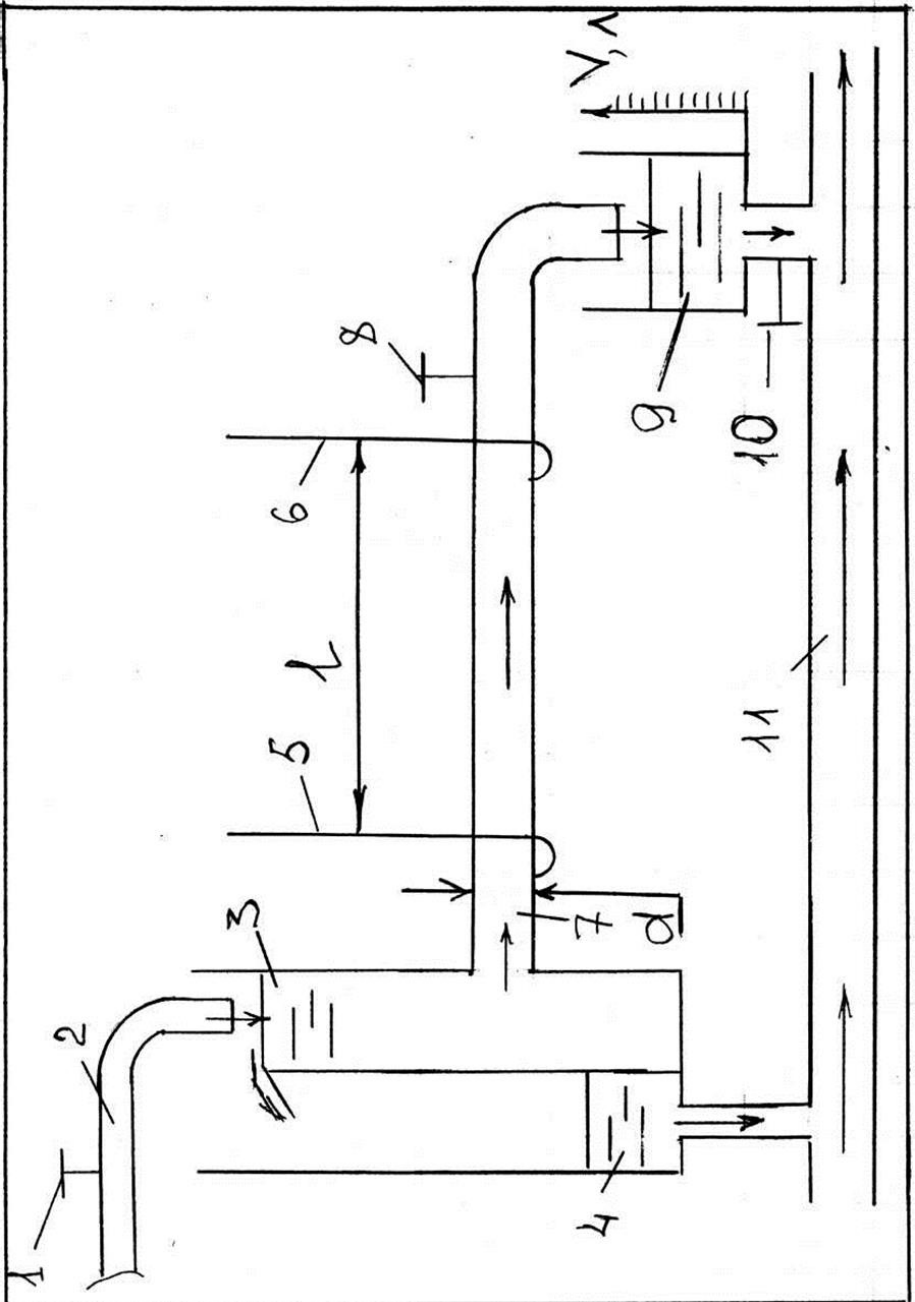


Рис.13. Схема экспериментальной установки для определения коэффициента гидравлического трения по длине.



На схеме экспериментальной установки для определения коэффициента гидравлического трения (рис.№13) по длине:

- 1 – кран, установленный на водопроводе;
- 2 – водопровод, из которого наполняется накопительный резервуар 3, при проведении эксперимента кран 1 на водопроводе открыт;
- 3 – напорная емкость с водосливом, наполнена полностью и лишняя вода постоянно, в процессе проведения опытов, стекает в сливную емкость 4, это обеспечивает постоянное давление в каждой точке потока жидкости в экспериментальном трубопроводе 7;
- 4 – сливная емкость, в которую по водосливу стекает лишняя вода, так создают постоянное давление в каждой точке потока в стеклянной трубе 7;
- 5 - пьезометры 1 и 2,
- 6 – пьезометры 3 и 4,
- 7 – экспериментальный трубопровод, в котором наблюдают различные механизмы потока;
- 8 – кран на экспериментальном трубопроводе, позволяющий менять скорости потока жидкости;
- 9 – мерная емкость, которая позволяет определить, какой объем  $V$  вытекает за определенное время  $t$ ,
- 10 – кран на мерной емкости;
- 11 – канализация.

### 3. Методика проведения эксперимента.

1. Открыть кран 1.
2. Наполнить резервуар 3, в процессе проведения опытов необходимо следить за тем, чтобы вода все время переливалась через водослив. Это обеспечивает наличие установившегося движения потока, в исследуемых трубопроводах.
3. Частично открыть кран 8 на трубопроводе  $d = 15$  мм. Степень открытия крана должна обеспечивать небольшую скорость в трубопроводе.
4. Подождать несколько минут, для того чтобы режим скоростей в трубопроводе 7 окончательно установился.
5. Снять показания в пьезометрах №1 и №2.
6. Замерить объем  $V$ , вытекающий в мерную емкость 9 (при созданном режиме) за время  $t$ .
7. Записать результаты замеров в таблицу 9.
8. Открыть кран 8 на трубопроводе 7. Степень открытия крана должна обеспечивать бо'льшую скорость (по сравнению с

предыдущим опытом) в трубопроводе.

9. Подождать несколько минут, для того чтобы режим скоростей в трубопроводе 7 окончательно установился.

10. Снять показания в пьезометрах №1 и №2.

11. Замерить объем  $V$  вытекающий в мерную емкость 9 (при созданном режиме), вытекающий за время  $t$ .

12. Записать результаты замеров в таблицу 9.

13. Закрыть кран на трубопроводе  $d = 15$  мм.

14. Частично открыть кран 8 на трубопроводе  $d = 11$  мм. Степень открытия крана должна обеспечивать небольшую скорость в трубопроводе.

15. Подождать несколько минут, для того чтобы режим скоростей в трубопроводе 7 окончательно установился.

16. Снять показания в пьезометрах №3 и №4.

17. Замерить объем  $V$ , вытекающий в мерную емкость 9 (при созданном режиме) за время  $t$ .

18. Записать результаты замеров в таблицу 9.

19. Открыть кран 8 на трубопроводе 7. Степень открытия крана должна обеспечивать бо'льшую скорость (по сравнению с предыдущим опытом) в трубопроводе.

20. Подождать несколько минут, для того чтобы режим скоростей в трубопроводе 7 окончательно установился.

21. Снять показания в пьезометрах №3 и №4.

22. Замерить объем  $V$  вытекающий в мерную емкость 9 (при созданном режиме), вытекающий за время  $t$ .

23. Записать результаты замеров в таблицу 9.

Табл.9. Таблица измерений для лабораторной работы № 4.

№ опыта	Показания пьезометров		Диаметр трубопров.	Объем вытекшей воды, $V$	Время $t$ , за которое вытек объем $V$
	№1	№2			
	м	м	м	л	сек
1			0,015		
2			0,015		
	Показания пьезометров				

	№3	№4			
3			0,011		
4			0,011		

4. Методика проведения расчетов результатов эксперимента.

1. Определить потери напора между №1-м и №2-м пьезометрами

$$h_{1-2} = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} - h_2 + \frac{v_2^2}{2g} = (м) \quad (51)$$

2. Определяем площадь живого сечения круглого трубопровода

$$\omega = \frac{\pi D^2}{4} = (м^2)$$

3. Определяем расход потока воды в трубопроводе для обоих опытов

$$Q = \frac{V}{t} = \left( \frac{м^3}{с} \right) \quad (52)$$

4. Определяем среднюю скорость течения потока воды в трубопроводе

$$U = \frac{Q}{\omega} = \left( \frac{м}{с} \right) \quad (53)$$

5. Определяем число Рейнольдса по известной уже формуле:

$$Re = \frac{\rho d}{\nu} ,$$

Классифицируем режим потока – ламинарный или турбулентный и рассчитываем  $\lambda_{анал.}$ . По одной из двух предложенных формул.

Для турбулентного потока по формуле Блазиуса  $\lambda =$

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

Для ламинарного потока по формуле  $\lambda = \frac{64}{Re}$ .

6. По результатам эксперимента рассчитываем  $\lambda_{\text{экспер}}$ . Из формулы Дарси-Вейсбаха.

$$\lambda_{\text{экспер}} = h_{\text{дл}} \frac{d}{l} \frac{2g}{v^2} \quad (54)$$

7. Определить % погрешность между экспериментально и аналитически определенным коэффициентом трения по длине. Для этого будем считать экспериментальные данные более достоверные и примем

$$\lambda_{\text{экспер}} \rightarrow 100\%$$

$$\lambda_{\text{аналит}} \rightarrow x\%$$

Чтобы найти  $x$  необходимо составить дробь

$$X = \frac{\lambda_{\text{аналит}} 100\%}{\lambda_{\text{экспер}}} = (\%)$$

Разница  $100\% - X\%$  будет представлять собой погрешность расчетов в %.

8. Результаты расчетов занести в таблицу 10.

9. Определить потери напора между №3-м и №4-м пьезометрами

$$h_{3-4} = h_3 - h_4 = (\text{м}) \quad (51)$$

10. Определяем площадь живого сечения круглого трубопровода

$$\omega = \frac{\pi D^2}{4} = (\text{м}^2)$$

11. Определяем расход потока воды в трубопроводе для обоих опытов

$$Q = \frac{V}{t} = \left( \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right) \quad (52)$$

12. Определяем среднюю скорость течения потока воды в трубопроводе

$$U = \frac{Q}{\omega} = \left( \frac{M}{c} \right) \quad (53)$$

13. Определяем число Рейнольдса по известной уже формуле:

$$Re = \frac{\rho d v}{\nu} ,$$

Классифицируем режим потока – ламинарный или турбулентный и рассчитываем  $\lambda_{анал.}$  По одной из двух предложенных формул.

Для турбулентного потока по формуле Блазиуса  $\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} .$

Для ламинарного потока по формуле  $\lambda = \frac{64}{Re} .$

14. По результатам эксперимента рассчитываем  $\lambda_{экспер} .$  Из формулы Дарси-Вейсбаха.

$$\lambda_{экспер} = h_{дл} \frac{d}{l} \frac{2g}{v^2} \quad (54)$$

15. Определить % погрешность между экспериментально и аналитически определенным коэффициентом трения по длине. Для этого будем считать экспериментальные данные более достоверные и примем

$$\lambda_{экспер} \rightarrow 100\%$$

$$\lambda_{аналит} \rightarrow X \% .$$

Чтобы найти X необходимо составить дробь

$$X = \frac{\lambda_{аналит} 100\%}{\lambda_{экспер}} = (\%) \quad (55)$$

Разница  $100\% - X\%$  будет представлять собой погрешность расчетов в %.

16. Результаты расчетов занести в таблицу 10.

Табл.10. Таблица расчетов для лабораторной работы № 4.

№ опыта	Потери напора мэджл. №1 и №2	Площадь живого сечения трубопровода	Расход, протек- -ий по трубопро- -ду	Скорость течения в трубопроводе	Число Рейнольдса	$\lambda_{\text{анал}}$	$\lambda_{\text{экспер}}$	% погрешности $\lambda_{\text{анал}}$	по сравнению $\lambda_{\text{экспер}}$
	М	М <sup>2</sup>	М <sup>3</sup> с	М с				%	
1									
2									
№ опыта	Потери напора мэджл. №3 и №4	Площадь живого сечения трубопровода	Расход, протек- -ий по трубопро- -ду	Скорость течения в трубопроводе	Число Рейнольдса	$\lambda_{\text{анал}}$	$\lambda_{\text{анал}}$	% погрешности $\lambda_{\text{анал}}$	по сравнению $\lambda_{\text{экспер}}$
	М	М <sup>2</sup>	М <sup>3</sup> с	М с				%	
1									
2									

5. Вопросы к лабораторной работе №4.

1. Написать уравнение Дарси-Вейсбаха, для определения потерь по длине потока.

2. Как определить потери напора в некруглом трубопроводе?

3. По закону сохранения энергии – энергия не исчезает, а переходит в другую форму, как преобразуются потери энергии.

4. Почему возникают потери по длине?

5. Почему расходятся значения коэффициента  $\lambda$  определенного экспериментально и определенного аналитически.

## Лабораторная работа № 5.

Определение коэффициента гидравлического трения от местных сопротивлений.

Цель работы. Экспериментальное определение коэффициента гидравлического трения при резком сужении и расширении. Экспериментальное определение коэффициента гидравлического трения при плавном сужении и расширении.

1. Краткая теоретическая часть.

В уравнении Бернулли для потока реальной жидкости есть слагаемое  $h_{n-n+1}$ , которое учитывает все потери, возникающие при движении потока от одного сечения до другого (от  $n$  до  $n + 1$ ). Эта величина определяется по формуле

$$h_{n-n+1} = h_{дл} + \sum h_{м.с.},$$

где  $h_{дл}$  - потери удельной энергии, возникающие по длине трубопровода,

$\sum h_{м.с.}$  - сумма всех местных потерь удельной энергии, возникающих в местах, где поток меняет или направление, или величину, или одновременно и направление и величину.

Считается, что потери энергии преобразуются в тепловую энергию, которая рассеивается в окружающей среде.

Потери от местных сопротивлений обычно обозначаются  $h_{м.с.}$ .

Это затраты удельной энергии потока (напора) на преодоление сопротивления при повороте потока, при изменении его величины при повороте потока, при изменении его величины и при повороте потока.

Эти потери определяются по формуле.

$$h_{м.с.} = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (56),$$

где  $v$  - скорость потока в сечении за местным сопротивлением трубопровода, определяемый, либо по справочной литературе, либо экспериментально;

$\xi$  - коэффициент гидравлического трения от местных сопротивлений.

Лабораторная работа рассматривает четыре вида местных сопротивлений: плавное сужение и плавное расширение (изучается поток в модуле для исследования уравнения Бернулли), а также резкое сужение и резкое расширение.

## 2. Описание экспериментальной установки.

Принцип работы стенда заключается в изменении структуры и параметров потока воды (скоростей, давлений, расходов), протекающих через исследуемые модули при различных условиях.

Модули представляют собой трубопровод круглого сечения, на которых установлено по два пьезометра для каждого местного сопротивления. Один из двух пьезометров до местного сопротивления (иначе говоря – непосредственно перед сопротивлением), второй пьезометр после местного сопротивления (иначе говоря – непосредственно после сопротивления) .

Внутренние диаметры исследуемых трубопроводов имеют следующие размеры :

для плавного сужения и расширения  $d = 15 \text{ мм}$ ,  $d = 11 \text{ мм}$ ;

для резкого сужения и расширения  $d = 15,5 \text{ мм}$ ,  $d = 10 \text{ мм}$ .

Для исследования местных потерь напора от плавного сужения и расширения используется уже известная схема, на которой исследовали уравнение Бернулли. Схема немного видоизменена (не учитывают 12 пьезометр) представлена на рис.14. где:

1 – кран, установленный на водопроводе;

2 – водопровод, из которого наполняется накопительный резервуар 3, при проведении эксперимента кран 1 на водопроводе открыт;

3 – напорная емкость с водосливом, наполнена полностью и лишняя вода постоянно, в процессе проведения опытов, стекает в сливную емкость 4, это обеспечивает постоянное давление в каждой точке потока жидкости в экспериментальном трубопроводе 7;

4 – сливная емкость, в которую по водосливу стекает лишняя вода, так создают постоянное давление в каждой точке потока в стеклянной трубе 7;

5 - Труба Вентури,

6 - пьезометрический ряд, с пьезометрами №12, №13, №14, №15 и №16 .

7 – экспериментальный трубопровод, в котором наблюдают различные механизмы потока;



- 8 – кран на экспериментальном трубопроводе, позволяющий менять скорости потока жидкости;
- 9 – мерная емкость, которая позволяет определить, какой объем  $V$  вытекает за определенное время  $t$ ,
- 10 – кран на мерной емкости;
- 11 – канализация.

Рис.14. Схема экспериментальной установки для определения коэффициента гидравлического трения от плавного сужения и расширения.

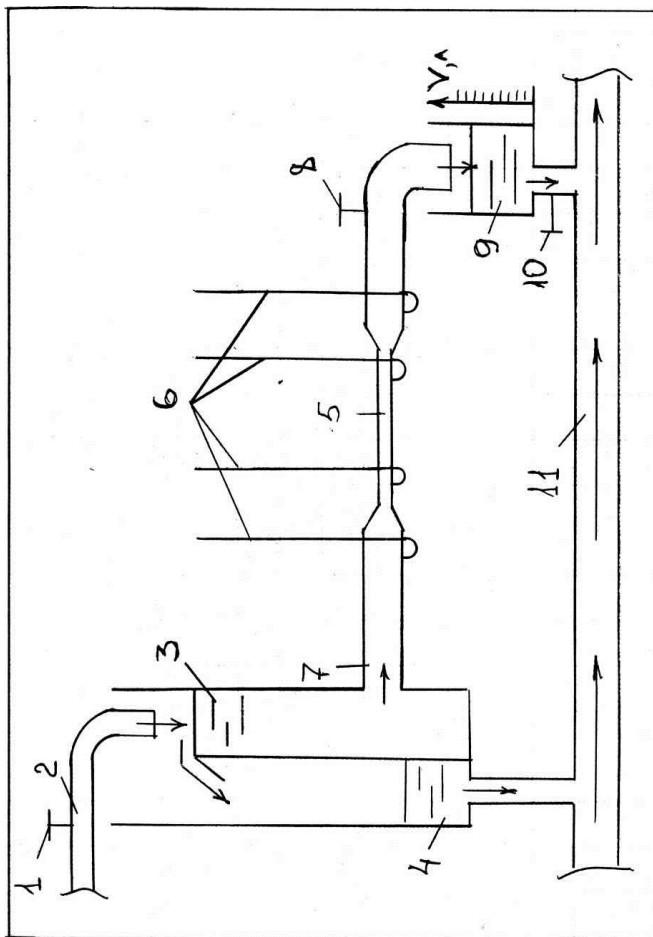
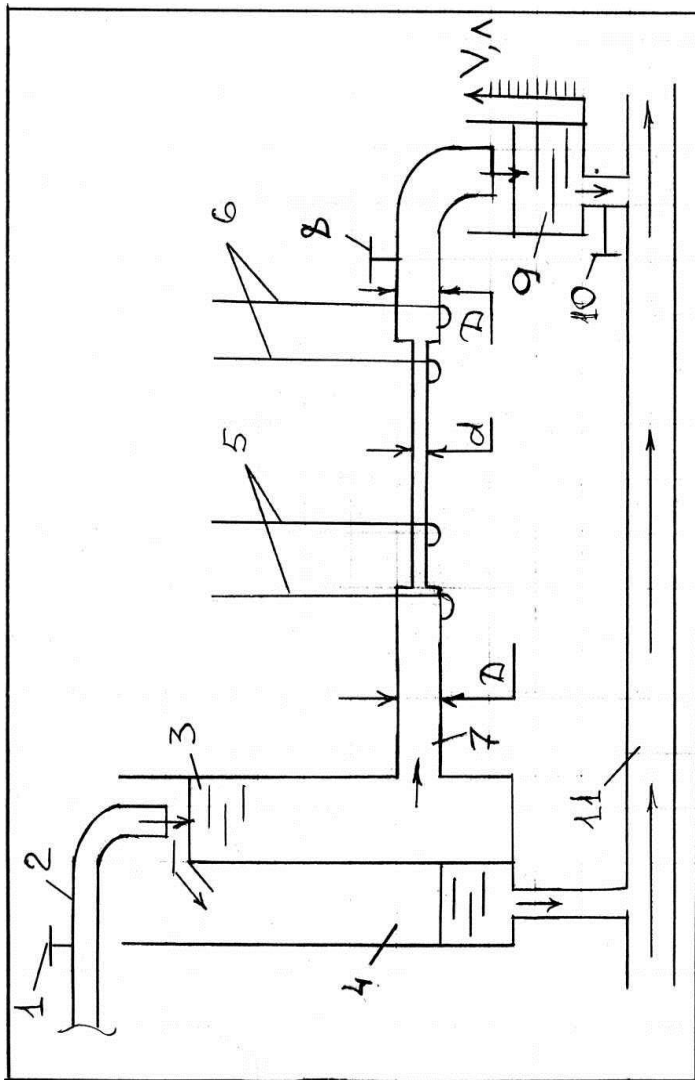


Рис.15. Схема экспериментальной установки для определения местного коэффициента гидравлического трения от резкого сужения и расширения.



- 1 – кран, установленный на водопроводе;  
 2 – водопровод, из которого наполняется накопительный резервуар 3, при проведении эксперимента кран 1 на водопроводе открыт;  
 3 – напорная емкость с водосливом, наполнена полностью и лишняя вода постоянно, в процессе проведения опытов, стекает в сливную емкость 4, это обеспечивает постоянное давление в каждой точке потока жидкости в экспериментальном трубопроводе 7;

4 – сливная емкость, в которую по водосливу стекает лишняя вода, так создают постоянное давление в каждой точке потока в стеклянной трубе 7;

5 – резкое сужение трубопровода от  $d = 15,5$  мм до  $d = 10$  мм, между пьезометрами №6 и №7,

6 – резкое расширение трубопровода от  $d = 10$  мм до  $d = 15,5$  мм, между пьезометрами №8 и №9,

7 – экспериментальный трубопровод, в котором наблюдают различные механизмы потока;

8 – кран на экспериментальном трубопроводе, позволяющий менять скорости потока жидкости;

9 – мерная емкость, которая позволяет определить, какой объем  $V$  вытекает за определенное время  $t$ ,

10 – кран на мерной емкости;

11 – канализация.

### 3. Методика проведения эксперимента.

Для плавного сужения и расширения.

1. Открыть кран 1.

2. Наполнить резервуар 3, в процессе проведения опытов необходимо следить за тем, чтобы вода все время переливалась через водослив. Это обеспечивает наличие установившегося движения потока в трубе 7.

3. Полностью открыть кран 8 на трубопроводе 7, создав так максимальный расход в системе. Степень открытия крана должна обеспечивать большую скорость в трубопроводе.

4. Подождать несколько минут, для того чтобы режим скоростей в трубопроводе 7 окончательно установился.

5. Снять показания всех пьезометров №6, №7, №8 и №9.

6. Замерить объем  $V$  (при созданном режиме), вытекающий за время  $t$  в мерную емкость 9.

7. Записать результаты замеров в таблицу 11.

8. Поворачивая кран 8 создать этим определенный расход меньше максимального в системе.

9. Подождать несколько минут, для того чтобы режим скоростей в трубопроводе 7 окончательно установился.

10. Снять показания всех пьезометров №6, №7, №8 и №9.

11. Замерить объем  $V$  (при созданном режиме), вытекающий за время  $t$  в мерную емкость 9.

12. Записать результаты замеров в таблицу 11.

Табл.11. Таблица измерений для лабораторной работы № 6.

№ опыта	Показания пьезометров		Диаметр трубопров. за сопротивлением	Объем вытекшей воды, V	Время t, за которое вытек объем V
	№13	№14			
	м	м	м	л	сек
Плавное сужение					
1			0,011		
2			0,011		
Плавное расширение					
№ опыта	Показания пьезометров		Диаметр трубопров. за сопротивлением	Объем вытекшей воды, V	Время t, за которое вытек объем V
	№15	№16			
	м	м	м	л	сек
1			0,015		
2			0,015		
№ опыта	Показания пьезометров		Диаметр трубопров. за сопротивлением	Объем вытекшей воды, V	Время t, за которое вытек объем V
	№6	№7			
	м	м	м	л	сек
Резкое сужение					
1			0,010		
2			0,010		
Резкое расширение					
№ опыта	Показания пьезометров		Диаметр трубопров. за сопротивлением	Объем вытекшей воды, V	Время t, за которое вытек объем V
	№8	№9			
	м	м	м	л	сек
1			0,0155		
2			0,0155		

Для резкого сужения и расширения.

1. Открыть кран 1.
2. Наполнить резервуар 3, в процессе проведения опытов

необходимо следить за тем, чтобы вода все время переливалась через водослив. Это обеспечивает наличие установившегося движения потока в трубе 7.

3. Полностью открыть кран 8 на трубопроводе 7, создав так максимальный расход в системе. Степень открытия крана должна обеспечивать большую скорость в трубопроводе.

4. Подождать несколько минут, для того чтобы режим скоростей в трубопроводе 7 окончательно установился.

5. Снять показания всех пьезометров №6, №7, №8 и №9.

6. Замерить объем  $V$  (при созданном режиме), втекающий за время  $t$  в мерную емкость 9.

7. Записать результаты замеров в таблицу 12.

8. Поворачивая кран 8 создать этим определенный расход меньше максимального в системе.

9. Подождать несколько минут, для того чтобы режим скоростей в трубопроводе 7 окончательно установился.

10. Снять показания всех пьезометров №6, №7, №8 и №9.

11. Замерить объем  $V$  (при созданном режиме), втекающий за время  $t$  в мерную емкость 9.

12. Записать результаты замеров в таблицу 11.

4. Методика проведения расчетов результатов эксперимента.

Для плавного сужения.

1. Определить потери напора между 13-м и 14-м пьезометрами

$$h_{13-14} = h_{13} - h_{14} = (\text{м}) \quad (57)$$

2. Определяем площадь живого сечения круглого трубопровода

$$\omega = \frac{\pi D^2}{4} = (\text{м}^2)$$

3. Определяем расход потока воды в трубопроводе для обоих опытов

$$Q = \frac{V}{t} = \left( \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right) \quad (58)$$

4. Определяем среднюю скорость течения потока воды в трубопроводе за местным сопротивлением, в случае плавного сужения в сечении №7.

$$U = \frac{Q}{\omega} = \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right) \quad (59)$$

5. Определяем скоростной напор для сечений №13 и сечения №14 по формуле

$$\frac{v_{13}^2}{2g} \quad \text{И} \quad \frac{v_{14}^2}{2g} \quad (60)$$

6. Определяем потери при плавном сужении  $h_{13-14}$ .

Табл.12. Таблица расчетов для лабораторной работы № 6, для расчета коэффициента местных сопротивлений при плавном сужении.

№ опыта	$h_{13-14}$ Потери напора	Площадь живого сечения трубопровода за плавным сужением	Расход, протек-й по трубопроводу	Скорость течения в трубопроводе за плавным сужением	$\frac{v_{14}^2}{2g}$	$\xi_{п.с}$
	м	м	$\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	м	
1						
2						

Табл.13. Таблица расчетов для лабораторной работы № 6, для расчета коэффициента местных сопротивлений при плавном расширении.

№ опыта	$h_{15-16}$ Потери напора	Площадь живого сечения трубопровода за плавным расширением	Расход, протек-й по трубопроводу	Скорость течения в трубопроводе за плавным расширением	$\frac{v_{16}^2}{2g}$	$\xi_{п.с}$
	м	м	$\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	м	
1						
2						

1. Определить потери напора между 15-м и 16-м пьезометрами

$$h_{15-16} = h_{15} - h_{16} = (M) \quad (61)$$

2. Определяем площадь живого сечения круглого трубопровода

$$\omega = \frac{\pi D^2}{4} = (M^2)$$

3. Определяем расход потока воды в трубопроводе для обоих опытов

$$Q = \frac{V}{t} = \left( \frac{M^3}{C} \right) \quad (62)$$

4. Определяем среднюю скорость течения потока воды в трубопроводе за местным сопротивлением, в случае плавного расширения в сечении №16.

$$u = \frac{Q}{\omega} = \left( \frac{M}{C} \right) \quad (63)$$

7. Из формулы  $h_{м.с.} = \xi \frac{v^2}{2g}$  находим коэффициент местных сопротивлений для плавного расширения  $\xi_{п.с.}$

$$\xi_{п.с.} = h_{15-16} \frac{2g}{v_{16}^2} \quad (64)$$

8. Результаты вычислений заносим в таблицу №14.

Табл.14. Таблица расчетов для резкого сужения.

№ опыта	$h_{6-7}$ Потери напора	Площадь живого сечения трубопровода за резким сужением	Расход, протекающий по трубопроводу	Скорость течения в трубопроводе за резким сужением	$\frac{v_7^2}{2g}$	$\xi_{п.с.}$
	M	M	$\frac{M^3}{C}$	$\frac{M}{C}$	M	
1						
2						

Для резкого расширения.

1. Определить потери напора между 8-м и 9-м пьезометрами

$$h_{8-9} = h_8 - h_9 = (м) \quad (65)$$

2. Определяем площадь живого сечения круглого трубопровода

$$\omega = \frac{\pi D^2}{4} = (м^2)$$

3. Определяем расход потока воды в трубопроводе для обоих опытов

$$Q = \frac{V}{t} = \left( \frac{м^3}{с} \right) \quad (66)$$

4. Определяем среднюю скорость течения потока воды в трубопроводе за местным сопротивлением, в случае плавного сужения в сечении №7.

$$U = \frac{Q}{\omega} = \left( \frac{м}{с} \right) \quad (67)$$

5. Определяем скоростной напор для сечений №15 и сечения №16 по формуле

$$\frac{v_8^2}{2g} \quad \text{и} \quad \frac{v_9^2}{2g}$$

6. Определяем потери при плавном сужении  $h_{8-9}$ .

$$7. \text{ Из формулы } h_{м.с.} = \xi \frac{v^2}{2g}$$

Находим коэффициент местных сопротивлений для плавного сужения  $\xi_{п.с.}$

$$\xi_{п.с.} = h_{8-9} \frac{2g}{v_9^2} \quad (68)$$

8. Результаты вычислений заносим в таблицу №15 .



Таблица 15. Таблица расчетов для резкого расширения.

Резкое расширение					
№ опыта	Показания пьезометров		Диаметр трубопров. за сопротивлением	Объем вытекшей воды, V	Время t, за которое вытек объем V
	№8	№9			
	м	м	м	л	сек
1			0,0155		
2			0,0155		

5. Вопросы к лабораторной работе №5.

1. Написать формулу для определения потерь напора от местных сопротивлений.

2. Что такое местные сопротивления? Какие они бывают?

3. Схематично нарисуйте механизм потока при резком сужении и расширении.

4. Почему возникают потери в местных сопротивлениях?

5. Почему угол изгиба трубопровода должен быть тупым?

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хансуваров К. И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара: учебное пособие для техникумов. — М.: Издательство стандартов, 1990. 287 с.

2. Министерство образования Республики Беларусь и Министерство образования и науки Российской Федерации ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Кафедра «Безопасность жизнедеятельности» МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ к лабораторной работе «ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И РАСХОДА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ» Разработал: канд. Техн. Наук, доц. Мрочек В.И. Могилев, 2007.

3. МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПРЯМЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ С МНОГОКРАТНЫМИ НАБЛЮДЕНИЯМИ. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИПК ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ Москва ГОСТ 8.207-76 срок введения установлен с 01.01.77 Переиздание. Ок-

тябрь 2001 г.

4. Карелин В.С., Коноплёв Е.Н. Методическое пособие по выполнению лабораторных работ по гидравлике, гидравлическим машинам и гидроприводу Сентябрь, 2012.

5. Физические измерения в газовой динамике и при горении/ пер. С англ.,

6. Ч. 1 – 2. М., 1957.

7. Горлин С. М., Слезингер И. И., Аэромеханические измерения. М., 1964.

8. Попов С. Г., Измерение воздушных потоков. М.- Л., 1947.

9. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1975.

10. Богомолов А.И., Михайлов К.А. Гидравлика: учебник. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1972. 648 с.

11. Л.С. Скворцов., и др. Гидравлика систем водоснабжения и водоотведения: учебное пособие для вузов по напр. "Строительство". М.: Архитектура-С, 2008. 256 с.

12. Ботук Б.О. Гидравлика. М., «Высшая школа», 1962.

13. Лабораторный курс гидравлики, насосов, гидропередач/под ред. С.С. Руднева и Л.Г. Подвидза. М.: Машиностроение, 1974.

14. Чугаев Р. Р. Гидравлика. 4-е изд. Л.: Энергоиздат., 1982.

15. Большаков В. А., Попов В. Н. Гидравлика: Общий курс. К.: Выща. Шк., Головн. Изд-во, 1989.

16. Рабинович Е. З. Гидравлика. М.: Недра, 1980.

17. Ландау Л.Д, Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. — 736 с.

18. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. В 2-х ч. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат. Ч. 1. 1992. 695 с.: Наука Ч. 2, 1967. 720 с.

19. Константинов Н. М., Петров Н. А., Высоцкий Л. И. Гидравлика, гидрология, гидрометрия. В 2-х частях. Ч 1: общие законы. - М.: Высшая школа, 1987. 304 с.

20. Кузьминский Р. А. Гидрогазодинамика: уч. Пос. М.: РГОТУПС, 2010.