

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Безопасность жизнедеятельности»

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности
1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство»
дневной и заочной форм обучения*



Могилев 2018

УДК 653.26 : 620.9
ББК 31.19
М 75

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Безопасность жизнедеятельности»
«08» января 2018 г., протокол № 6

Составители: канд. техн. наук, доц. С. Д. Галюжин;
канд. техн. наук, доц. А. С. Галюжин

Рецензент канд. техн. наук, доц. И. В. Лесковец

Методические рекомендации предназначены для студентов специальности
1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство» для проведения
лабораторных работ по дисциплине «Механика жидкости и газа».

Учебно-методическое издание

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Ответственный за выпуск	А. В. Щур
Технический редактор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 315 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 24.01.2014.
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский
университет», 2018



Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа № 1. Измерение давления и расхода, определение режима течения жидкости.....	6
1.1 Краткие теоретические сведения.....	6
1.2 Экспериментальная установка.....	21
1.3 Проведение испытаний.....	22
1.4 Обработка результатов.....	23
2 Лабораторная работа № 2. Экспериментальное определение коэффициентов местных гидравлических сопротивлений	24
2.1 Краткие теоретические сведения.....	24
2.2 Экспериментальная установка.....	30
2.3 Проведение испытаний.....	32
2.4 Обработка результатов.....	33
3 Требования к содержанию и оформлению отчета.....	35
Список литературы.....	35



Введение

Механика жидкости и газа – наука, изучающая законы движения и равновесия жидкостей и газов, взаимодействия между жидкостями, газами и твердыми телами, а также способы использования этих законов в инженерной практике.

Механика жидкости и газа как самостоятельная наука возникла в первой половине XVIII в. Теоретические основы данной науки изложены в трудах крупнейших ученых академиков Российской академии наук М. В. Ломоносова (1711–1765), Леонарда Эйлера (1707–1783) и Даниила Бернулли (1700–1782). М. В. Ломоносов впервые сформулировал всеобщий закон сохранения материи, а также провел ряд исследований по вопросам механики газа. Л. Эйлер вывел дифференциальные уравнения равновесия и движения жидкости, разработал теорию лопастных машин. Д. Бернулли установил связь между составляющими удельной энергии в потоке жидкости и выполнил ряд работ по исследованию ее движения.

В XIX в. и в начале XX в. были выполнены фундаментальные исследования, существенно расширившие знания в области механики жидкости и газа. В этот период теоретические обобщения стали проводиться в тесной связи с экспериментальными данными. Н. П. Петров (1836–1920) опубликовал свои работы по гидродинамической теории смазки, экспериментально подтвердил гипотезу И. Ньютона о силе трения между слоями движущейся жидкости. Г. Хаген (1797–1884) и Д. И. Менделеев (1834–1907) предсказали существование двух режимов течения жидкости, которое позднее экспериментально подтвердил английский физик Р. Рейнольдс (1842–1912).

Развитию механики жидкости и газа как науки в значительной степени способствовали работы Н. Е. Жуковского (1847–1921) и целой группы учеников его школы. Н. Е. Жуковским была разработана теория гидравлического удара, а также проведен ряд фундаментальных исследований в области механики газа. Наряду с многими зарубежными учеными большой вклад в развитие современной механики жидкости и газа внесли белорусские ученые. Теоретическое изучение движения жидкости и газов – задача чрезвычайно сложная, и хотя в настоящее время известны общие дифференциальные уравнения движения, точные решения этих уравнений в общем виде возможны только в некоторых простейших частных случаях.

Математическое описание течения реальной жидкости либо газа всегда достаточно приближенно. Обычно в таких случаях используют различные упрощения и допущения. Поэтому получаемые результаты, как правило, проверяются экспериментально. Таким образом, эксперимент является неотъемлемой частью большинства исследований в области механики жидкости и газа.

Дисциплина «Механики жидкости и газа» является фундаментальной дисциплиной, представляющей основу для дисциплины, изучающей проектирование, диагностику и эксплуатацию систем тепло и газоснабжение, вентиляция, водоснабжение и канализация промышленных и бытовых сооружений, дренирования и отвода почвенных и ливневых вод.



Цель изучения дисциплины – изучение законов, которым подчиняются жидкость и газ в состоянии покоя и движения, приобретение навыков использования этих законов для решения прикладных инженерных задач при проектировании и строительстве промышленных и гражданских зданий и сооружений.



1 Лабораторная работа № 1. Измерение давления и расхода, определение режима течения жидкости

Цель работы

- 1 Изучение физической сущности основных величин механики жидкости и газа, единиц и средств, используемых для их измерений.
- 2 Изучение физической сущности режимов течения жидких и газообразных сред и методики их определения.
- 3 Экспериментальное исследование режимов течения жидкости.

1.1 Краткие теоретические сведения

Основными физическими величинам механики жидкости и газа являются *давление p и расход Q* .

Гидростатическое давление и его свойства. Единицы давления. Выделим в жидкости некоторый объем (рисунок 1.1) и разделим его на две части горизонтальной плоскостью с площадью поверхности раздела S . Заменим силы, с которыми верхняя часть выделенного объема воздействует на нижнюю часть, равнодействующей силой E . Равновесие жидкости при этом не нарушится. Разложим эту силу E на две составляющие: нормальную силу F и касательную T . Предположим, что жидкость находится в состоянии покоя. Тогда касательные напряжения в покоящейся жидкости будут равны нулю, соответственно, $T = 0$. Как отмечалось ранее, напряжения растяжения в жидкости равны нулю, следовательно, в покоящейся жидкости возможны только напряжения сжатия, а сила гидростатического давления $F = E$. Причем сила F будет нормальна к поверхности площадью S и она – сила гидростатического давления. Напряжения, которые при этом возникают, являются напряжениями сжатия жидкости σ или гидростатическим давлением p .

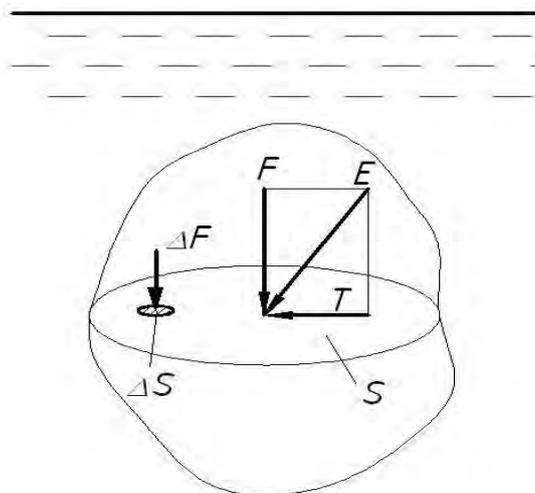


Рисунок 1.1 – Схема, поясняющая сущность гидростатического давления

Напряжения, возникающие в покоящейся жидкости под действием сжимающих сил, называются *гидростатическим давлением*.

При равномерном распределении силы F по площади S гидростатическое давление

$$p = \frac{F}{S}. \quad (1.1)$$

Когда сила F неравномерно распределена по площади S , тогда и давление p в каждой точке этой площади различно. В этом случае имеет место давление в точке. Выделим на упомянутой плоскости элементарную площадку ΔS (см. рисунок 1.1), на которую будет приходиться элементарная сила гидростатического давления ΔF . Тогда давление в точке будет

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S}. \quad (1.2)$$

Гидростатическое давление характеризуется следующими основными свойствами.

Первое свойство. Гидростатическое давление направлено внутрь рассматриваемого объема жидкости по нормали к поверхности (по внутренней нормали), на которую действует, и создает только напряжение сжатия. Это свойство вытекает из определения гидростатического давления, т. к. напряжения сжатия возникают от нормально действующих сжимающих сил.

Второе свойство. Давление на поверхность жидкости, производимое внешними силами, передаётся жидкостью одинаково во всех направлениях. Закон установлен Б. Паскалем и опубликован в 1663 г. На данном законе основано действие гидравлических прессов и других объемных гидроприводов.

Третье свойство. Гидростатическое давление в различных точках покоящейся жидкости различно и является функцией координат точки, т. е.

$$p = f(x, y, z).$$

Тогда полный дифференциал давления

$$dp = \frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz. \quad (1.3)$$

В Международной системе единиц давление измеряется в паскалях (Па, Pa). 1 Па – это давление, вызываемое силой в 1 Н, равномерно действующей на площади в 1 м². В странах Евросоюза широко используется внесистемная единица – бар (bar): 1 бар = 10⁵ Па. В странах Британского содружества и США в качестве единиц давления используются 1 фунт на 1 дюйм² [pound square inches (PSI)] и 1 фунт на 1 фут² [pound square feet (PSF)]:

$$1 \text{ PSI} = 6894,76 \text{ Па};$$



$$1 \text{ PSF} = 47,8 \text{ Па.}$$

Системы отсчета давления. В зависимости от выбора начала отсчета численное значение одного и того же давления может быть разным. Давление, изменяемое от пустоты, называют *абсолютным* $p_{абс}$. В условиях Земли измерить такое давление достаточно сложно, т.к. необходимо создать пустоту, от которой нужно мерить. Поэтому в наземных машинах, механизмах и системах в качестве начала отсчета используют *атмосферное давление* $p_{атм}$.

Атмосферное давление – гидростатическое давление воздуха на все находящиеся в нем предметы и земную поверхность, создаваемое притяжением атмосферы к Земле.

Давление, измеряемое от атмосферного, называют *избыточным* $p_{изб}$. Очевидно, что избыточное давление может быть как положительным, так и отрицательным.

Если абсолютное давление меньше атмосферного, тогда избыточное давление будет отрицательным, называемое *вакуумметрическим* $p_{вак}$.

Рассмотрим графическую интерпретацию вышесказанного (рисунок 1.2). Если в какой-то точке пространства (точка 1), заполненного жидкостью или газом, абсолютное давление будет больше атмосферного, то избыточное давление будет положительным. Когда абсолютное давление будет меньше атмосферного (точка 2), то избыточное давление будет отрицательным.

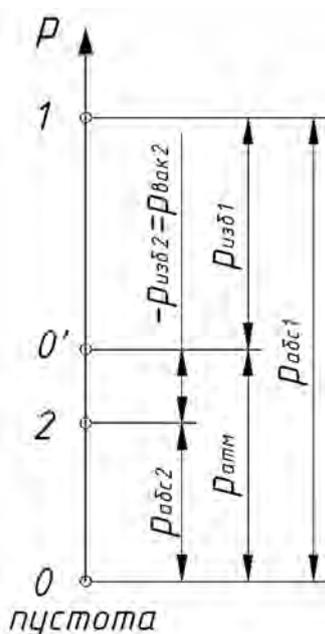


Рисунок 1.2 – Системы отсчета давления

Абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давления связаны между собой следующими уравнениями:

$$p_{абс} = p_{атм} + p_{изб}; \quad (1.4)$$

$$p_{\text{вак}} = -p_{\text{изб}}. \quad (1.5)$$

Известно, что $p_{\text{атм}}$ в условиях тропосферы из-за возникновения циклонов и антициклонов не является постоянной величиной, но колебания его незначительны. Поэтому в технических расчетах объектов, находящихся примерно на уровне моря, принимают $p_{0\text{атм}} = 1 \cdot 10^5$ Па. Атмосферное давление зависит от высоты над уровнем моря: чем больше высота, тем меньше $p_{\text{атм}}$. Данная зависимость описывается барометрической формулой

$$p_{h \text{ атм}} = p_{0\text{атм}} e^{-Mgh/R_m T}, \quad (1.6)$$

где $p_{h \text{ атм}}$ – атмосферное давление на высоте h , м, по отношению к уровню моря, Па;

$p_{0\text{атм}}$ – атмосферное давление на уровне моря, Па;

e – основание натурального логарифма, $e = 2,718$;

M – молярная масса сухого воздуха, $M = 0,029$ кг/моль;

R_m – универсальная газовая постоянная, $R_m = 8,31$ Дж/(моль·К);

T – абсолютная температура воздуха, К.

Данное явление необходимо учитывать при проектировании инженерных сетей для высотных зданий и сооружений.

Приборы для измерения давления. Все приборы для измерения давления состоят из двух основных частей – датчика и указателя. Датчик давления предназначен для непосредственного преобразования измеряемой величины (давления) в другую величину, удобную для преобразования в визуальную информацию или для использования в системах управления.

Как следует из уравнения (1.6), для определения давления в любой точке покоящейся жидкости необходимо знать давление на ее свободной поверхности, глубину погружения этой точки и плотность жидкости. Поэтому еще в средние века снаружи к сосуду на глубине, где нужно было измерить давление, присоединялась стеклянная трубка и определялась высота столба жидкости в трубке h (рисунок 1.3). Данная трубка называется *пьезометром* (от греч. *piézo* – сжимаю и *metreo* – измеряю). Термин «пьезометр» ввели в начале XIX в. английские физики Я. Перкинс и Г. Х. Эрстед. Если на свободной поверхности жидкости в сосуде и в пьезометре атмосферное давление, то при этом измеряется избыточное давление в точке А: $p_{\text{изб А}} = \rho gh$. Это давление будет одинаковым во всех точках горизонтальной плоскости, проходящей через точку А, называемой **плоскостью равного давления**. Если из пьезометра откачать воздух, то он будет показывать абсолютное давление: $p_{\text{абс А}} = \rho gh'$. Датчиком в этом приборе является стеклянная трубка, а указателем – свободная поверхность жидкости в трубке и шкала.

Такого типа приборы для измерения давления использовались вплоть до второй половины XX в. Для уменьшения размеров при измерении больших давлений в качестве рабочей жидкости пьезометра применялась ртуть, для измерения малых давлений – спирт. Конструкции таких приборов достаточно полно описаны в учебниках прошлого века. Несомненным их преимуществом



является простота конструкции и высокая точность измерения. Существенный недостаток – громоздкость, сложность, а иногда и невозможность разделения в пространстве датчика и указателя на достаточно большое расстояние.

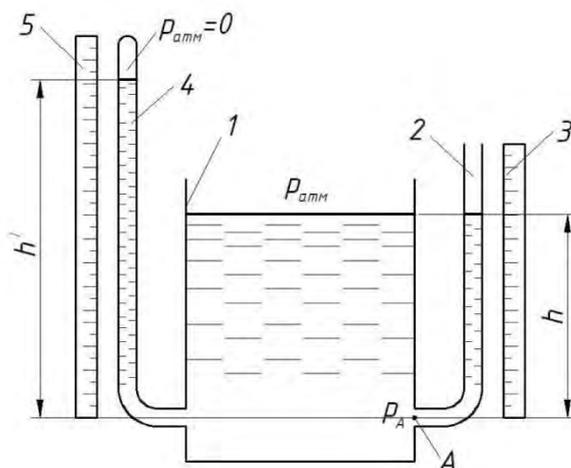


Рисунок 1.3 – Схема пьезометра

Поэтому во второй половине XIX в. были разработаны компактные приборы – манометры (от греч. *manos* – редкий, неплотный, разреженный и *metreo* – измеряю). Принцип действия манометра основан на уравнивании измеряемого давления напряжениями упругой деформации трубчатой пружины или мембраны. Схема пружинного манометра приведена на рисунке 1.4. Первичным измерительным преобразователем (первичный измерительный преобразователь – элемент прибора, на который непосредственно воздействует измеряемая физическая величина) манометра является изогнутая полая трубка 1, сечение которой имеет вид эллипса, сплюснутого с одной стороны по короткой оси. Один конец трубки запаян и с помощью плоской пружины б и передаточного механизма 2 соединен со стрелкой 4, которая подвижно установлена на оси 3. Под действием давления трубка 1 разгибается и отклоняет стрелку на некоторый угол, который соответствует определенному значению давления на круговой шкале 5.

По сравнению с пьезометром данный манометр имеет ряд существенных преимуществ. У него простая конструкция, он малогабаритен, надежен в эксплуатации, может быть расположен на достаточно большом расстоянии от точки измерения давления. Вместе с тем в таком виде манометры невозможно использовать в системах управления различных объектов, в том числе строительных машин и механизмов. Кроме того, для вывода информации на единый пульт необходима прокладка трубок от точек измерения давления, что усложняет и удорожает конструкцию.

Для решения данной проблемы примерно в середине XX в. были созданы мембранно-резисторные приборы для измерения давления (рисунок 1.5). Первичным измерительным преобразователем является установленная в корпусе 1 упругая мембрана 2. Она связана с помощью передаточного механизма 3

с ползунком 4 потенциометра 5. При изменении давления p ползунок перемещается по потенциометру 5, изменяя тем самым выходное напряжение $U_{вых}$, что приводит к изменению показаний вольтметра pV . На шкале вольтметра путем соответствующей тарировки наносятся единицы давления. Такие приборы широко использовались в конце XX в., в том числе и в аналоговых системах управления. Данный прибор лишен недостатков, присущих манометрам, но имеет свой, присущий только ему недостаток – наличие скользящего электрического контакта между ползунком 4 и потенциометром 5, что существенно снижает его надежность.

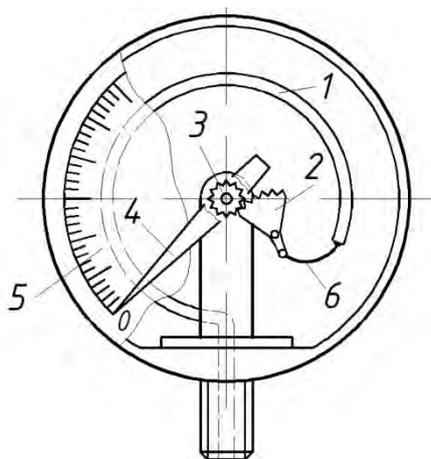


Рисунок 1.4 – Схема пружинного манометра

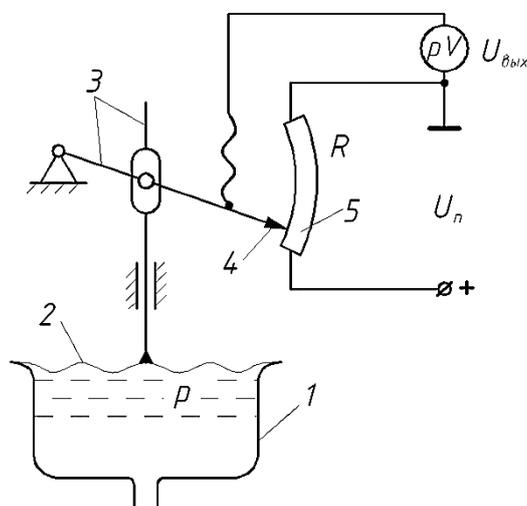


Рисунок 1.5 – Схема мембранно-резисторного прибора для измерения давления

Данного недостатка в определенной мере лишен мембранно-пьезоэлектрический прибор для измерения давления (рисунок 1.6), принцип действия которого основан на пьезоэлектрическом эффекте – возникновении электродвижущей силы в некоторых кристаллах (например, в кристалле кварца) под воздействием сжимающих сил. Давление p воздействует на мембрану 1, передается через толкатель 2 на кварцевые пластины 3 и 4, на поверхностях

которых возникает разность потенциалов. Электрический сигнал через усилитель $DA1$ поступает на указатель pV (милливольтметр). Шкала указателя pV протарирована в единицах давления. Недостатком такого прибора является низкая виброустойчивость: вибрация может приводить к разрушению пьезоэлектрических пластин.

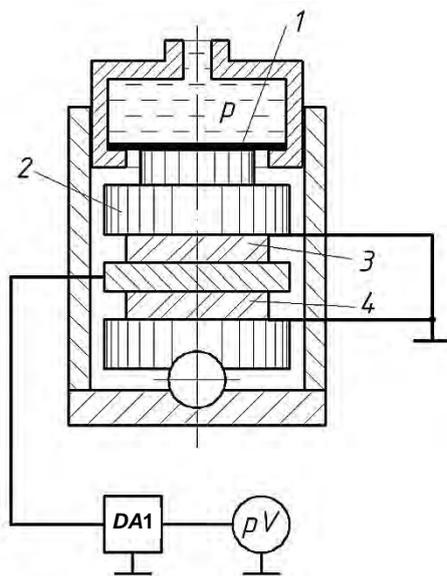


Рисунок 1.6 – Схема пьезоэлектрического прибора для измерения давления

В последние годы достаточно широко используется оптоволоконная техника. Это связано с рядом ее достоинств: отсутствие подвижных контактов, независимость выходных характеристик от воздействия электромагнитных полей и температуры, высокая надежность, возможность расположения устройства отображения информации на достаточно большом расстоянии от точки измерения давления и др. На рисунке 1.7 приведена схема оптоволоконного прибора для измерения давления с аналоговым выходом (патент РБ 8432). Мембрана 2 жестко связана с непрозрачной шторкой 3, которая расположена между торцами оптоволоконных световодов 4 и 5. Световой поток $\Phi_{вх}$ от светодиода $VD1$ поступает по оптоволоконному световоду 4 к его правому торцу. При увеличении давления в корпусе 1 шторка 3 поднимается вверх и часть светового потока $\Phi_{вх}$ через окно 6 в шторке 6 попадает на левый торец световода 6. Световой поток $\Phi_{вых}$, выходя из световода 5, воздействует на фотодиод $VD2$. Величина электрического тока, протекающего через $VD2$, пропорциональна $\Phi_{вых}$. При этом изменяется напряжение на сопротивлении $R_{изм}$, которое измеряется вольтметром pV . Деления на шкале вольтметра соответствуют единицам давления. Данный прибор может использоваться в аналоговых, а при дополнительной установке аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и в цифровых системах контроля и управления.

Использование оптоволоконных устройств позволяет получить цифровой сигнал без применения АЦП. Схема цифрового оптоволоконного прибора для измерения давления приведена на рисунке 1.8 (патент РБ 9946). В отличие от

прибора, представленного на рисунке 1.7, в данном приборе правый торец световода 5 разделен на пучки, причем световой поток на выходе каждого пучка $\Phi_{вых 2} \dots \Phi_{вых n}$ воздействует на соответствующий фотодиод $VD_2 \dots VD_n$, связанный с многоканальным усилителем $DA1$. Затем электрический сигнал поступает на компаратор $DD1$ (устройство формирования прямоугольных импульсов). Компаратор $DD1$ связан с помощью USB -шлейфа с компьютером K . В зависимости от вида системы управления или контроля вместо компьютера может использоваться микропроцессор.

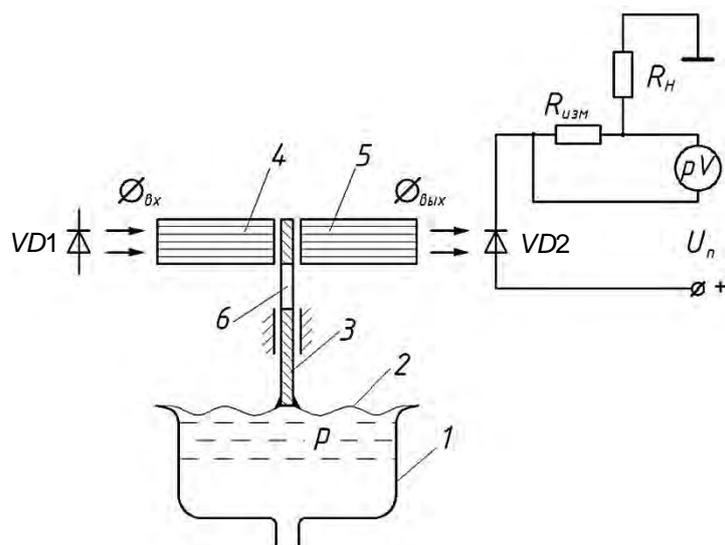


Рисунок 1.7 – Схема аналогового мембранно-оптоволоконного прибора для измерения давления

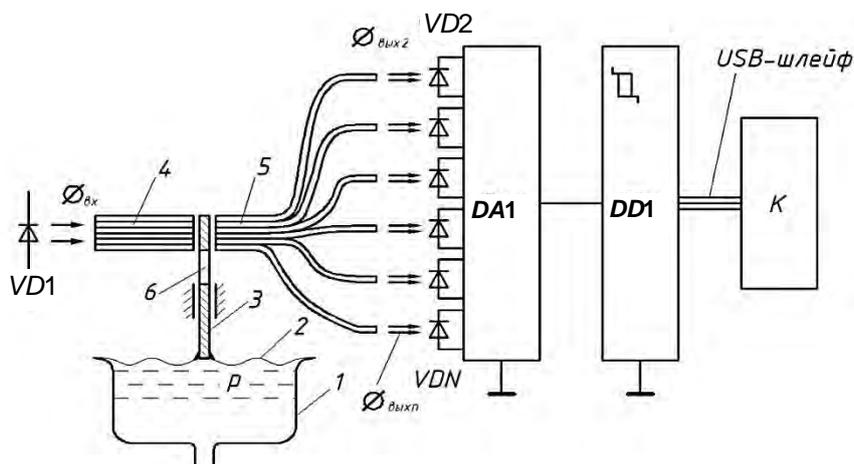


Рисунок 1.8 – Схема цифрового мембранно-оптоволоконного прибора для измерения давления

Существуют и применяются в промышленности и для научных исследований приборы для измерения давления других типов: тензорезистивные, емкостные, ионизационные, индукционные и другие.

Следует отметить, что приборы, изображенные на рисунках 1.4–1.8, измеряют избыточное давление, что обусловлено их конструкцией. Эти

приборы при незначительном изменении конструкции могут измерять и вакуумметрическое давление.

Для измерения давления газа применяются такие же приборы, что и для измерения давления жидкости, кроме пьезометра, изображенного на рисунке 1.3. В начале прошлого века для измерения давления газов использовались жидкостные манометры с U-образной стеклянной трубкой, в которую заливалась жидкость. Разность уровней в трубке позволяла судить о давлении в точке измерения.

Измерение скоростного напора и расхода жидкости. Второй важнейшей величиной механики жидкости и газа является расход.

Расход – это количество жидкости (газа), проходящей через живое сечение потока в единицу времени.

Различают объемный Q , весовой Q_G и массовый Q_M расходы. Единицы измерения этих расходов в СИ следующие: Q – м³/с; Q_G – Н/с; Q_M – кг/с.

Чаще всего при выполнении расчетов используют объемный расход Q . Для измерения объемного расхода в машиностроительной гидравлике широко используется внесистемная единица – литр в минуту.

Весовой и массовый расходы связаны с объемным следующими зависимостями:

$$Q_G = \rho g Q; \quad Q_M = \rho Q,$$

где ρ – плотность жидкости (газа).

Наиболее простым способом измерения расхода (он используется в данной лабораторной работе) является объемный с помощью мерного бака. Суть его заключается в том, что измеряется время t прохождения через систему определенного объема жидкости W , которая поступает в мерный бак. Зная W и t , вычисляют объемный расход Q :

$$Q = W/t.$$

Для измерения скоростного напора используют специальные напорные трубки (*трубки Пито*). Изогнутая под углом 90° трубка устанавливается в определенной точке трубопровода или канала устьем навстречу потоку (рисунок 1.9). Впервые в 1732 г. для измерения скорости воды в реке ее использовал французский ученый Пито¹. Движущиеся частицы потока жидкости сталкиваются с неподвижными частицами в устье трубки Пито и их кинетическая энергия превращается в энергию давления. В результате жидкость в трубке поднимается на величину скоростного напора $u^2/(2g)$: в открытом русле – относительно свободной поверхности потока (см. рисунок 1.9, *а*), в напорном трубопроводе – относительно пьезометрического напора $hnз = p/(\rho g)$ (см. рисунок 1.9, *б*).

¹ **Пито** Анри — французский геометр и инженер-гидравлик (1695–1771). Он возвел в Южной Франции многие общественные гидравлические сооружения. Избран в члены Парижской академии наук в 1724 г. и Лондонского Королевского общества в 1740 г.



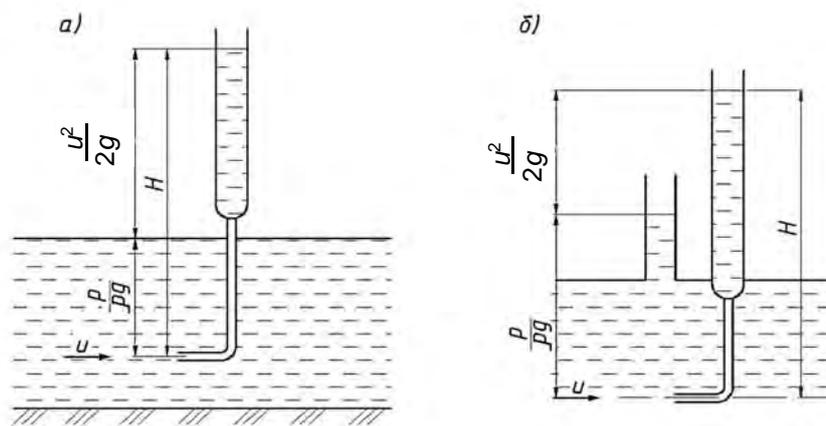


Рисунок 1.9 – Схема трубки Пито при измерении скоростного напора в потоке жидкости (а) и в напорном трубопроводе (б)

Комбинированный прибор, включающий трубку Пито и пьезометр, называется трубкой Прандтля (рисунок 1.10). Она представляет собой изогнутую под углом 90° внешнюю трубку 1, в которой находится внутренняя центральная трубка 2. Центральная трубка 2 (трубка Пито) измеряет полный напор $H = p_2/(\rho g)$, а внешняя трубка, в которой имеются боковые отверстия 3, – пьезометрический напор $h_{пз} = p_1/(\rho g)$. Тогда скоростной напор $u^2/(2g)$ будет

$$\frac{u^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} - \frac{p_1}{\rho g}, \quad (1.7)$$

где u – средняя скорость в точке измерения, м/с.

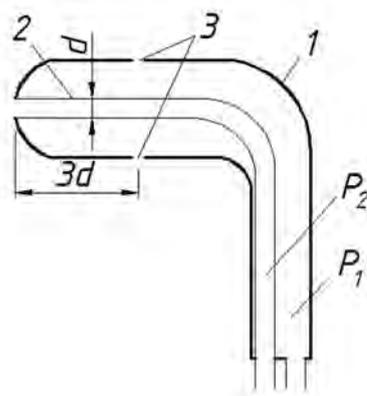


Рисунок 1.10 – Схема трубки Прандтля

Из уравнения (1.7) несложно найти скорость жидкости в точке установки данного прибора:

$$u = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}. \quad (1.8)$$

К настоящему времени разработаны различные приборы для измерения скорости жидкости и газа, в которых использованы иные физические принципы: термоанемометры, доплеровские измерители.

Принцип действия **термоанемометра** основан на зависимости между количеством тепла, отдаваемым каким-либо нагретым телом, и скоростью потока жидкости или газа, в котором это тело находится.

Первичный преобразователь (термонить) *1* устанавливается в специальном патроне *3*, который помещается в нужную точку потока (рисунок 1.11). При изменении скорости потока из-за конвективного теплообмена изменяется сопротивление нити и, соответственно, электрический ток, проходящий через эту нить. Для учета изменения температуры потока служит терморпара *2*. Информация с термонити *1* и терморпары *2* в виде электрических сигналов поступает в устройство сбора данных *4*, а затем в компьютер *5*, где с помощью специальной программы производится обработка данных и на экран монитора выводится информация о скорости потока жидкости или газа. Приемник термоанемометра (термонить) обычно выполняется из платиновой проволоки диаметром 0,005...0,3 мм и длиной 3...10 мм. Температура термонити должна быть по возможности высокой, т. к. при этом повышается чувствительность первичного преобразователя, а также уменьшается влияние колебаний температуры потока. Поэтому температура нагрева нити обычно лежит в интервале 400...500 °С.

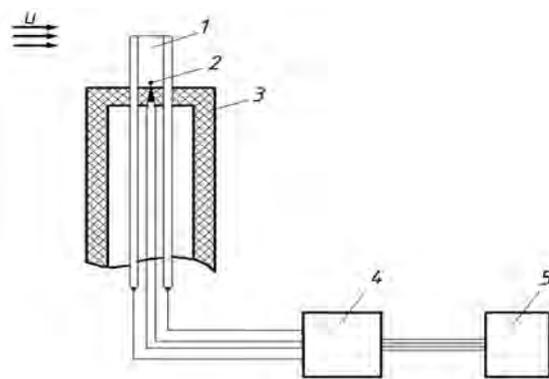


Рисунок 1.11 – Схема термоанемометра

Принцип действия **доплеровского измерителя** основан на использовании эффекта Доплера, согласно которому частота принятого сигнала, отражённого от движущегося объекта, отличается от частоты излучённого сигнала, а разница частот зависит от соотношения скоростей излучателя и данного объекта. В доплеровских измерителях применяются следующие виды излучения: радиоволны, свет, ультразвук. **Для измерения скорости жидкости в качестве излучателей, как правило, используют лазеры.**

Первыми устройствами для измерения расхода жидкости и газа были сужения, встраиваемые в трубопровод. На рисунке 1.12 приведены схемы **водомера Вентури**. Рассмотрим его принцип действия, для чего составим уравнение Бернулли для сечений *1-1* и *2-2* с учетом того, что геометрические напоры $z_1 = z_2$:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{u_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{u_2^2}{2g} + h_M, \quad (1.9)$$

где p_1, p_2 – давления в сечениях 1–1 и 2–2 соответственно;

u_1, u_2 – средняя скорость в сечениях 1–1 и 2–2, м/с;

α_1, α_2 – коэффициенты Кориолиса для сечений 1–1 и 2–2;

h_M – потеря напора в местном сопротивлении между сечениями 1–1 и 2–2.

Учитывая, что

$$u_1 S_1 = u_2 S_2, \quad h_M = \zeta_M \frac{u_2^2}{2g}, \quad \text{а } \Delta h = \frac{p_2}{\rho g} - \frac{p_1}{\rho g},$$

где S_1 и S_2 – площади живых сечений 1–1 и 2–2 соответственно;

ζ_M – коэффициент местного сопротивления между сечениями 1–1 и 2–2, определим из уравнения (1.9) u_2 :

$$u_2 = \sqrt{\frac{2g}{1 - (S_2/S_1)^2 + \zeta_M}} \sqrt{\Delta h}. \quad (1.10)$$

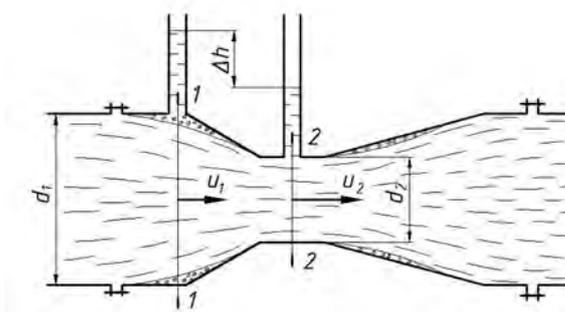


Рисунок 1.12 – Схема водомера Вентури

Величина

$$c_{BH} = \sqrt{\frac{2g}{1 - (S_2/S_1)^2 + \zeta_M}}$$

называется постоянной водомера Вентури. Тогда

$$u_2 = c_{BH} \sqrt{\Delta h}. \quad (1.11)$$

Зная u_2 , достаточно просто можно определить расход:

$$Q = u_2 S_2 = S_2 c_{BH} \sqrt{\Delta h}. \quad (1.12)$$

Таким образом, водомер Вентури позволяет определить как расход, так и среднюю скорость жидкости. Принцип действия диафрагмы (рисунок 1.13) такой же, как и водомера Вентури, поэтому полученные уравнения (1.11) и (1.12) справедливы и для диафрагмы. При этом численное значение постоянной диафрагмы c_d будет отличным от $c_{вн}$.

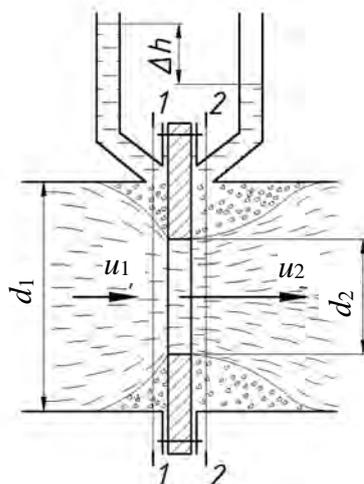


Рисунок 1.13 – Схема диафрагмы

Ультразвуковые расходомеры. Ультразвуковой расходомер содержит излучатель 2 и два приемника 3 и 4 ультразвуковых сигналов, которые устанавливаются на трубопровод 1 (рисунок 1.14). Принцип действия основан на том, звуковой импульс от излучателя 2, идущий к приемнику 4, имеет меньшую скорость, чем импульс, идущий к приемнику 3. Первый принятый импульс имеет общую скорость распространения, равную скорости звука минус соответствующая составляющая скорости течения жидкости u , а второй импульс будет иметь большую скорость (на величину данной составляющей скорости течения). Разница во времени прохождения импульсов пропорциональна средней скорости потока и с помощью современных цифровых технологий преобразуется в показание расхода.

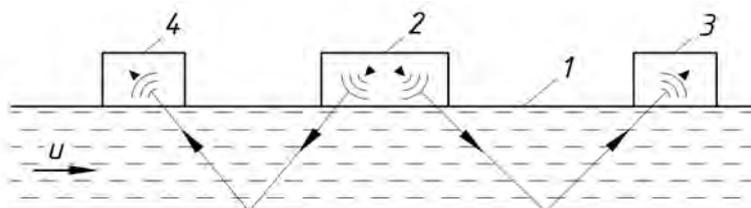


Рисунок 1.14 – Схема ультразвукового расходомера

Электромагнитные расходомеры. Принцип действия электромагнитных расходомеров основан на использовании закона электромагнитной индукции Фарадея, согласно которому в проводнике, движущемся в магнитном поле, будет возникать электродвижущая сила (ЭДС), пропорциональная скорости движения проводника. Роль проводника выполняет электропроводная жид-

кость, протекающая по трубопроводу 1 и пересекающая магнитное поле с индукцией B , электромагнита 2 (рисунок 1.15). При этом в жидкости будет наводиться ЭДС U , пропорциональная средней скорости ее движения и, соответственно, расходу жидкости. Выходной сигнал такого первичного преобразователя снимается двумя изолированными электродами 3 и 4, установленными в стенке трубопровода. Электромагнитные расходомеры могут измерять расход только проводящих электрический ток жидкостей и применяются там, где необходимы точные измерения и минимальное обслуживание.

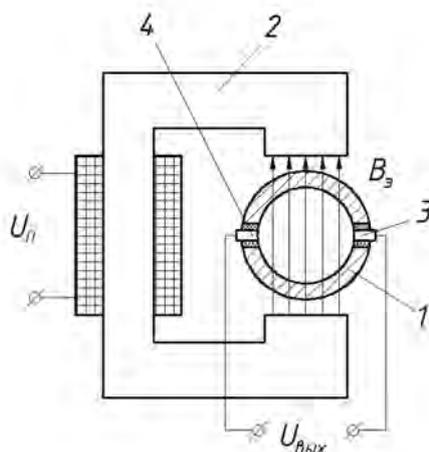


Рисунок 1.15 – Схема электромагнитного расходомера

Турбинные расходомеры. В таких расходомерах измеряемый поток приводит в движение осевую турбинку, скорость вращения которой пропорциональна расходу Q . Конструктивные исполнения расходомера могут быть различными. Например, корпус расходомера изготавливают из немагнитного материала, а у одной из специальных лопастей турбинки кромку выполняют из ферромагнитного материала. Снаружи на корпусе устанавливают счетчик импульсов, которые возникают при прохождении специальной лопасти возле первичного преобразователя счетчика (например, дифференциально-трансформаторный преобразователь). Частота импульсов пропорциональна расходу Q .

Режимы движения жидкости. Впервые в 1839 г. существование двух режимов движения жидкости установил немецкий инженер-гидротехник Готтхильф Хаген (1797–1884). Независимо от Хагена несколько позже к таким выводам в 1880 г. пришел Д. И. Менделеев. Наиболее полно исследовал режимы течения Осборн Рейнольдс. В жидкость, которая текла в прозрачной трубке, он впускал струйку окрашенной жидкости. При малых скоростях движения струйка окрашенной жидкости не размывалась и не смешивалась с основной жидкостью (рисунок 1.16, а). Такое движение было названо слоистым или *ламинарным* (от лат. *lamina* – слой).

Ламинарным называется слоистое течение жидкости без перемешивания (перемещения частиц жидкости из одного слоя в другой) и без пульсации скорости и давления. Линии тока при этом параллельны оси движения потока. Ламинарное движение может быть как установившимся, так и неустановившимся.

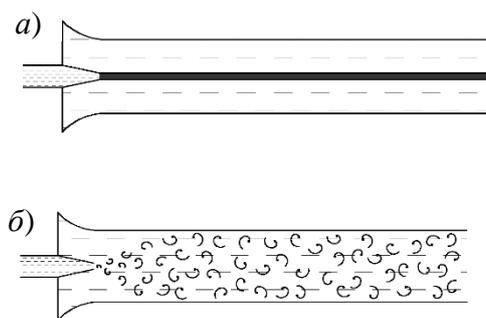


Рисунок 1.16 – Визуальное определение режимов течения жидкости

При дальнейшем увеличении скорости потока в трубе струйка окрашенной жидкости сначала становится волнообразной, а затем исчезает. Частицы этой струйки начинают перемешиваться с потоком воды, при этом не наблюдается определенной закономерности их движения (см. рисунок 1.16, б). В результате перемешивания частиц весь поток воды в трубе становится несколько окрашенным. Такое движение называется *турбулентным* (от лат. *turbulentus* – вихревой, беспорядочный).

Турбулентным называется течение, при котором происходит интенсивное перемешивание жидкости, наблюдается пульсация скорости и давления.

Переход от ламинарного течения к турбулентному для каждой трубы происходит при определенной скорости, называемой *верхней критической скоростью* $u_{кр.в}$ (рисунок 1.17). Если затем уменьшать скорость, то переход от турбулентного течения к ламинарному произойдет при меньшей скорости, которая называется *нижней критической скоростью* $u_{кр.н}$. Ламинарное течение в интервале скоростей от $u_{кр.н}$ до $u_{кр.в}$ неустойчиво и при малейшем возмущении переходит в турбулентное. Поэтому под критической скоростью принято считать нижнюю критическую скорость $u_{кр} = u_{кр.н}$.



Рисунок 1.17 – Переход ламинарного режима в турбулентный и наоборот

Проведя большое количество исследований для различных диаметров труб, Рейнольдс установил, что величина критической скорости $u_{кр}$ прямо пропорциональна кинематической вязкости ν и обратно пропорциональна диаметру трубы d , т. е.

$$u_{кр} = k\nu/d. \quad (1.13)$$

Он также установил, что коэффициент пропорциональности k одинаков для всех жидкостей, газов и любых диаметров труб. В честь его работ это безразмерное число k (критерий перехода от одного режима к другому) названо *критическим числом Рейнольдса* $Re_{кр}$:

$$Re_{кр} = \frac{u_{кр} d}{\nu}. \quad (1.14)$$

Многочисленные опыты, проведенные также и другими исследователями, показали, что для труб круглого сечения $Re_{кр} \approx 2300$. Таким образом, число Рейнольдса позволяет определить расчетным путем режим движения жидкости или газа. Для этого необходимо определить число Рейнольдса $Re = u d/\nu$ и сравнить его с критическим числом. Когда $Re < Re_{кр}$, имеет место ламинарный режим течения, при $Re > Re_{кр}$ – турбулентный.

Как отмечалось ранее, $Re_{кр} \approx 2300$ соответствует нижней критической скорости $u_{кр.н.}$. Поэтому, строго говоря, развитое турбулентное течение устанавливается только при $Re > 4000$, а в диапазоне $Re = 2300\dots 4000$ имеет место переходная область.

Если живое сечение потока является некруглым, то при расчете числа Рейнольдса используется гидравлический диаметр $D_г$:

$$Re = \frac{uD_г}{\nu}, \quad (1.15)$$

где u – средняя скорость течения жидкости или газа в трубопроводе.

Для потоков с некруглым живым сечением критическое число Рейнольдса находится в пределах $Re_{кр} = 1800\dots 4000$ [4, с. 86].

В трубопроводах систем отопления, вентиляции, водоснабжения, газоснабжения и др. движение жидкости (газа), как правило, является турбулентным, поскольку движущаяся среда имеет невысокую вязкость.

1.2 Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1.18. Установка содержит стеклянную трубу 1 с установленной в ней трубкой 2. Трубка 2 с помощью гибкого шланга соединена с сосудом 3, в котором находится подкрашенная жидкость. На гибком шланге установлен зажим 4.

Стеклянная труба через вентиль 5 соединена с водопроводной сетью.

Вода, пройдя через стеклянную трубу 1, поступает в мерный бак 6, который соединен с прозрачной трубкой 7. Для определения уровня жидкости в мерном баке используется шкала 8. С помощью вентиля 9 мерный бак связан с дренажом. Для измерения времени используется электрический секундомер 10.



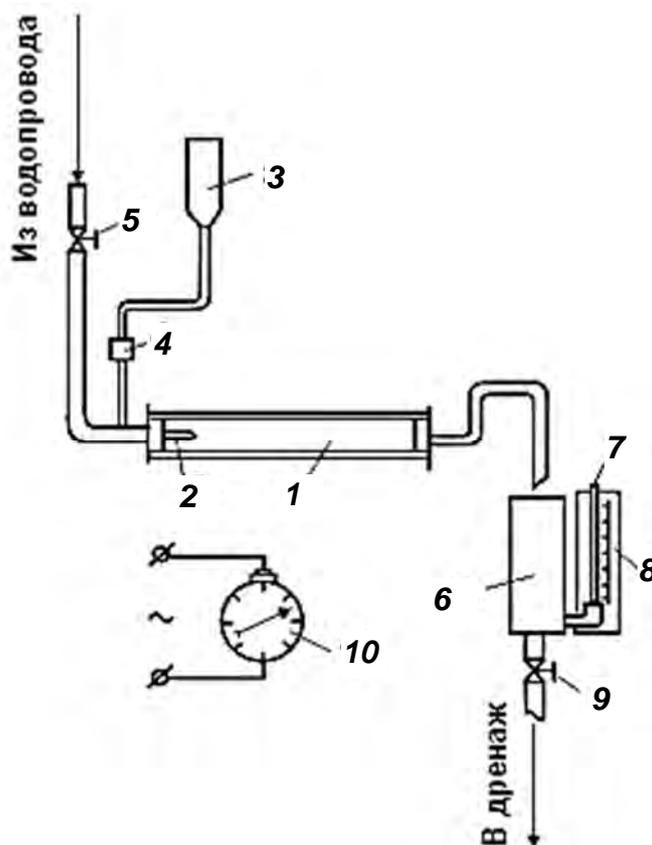


Рисунок 1.18 – Схема экспериментальной установки

1.3 Проведение испытаний

На лабораторном стенде приоткрыть вентиль 5 и ослабить зажим 4 в соответствии с рисунком.1.18. Воздействуя на вентиль 5, установить такой режим течения, при котором струйка подкрашенной жидкости не размывается. Закрыть вентиль 9. С помощью секундомера 10 замерить время t , в течение которого в мерный бак поступит объем жидкости W (принять $W = 1,5...2$ л). После этого закрыть вентиль 5 и измерить температуру воды T в мерном баке. Далее необходимо открыть вентиль 9 и слить воду из мерного бака, подготовив тем самым установку к проведению следующего опыта.

Изменяя степень открытия вентиля 5, провести шесть опытов. В первых двух опытах струйка подкрашенной жидкости не должна размываться. В третьем и четвертом опытах струйка должна иметь волнообразный характер. В пятом и шестом – интенсивное размывание струйки.

Результаты измерений и вычислений заносятся в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты исследований

Номер опыта	Объем мерного бака W , м ³	Время наполнения t , с	Расход Q , м ³ /с	Средняя скорость u , м/с	Температура воды T , °С	Кинематическая вязкость ν , м ² /с	Число Рейнольдса Re	Режим течения	
								наблюдаемый	расчетный
1...6									

1.4 Обработка результатов

Расход жидкости в стеклянной трубе $Q = W/t$.

Для определения средней скорости течения жидкости в стеклянной трубе необходимо вначале вычислить площадь сечения этой трубы S (внутренний диаметр трубы $d = 20$ мм). Тогда $u = Q/S$.

Используя значение температуры воды T [6, с. 14] определяют кинематическую вязкость ν .

Число Рейнольдса вычисляется по формуле (1.15), учитывая при этом, что $D_2 = d$. Расчетный режим течения определяется путем сравнения полученных численных значений Re с критическим числом Рейнольдса $Re_{кр} = 2300$. Наблюдаемый режим оценивают по характеру течения струйки подкрашенной жидкости. Затем оценивается совпадение расчетного и наблюдаемого режимов.

Все необходимые расчеты следует выполнять в СИ.

Контрольные вопросы

- 1 Что называется гидростатическим давлением?
- 2 Что называется абсолютным давлением?
- 3 Что называется избыточным давлением?
- 4 Что называется вакуумметрическим давлением?
- 5 Назовите закон Паскаля.
- 6 Абсолютное давление газа в сосуде равно 0,05 МПа. Чему равно избыточное давление в этом сосуде?
- 7 Избыточное давление газа в сосуде равно –0,02 МПа. Чему будет равно абсолютное давление в этом сосуде?
- 8 Вакуумметрическое давление газа в сосуде равно 0,05 МПа. Чему равно избыточное давление в этом сосуде?
- 9 Абсолютное давление газа в сосуде равно 0,15 МПа. Чему равно избыточное давление в этом сосуде?
- 10 Какое уравнение является основным уравнением гидростатики?
- 11 С помощью какого уравнения можно рассчитать избыточное давление в любой точке покоящейся жидкости, если на ее свободную поверхность действует атмосферное давление?
- 12 Какие приборы используют для измерения давления?
- 13 Что такое средняя скорость потока жидкости?



- 14 Что такое расход жидкости?
- 15 Чем отличается весовой расход от объемного?
- 16 Что называется массовым расходом?
- 17 Какие приборы используют для измерения расхода?
- 18 Какие существуют режимы течения жидкости и газа?
- 19 Как экспериментально определить режим течения жидкости и газа?

2 Лабораторная работа № 2. Экспериментальное определение коэффициентов местных гидравлических сопротивлений

Цель работы

- 1 Экспериментальное определение коэффициентов местных гидравлических сопротивлений.
- 2 Установление зависимости коэффициентов местных гидравлических сопротивлений от режимов течения жидкости.

2.1 Краткие теоретические сведения

Местные гидравлические сопротивления – это устройства или короткие участки трубопроводов (каналов), в которых происходит изменение скорости потока по величине и (или) направлению и, как правило, возникают вихревые зоны.

На преодоление местных сопротивлений расходуется дополнительный напор (энергия). Обусловлено это следующим. В результате возникновения вихревых зон частицы жидкости соударяются между собой, что приводит к потере механической энергии, которой они обладают. Кроме того, изменения профиля скоростей потока в местном сопротивлении сопровождаются увеличением сил трения между слоями жидкости, а следовательно, дополнительными потерями напора на трение.

При турбулентном режиме течения жидкости в местном сопротивлении преобладают потери напора, обусловленные вихреобразованием, а при ламинарном режиме – наоборот, существенно увеличиваются потери на трение.

Режимы течения жидкости в местных сопротивлениях крайне неустойчивы. В большинстве случаев даже при низких значениях числа Рейнольдса Re режим течения жидкости является турбулентным.

Потери напора в местных сопротивлениях в большинстве случаев могут быть вычислены по формуле Вейсбаха:

$$h_{\Pi} = \zeta_M \frac{u^2}{2g} = \frac{\Delta p_{\Pi}}{\rho g}, \quad (2.1)$$

где ζ_M – коэффициент местного сопротивления (величина безразмерная);

u – средняя скорость в сечении трубопровода перед местным сопро-



тивлением или после него (так, например, для внезапного расширения чаще всего скорость принимается в сечении перед ним, а для внезапного сужения – наоборот, в сечении после него).

К местным сопротивлениям относятся входы в трубопровод и выходы из него, плавные и внезапные расширения и сужения трубопроводов, повороты, разветвления, вентили и задвижки, клапаны и т. д. Рассмотрим некоторые местные сопротивления.

Внезапное расширение трубопровода (рисунок 2.1). Поток, выходящий из трубы меньшего сечения S_1 , не сразу заполняет поперечное сечение трубы большего сечения S_2 . Жидкость в месте расширения отрывается от стенок и дальше движется в виде струи, отделенной от остальной жидкости поверхностью раздела ac . Между струей и поверхностью трубопровода образуется кольцевая область вихревого движения жидкости avc . В этой области жидкость не участвует в общем поступательном движении, хотя обмен частицами жидкости между областью вихревого движения и струей постоянно происходит. Для обеспечения вихревого движения в области avc необходима энергия, чем и обусловлены потери напора. Струя постепенно расширяется и на некотором расстоянии от места увеличения диаметра заполняет все сечение трубы большего диаметра.

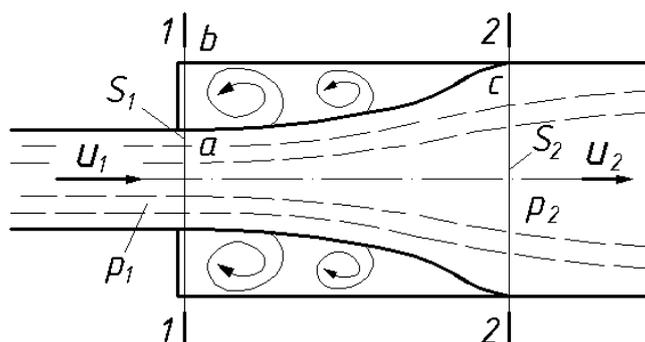


Рисунок 2.1 – Течение жидкости при внезапном расширении трубопровода

Для определения потерь напора при внезапном расширении трубопровода запишем уравнение Бернулли для сечений $1-1$ и $2-2$ при следующих допущениях:

– касательные напряжения на стенке трубы между сечениями $1-1$ и $2-2$ на стенке трубы равны нулю, т. е. пренебрегаем силами трения, считая их значительно меньше сил давления;

– давление p_1 в сечении $1-1$ равномерно действует по всей площади S_2 в месте внезапного расширения трубопровода, т. к. поток жидкости еще сохранил свой поперечный размер и, соответственно, скорость и давление еще не изменились;

– во всех точках сечений $1-1$ и $2-2$ скорости практически равны соответствующим средним скоростям u_1 и u_2 , при этом $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$.

С учетом этих допущений уравнение Бернулли примет вид:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + h_{ep}, \quad (2.2)$$

где h_{ep} – потери напора при внезапном расширении трубопровода.

Воспользуемся теоремой Эйлера об изменении количества движения:

$$m d\vec{u} = \vec{F} dt,$$

где $m d\vec{u}$ – изменение количества движения, обусловленное импульсом внешних сил $\vec{F} dt$. Применим эту теорему к объему жидкости, заключенному между сечениями 1–1 и 2–2. Тогда равнодействующая внешних сил, действующих на рассматриваемый объем, будет равна $(p_1 - p_2)S$. Изменение количества движения в этом случае можно определить следующим образом: $Q\rho dt(u_2 - u_1)$. Подставим данные значения в теорему Эйлера. Тогда

$$Q\rho(u_1 - u_2)dt = (p_1 - p_2)S_2 dt.$$

Разделим правую и левую части уравнения на $\rho g S_2$. С учетом того, что $u_2 = Q/S_2$, получим

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \frac{u_2^2}{g} - \frac{u_2 u_1}{g} = \frac{u_2^2}{2g} + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{2u_2 u_1}{2g} + \frac{u_1^2}{2g} - \frac{u_1^2}{2g}.$$

Преобразуем данное уравнение:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \left(\frac{u_1^2 - 2u_2 u_1 + u_2^2}{2g} \right),$$

ИЛИ

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{(u_1 - u_2)^2}{2g}, \quad (2.3)$$

Сравним уравнения (2.2) и (2.3). Очевидно, что потери напора при внезапном расширении трубопровода будут

$$h_{ep} = \frac{(u_1 - u_2)^2}{2g}. \quad (2.4)$$

Уравнение (2.4) называют теоремой Борда–Карно в честь французских ученых Ж. Борда (получил уравнение аналитически) и Н. Карно (экспериментально его подтвердил). Экспериментально установлено, что уравнение (2.4) справедливо при $Re > 3500$, поскольку сделанные ранее допущения неприемлемы для ламинарного течения.



Преобразуем уравнение (2.4) с учетом условия $u_2 = u_1 S_1 / S_2$:

$$h_{\text{ср}} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \frac{u_1^2}{2g} = \zeta_{\text{ср}} \frac{u_1^2}{2g}. \quad (2.5)$$

Тогда коэффициент сопротивления при внезапном расширении трубопровода $\zeta_{\text{ср}}$ будет

$$\zeta_{\text{ср}} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2. \quad (2.6)$$

Когда $S_2 \rightarrow \infty$, например, при выходе потока жидкости в неограниченный объем, $\zeta_{\text{ср}} = \zeta_{\text{вых}} = 1$.

Внезапное сужение трубопровода (рисунок 2.2). Потери напора складываются из двух составляющих:

1) потери напора на сжатие потока, т. к. частицы обтекают входной угол по определенной кривой, в результате его сечение становится меньшим, чем S_2 ;

2) потери напора при последующем расширении потока до сечения S_2 (определяются с помощью теоремы Борда–Карно). Тогда потери напора при внезапном сужении потока $h_{\text{вс}}$ будут

$$h_{\text{вс}} = \zeta_c \frac{u_c^2}{2g} + \frac{(u_c - u_2)^2}{2g} = \zeta_{\text{вс}} \frac{u_2^2}{2g}, \quad (2.7)$$

где ζ_c – коэффициент сопротивления, обусловленный сужением потока до S_c ;
 u_c – средняя скорость потока в суженном месте.

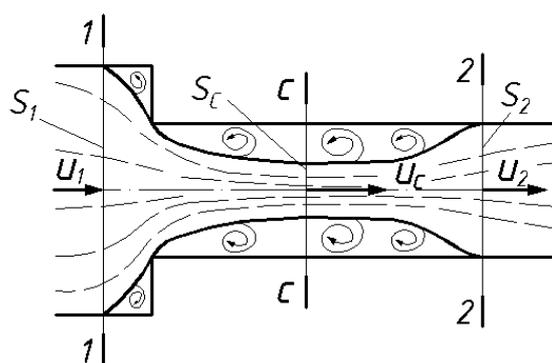


Рисунок 2.2 – Течение жидкости при внезапном расширении трубопровода

При выполнении инженерных расчетов для определения ζ_c можно пользоваться полуэмпирической формулой И. Е. Идельчика:

$$\zeta_{\text{вс}} = (1 - S_1/S_2)/2. \quad (2.8)$$



В частном случае, когда $S_1 \rightarrow \infty$, например, при выходе трубы из резервуара достаточно больших размеров, можно считать $S_1/S_2 = 0$. Тогда коэффициент сопротивления $\zeta_{вс} = 0,5$. С помощью закругления входной кромки можно существенно уменьшить коэффициент сопротивления и, соответственно, потери напора.

Поворот трубопровода. Внезапный поворот трубопровода (колена) вызывает значительные потери напора, так как в нем происходит отрыв потока от стенок и вихреобразование (рисунок 2.3). Потери напора зависят от угла поворота δ , с увеличением δ потери возрастают, при $\delta = 90^\circ$ коэффициент сопротивления $\zeta_{вп} = 1,1$. Для уменьшения потерь напора поворот выполняют плавным.

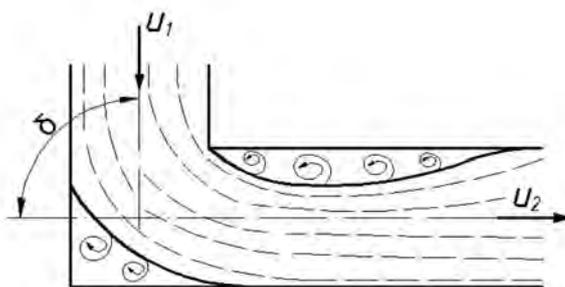


Рисунок 2.3 – Течение жидкости при внезапном повороте трубопровода

Как правило, для местных сопротивлений коэффициент сопротивления ζ_m определяется экспериментально. Схема автоматизированного стенда для определения коэффициентов местных сопротивлений приведена на рисунке 2.4.

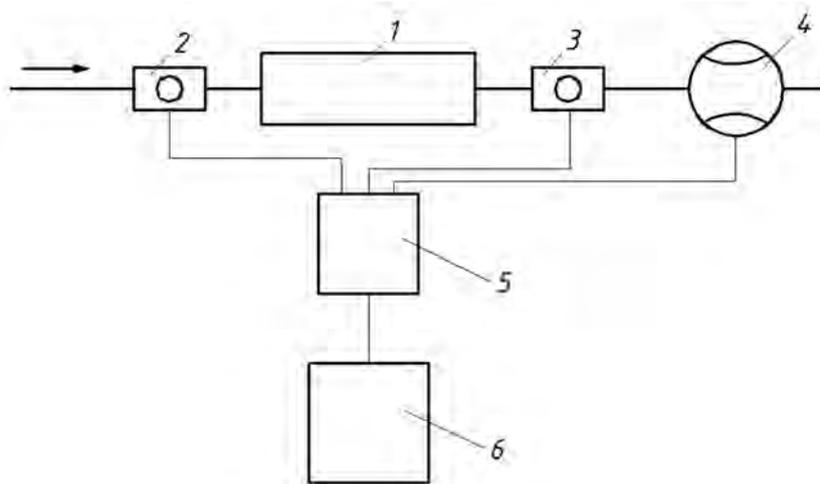


Рисунок 2.4 – Схема стенда для экспериментального определения коэффициентов местных сопротивлений

Местное сопротивление l располагается горизонтально и через него пропускается поток жидкости. С помощью точных датчиков 2 и 3 определяется давление до сопротивления $p_{вх}$ и после $p_{вых}$, а также расход жидкости Q с помощью расходомера 4. Информация о давлении и расходе в виде электрических сигналов поступает в устройство сбора данных 5, а затем в компьютер 6, где с

помощью специальной программы производится обработка данных, поступающих с устройства 5. В случае, когда диаметры трубопровода до и после местного сопротивления равны, расчет коэффициента местного сопротивления ζ_M выполняется с помощью зависимости, полученной из уравнения неразрывности потока жидкости и (2.1):

$$\zeta_M = \frac{\Delta p \pi^2 d^4}{8 \rho Q^2} . \quad (2.9)$$

Диаметр трубопровода d и плотность ρ при этом вводятся в компьютер вручную.

В случае, когда труба некруглая, зависимость для расчета ζ_M имеет вид:

$$\zeta_M = \frac{2 \Delta p S^2}{\rho Q^2} . \quad (2.10)$$

При этом вручную вводятся площадь живого сечения трубопровода S и плотность ρ .

В некоторых случаях площади сечений трубопровода на входе и выходе местного сопротивления различны. При этом уравнение Бернулли для сечений на входе и выходе данного сопротивления будет следующим (считаем течение турбулентным, т. е. $\alpha_{вх} = \alpha_{вых} \approx 1$):

$$\frac{p_{вх}}{\rho g} + \frac{u_{вх}^2}{2g} = \frac{p_{вых}}{\rho g} + \frac{u_{вых}^2}{2g} + \zeta_M \frac{u_{вх}^2}{2g} . \quad (2.11)$$

Преобразуем уравнение (2.11):

$$\zeta_M \frac{u_{вх}^2}{2g} = \frac{p_{вх} - p_{вых}}{\rho g} + \frac{u_{вх}^2 - u_{вых}^2}{2g} . \quad (2.12)$$

Решим уравнение (2.12) относительно ζ_M :

$$\zeta_M = \frac{2(p_{вх} - p_{вых})}{\rho u_{вх}^2} + \frac{u_{вх}^2 - u_{вых}^2}{u_{вх}^2} .$$

С учетом, что $u_{вх} = Q/S_{вх}$ и $u_{вых} = Q/S_{вых}$, получим

$$\zeta_M = \frac{2(p_{вх} - p_{вых})S_{вх}^2}{\rho Q^2} - \frac{S_{вх}^2}{S_{вых}^2} + 1 , \quad (2.13)$$

где $S_{вх}$ и $S_{вых}$ – площади живых сечений трубопровода на входе и выходе местного сопротивления соответственно.



Приведенная методика определения ζ_m используется в инженерных расчетах. Для более точного определения ζ_m в научных исследованиях учитывают линейные потери напора между датчиками 2 и 3.

Ввиду большой сложности структуры потока в местных сопротивлениях значения ζ_m в большинстве случаев могут быть определены только опытным путем. Значение ζ_m зависит от вида местного сопротивления, числа Рейнольдса Re , в некоторой степени от шероховатости стенок, а для запорных устройств (кранов, вентилей, задвижек, клапанов и др.) – от степени их открытия.

Исследованиями установлено, что ζ_m зависит от числа Re лишь при ламинарном режиме движения. В турбулентных потоках при достаточно больших числах Re влияние последних на ζ_m незначительно, поэтому значения их считают зависящими только от вида и конструктивного исполнения местного сопротивления.

Для большинства местных сопротивлений коэффициенты ζ_m определены ранее и приведены в справочниках. Поэтому при выполнении инженерных расчетов для определения потерь напора в местных сопротивлениях h_m используется формула Вейсбаха (2.1), а коэффициент сопротивления ζ_m выбирается по справочнику.

2.2 Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рисунок 2.5) состоит из двухпоточного пластинчатого насоса Н1 (5Г12-33АМ, номинальная подача 5/25 л/мин), фильтра Ф1 (40-80-1-УХЛ4) с дифференциальным клапаном КД1, предохранительного клапана непрямого действия КП1 (Г52-14), регулятора потока РП1 (МППГ 55-22), двух четырехлинейных распределителей Р1 и Р2 (Р-102), счетчика количества (объема) жидкости СЧ (УВК-20) и гидролиний с установленными в них обратными клапанами КО1...КО4. Для измерения давления в различных сечениях трубопроводов используются 12 манометров МН1...МН12. Всасывание рабочей жидкости осуществляется из гидробака Б1. Для измерения температуры рабочей жидкости служит термометр T_p . Насос Н1 приводится во вращение электродвигателем М. Отсчет времени производится с помощью электрического секундомера ЭлС.

Дифференциальный клапан КД1 вступает в работу в том случае, когда перепад давления на фильтре Ф1 превысит допустимое значение, что может произойти при засорении фильтрующих элементов.

Предохранительный клапан КП1 настроен на давление срабатывания 3,5 МПа. При более низких значениях давления в напорной линии весь расход жидкости направляется через регулятор потока РП1 к распределителю Р1.

Регулятор потока РП1 позволяет плавно изменять расход в пределах 0...25 л/мин.

С помощью распределителей Р1 и Р2 рабочая жидкость может направляться по одной из гидролиний 1, 2 или 3. При установке рукоятки распределителя Р1 в рабочее положение 1 (рабочие положения рукояток и сами



распределители обозначены на опытной установке) рабочая жидкость направляется к счетчику СЧ и далее в гидробак Б1 через гидрوليнию 1. Положение рукоятки распределителя Р2 при этом безразлично.

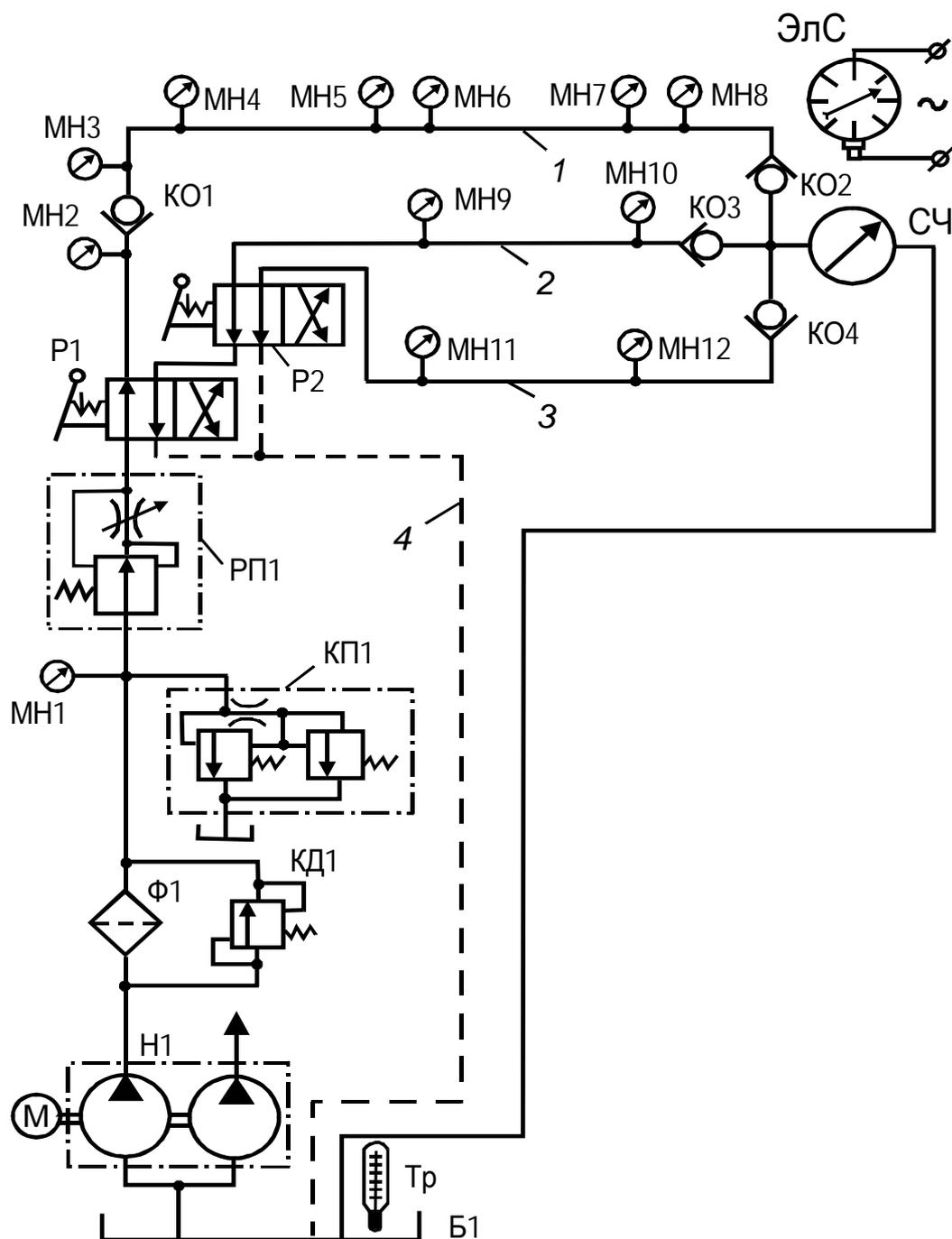


Рисунок 2.5 – Схема экспериментальной установки

При установке рукоятки распределителя Р1 в рабочее положение 2 в зависимости от положения рукоятки распределителя Р2 рабочая жидкость направляется по гидрوليнии 2 или 3 (если рукоятка распределителя Р2 установлена в рабочее положение 1 – по гидрوليнии 2, а если в положение 2 – по гидрوليнии 3).

Количество рабочей жидкости, протекающей во время проведения опыта по одной из гидрOLIИЙ 1, 2 или 3, должно фиксироваться счетчиком СЧ. Для

исключения перетекания рабочей жидкости через распределители P2 и P1 на слив в обход счетчика СЧ в схеме стенда предусмотрена установка обратных клапанов КО2, КО3, КО4. Отвод утечек осуществляется через дренажную линию 4.

Все опыты, предусмотренные в данной лабораторной работе, проводятся на трубопроводе 1 (см. рисунок 2.5).

Схема исследуемого трубопровода приведена на рисунке 2.6. При изготовлении этого трубопровода использованы стальные трубы, имеющие внутренний диаметр 6 и 8,5 мм. Трубопровод содержит четыре местных сопротивления: обратный клапан КО1 (без пружины), колено К (поворот на 90°), внезапное расширение ВР и внезапное сужение ВС. В сечениях, обозначенных на схеме, осуществляется измерение давлений, причем номер сечения соответствует номеру манометра на рисунке 2.5.

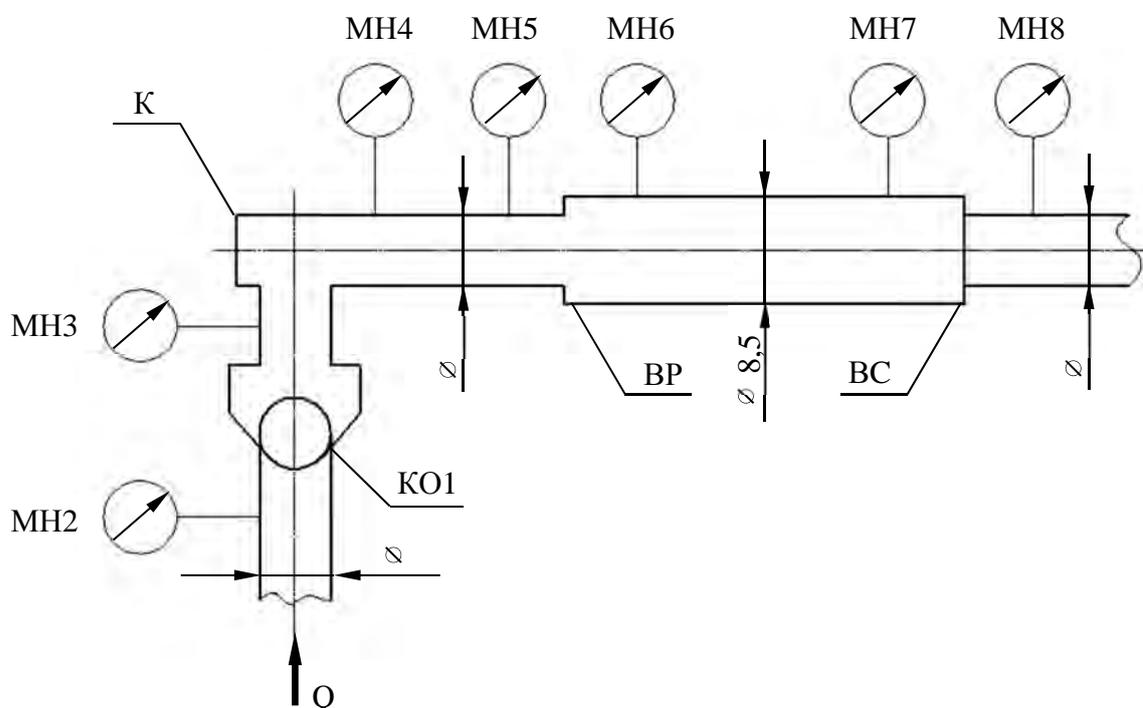


Рисунок 2.6 – Схема исследуемого трубопровода

2.3 Проведение испытаний

2.3.1 Подготовка установки к работе.

Все опыты, предусмотренные в данной работе, проводятся на трубопроводе, содержащем исследуемые местные сопротивления (см. рисунок 2.6).

Перед включением установки необходимо:

1) рукоятку управления распределителем P1 установить в рабочее положение 1 (положение рукоятки распределителя P2 безразлично). При этом обеспечивается прохождение рабочей жидкости через исследуемый трубопровод 1 (положения рукояток показаны на горизонтальной панели стенда);

2) указатель настройки регулятора потока РП1 установить в рабочее положение 1, чему соответствует минимальный расход жидкости через исследуемый трубопровод.

2.3.2 Методика испытаний.

После выполнения условий, изложенных в п. 2.3.1, необходимо:

1) включить пускатель электродвигателя и дать возможность поработать установке в течение 3...5 мин;

2) устанавливая с помощью регулятора потока РП1 различные значения расхода, провести три опыта. Показания манометра МН2 на входе исследуемого трубопровода ориентировочно должны быть равны:

- опыт 1 – $p_2 \approx 0,5$ МПа;
- опыт 2 – $p_2 \approx 1,2$ МПа;
- опыт 3 – $p_2 \approx 2,0$ МПа (максимально возможное).

При проведении каждого опыта необходимо:

- снять показания манометров МН2...МН8;
- измерить температуру рабочей жидкости $T_{ж}$;
- измерить время t прохождения через счетчик заданного объема рабочей жидкости W .

Результаты измерений заносятся в таблицу 2.1.

При включенном стенде управление распределителями Р1 и Р2 допускается лишь после предварительной установки указателя настройки регулятора потока РП1 в рабочее положение 1. После проведения всех опытов следует отключить установку.

Таблица 2.1 – Результаты измерений

Номер опыта	Показание манометров МН2...МН8, МПа							Температура рабочей жидкости $T_{ж}$, °С	Кинематическая вязкость $\nu_{ж}$, м ² /с	Объем жидкости, проходящей через счетчик, W , м ³	Время прохождения объема t , с	Расход Q , м ³ /с
	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8					
1												
2												
3												
Примечание – W – объём; $Q = W/t$												

2.4 Обработка результатов

Кинематическая вязкость $\nu_{ж}$ (см. таблицу 2.1) рабочей жидкости при температуре $T_{ж}$ определяется по графику. Все необходимые размеры исследуемого трубопровода приведены на рисунке 2.6.

Результаты предварительной обработки экспериментальных данных заносятся в таблицу 2.1.



Плотность масла $\rho = 870 \text{ кг/м}^3$.

Значения ζ_m вычисляются с помощью уравнения (2.13), затем эти значения ζ_m сравниваются со справочными данными [6, с. 83–99] и заносятся в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты экспериментальных исследований

Вид местного сопротивления	Площадь живого сечения, м ²		Номер опыта	Коэффициент местного сопротивления ζ_m	
	$S_{вх}$	$S_{вых}$		полученный	справочный
Обратный клапан			1		
			2		
			4		
			Среднее значение		
Колено			1		
			2		
			4		
			Среднее значение		
Внезапное расширение			1		
			2		
			4		
			Среднее значение		
Внезапное сужение			1		
			2		
			4		
			Среднее значение		

Контрольные вопросы

1 Дайте определение местного сопротивления, назовите основные виды местных сопротивлений.

2 Объясните причины, вызывающие потери напора в местных сопротивлениях.

3 В чем заключается методика экспериментального определения коэффициента местного сопротивления ζ_m ?

4 Назовите формулы для расчета потерь давления в местном сопротивлении.

5 В каком местном сопротивлении потери давления можно определить теоретически?

6 Назовите формулу Борда–Карно.



3 Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе оформляется каждым студентом персонально. Он должен содержать:

- название лабораторной работы;
- цель лабораторной работы;
- схему и описание лабораторной установки;
- таблицу (ы) измеренных и вычисленных величин;
- формулы, использованные при вычислениях;
- выводы.

Отчет оформляется на отдельных листах или в тетради. На титульном листе отчета по каждой лабораторной работе указывается следующее: название университета; группа, фамилия, имя и отчество студента; фамилия и инициалы преподавателя; название лабораторной работы. В конце отчета студент ставит свою подпись и дату выполнения лабораторной работы.

Список литературы

1 **Альтшуль, А. Д.** Гидравлика и аэродинамика : учебник для вузов / А. Д. Альтшуль, Л. С. Животовский, Л. П. Иванов. – Москва : Стройиздат, 1987. – 414 с.

2 **Медведев, В. Ф.** Гидравлика и гидравлические машины : учебное пособие / В. Ф. Медведев. – Минск : Вышэйшая школа, 1998. – 311 с.

3 **Большаков, В. А.** Гидравлика. Общий курс : учебник для вузов / В. А. Большаков, В. Н. Попов. – Киев : Вища школа, 1989. – 215 с.

4 **Ухин, Б. В.** Гидравлика : учебное пособие / Б. В. Ухин. – Москва : ФОРУМ ; ИНФРА-М, 2009. – 464 с.

5 **Шейпак, А. А.** Гидравлика и гидропневмопривод : учебное пособие. Ч. 1 : Основы механики жидкости и газа / А. А. Шейпак. – 6-е изд., стер. – Москва : МГИУ, 2007. – 264 с.

6 Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я. П. Вильнер [и др.] – Минск : Вышэйшая школа, 1985. – 382 с.

7 **Вильнер, Я. М.** Лабораторный практикум по гидравлике / Я. М. Вильнер. – Минск : Вышэйшая школа, 1980. – 190 с.

8 **Калицун, В. И.** Гидравлика, водоснабжение и канализация : учебное пособие для вузов / В. И. Калицун, В. С. Кедров, Ю. М. Ласков. – Москва : Стройиздат, 2000. – 397 с.

9 **Исаев, А. П.** Гидравлика : учебник / А. П. Исаев, Н. Г. Кожевникова, А. В. Ещин. – Москва : ИНФРА-М, 2015. – 448 с.

