ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени И.С. Тургенева

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ И.С. ТУРГЕНЕВА» ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ Н.Н. ПОЛИКАРПОВА

Кафедра машиностроения

В.С. Ванин, Т.В. Галаган

ГИДРАВЛИКА

Практикум

Дисциплина – «Гидравлика»
Направление – 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»
Специальность – 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов»

Орёл
ОГУ имени И.С. Тургенева
2019

Авторы: канд. техн. наук,
доц. каф. машиностроения В.С. Ванин
канд. техн. наук,
доц. каф. машиностроения Т.В. Галаган

Рецензент: канд. техн. наук,
доц. каф. машиностроения В.В. Галаган

Практикум содержит порядок оформления и защиты отчета по лабораторным работам, описание и последовательность их выполнения, заключение и список литературы.

Предназначен студентам, обучающимся по направлению 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», по специальности 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов», изучающим дисциплину «Гидравлика».

Редактор И.Ю. Куликов
Технический редактор Л.Н. Курдюмова

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

Подписано к печати 24.06.2019 г. Формат 60×90 1/16.
Усл. печ. л. 5,8. Тираж 10 экз.
Заказ №___

Отпечатано с готового оригинал-макета
на полиграфической базе ОГУ имени И.С. Тургенева
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95.

© Ванин В.С., Галаган Т.В., 2019
© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

1. **ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ** 4

Лабораторная работа № 1. **Измерение давлений и тарировка измерительных приборов** 12

2. **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ** 25

Лабораторная работа № 2. **Исследование гидравлических сопротивлений трения (по длине)** 27

3. **КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА ЖИДКОСТИ** 39

Лабораторная работа № 3. **Исследование преобразования форм энергии струи жидкости** 49

Лабораторная работа № 4. **Определение расхода жидкости с помощью сужающих устройств** 55

Лабораторная работа №5. **Определение режимов движения жидкости** 60

4. **ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ** 66

Лабораторная работа № 6. **Определение количества жидкости в закрытом сосуде** 74

5. **ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ** 78

Лабораторная работа № 7. **Определение напорно-расходных характеристик насоса и установки** 78

ПРИЛОЖЕНИЯ 85

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. **Соотношение некоторых единиц измерений в различных системах** 85

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. **Физические свойства воды на линии насыщения** 86

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. **Значения плотности жидкостей** 87

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. **Плотность и теплопроводность некоторых материалов** 88

. ПРИЛОЖЕНИЕ 5. **Средние величины шероховатости труб** 90

ПРИЛОЖЕНИЕ 6. **Коэффициенты местных сопротивлений** 91

ПРИЛОЖЕНИЕ 7. **Значения коэффициента температурного расширения** 93

1. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

Гидравлика изучает жидкости и газы как рабочие тела технических систем. Рабочие тела передают энергию от ее источника исполнительным механизмам (потребителям), т.е. участвуют в преобразовании форм механической энергии и передаче ее в пространстве.

Основная особенность жидкостей и газов как рабочих тел – их сплошность. Предполагается, что любой объем заполняется ими равномерно, без образования пустот. Все характеристики сплошной среды (давление, плотность, температура, скорость и др.) – непрерывные и дифференцируемые функции координат.

В широком смысле жидкости можно разделить на капельные и газообразные. Капельные жидкости или просто жидкости в малых количествах собираются в капли, форма которых определяется силами тяжести и поверхностного натяжения. В больших количествах капельные жидкости принимают форму сосуда, в котором они находятся, с образованием поверхности раздела между жидкостью и окружающей средой. Газообразные жидкости или газы не образуют капель, а в замкнутых сосудах заполняют их полностью без образования поверхностей раздела.

С молекулярно-кинетических позиций о строении вещества различия капельных жидкостей и газов определяются количеством химических или силовых связей молекул вещества. Если в твердом кристаллическом теле практически каждая молекула связана с соседней, то в капельной жидкости половина этих связей разорвана. В газах межмолекулярные силовые связи отсутствуют полностью. Следствием этого является то, что уменьшить эти расстояния, т.е. сжать капельную жидкость, затруднительно, а газ – относительно легко. Поэтому капельные жидкости считаются несжимаемыми, а газы – сжимаемыми. На основании этого деление сплошных сред на жидкости и газы может заменяться делением на сжимаемые и несжимаемые жидкости.

При изучении законов гидравлики рассматриваются три типа капельных жидкостей:

1) идеальная жидкость – это абстрактная модель жидкости, обладающая абсолютной текучестью и неизменяемостью объема при изменении внешних условий (абсолютной несжимаемостью). Вязкость в таких жидкостях отсутствует;

2) реальные или вязкие жидкости – это физические тела, обладающие большой подвижностью, способные изменять свой объем при изменении внешних условий и в которых возникают касательные напряжения при движении за счет внутреннего трения. Такие жидкости называют ньютоновскими;

3) неньютоновские или реологические жидкости. Они обладают специфичными свойствами, часть из которых рассматривается далее.

1.1 Плотность

Масса единицы объема жидкости называется плотностью и обозначается через ρ:

$$\rho = m/V,$$

где m – масса жидкости;

V – объем жидкости.

В единицах СИ плотность измеряется в кг/м^3. Плотность воды при температуре 39,8 °С равна 1000 кг/м^3.

Вес единицы объема жидкости называется удельным весом и обозначается через γ:

$$\gamma = G/V.$$

В единицах СИ удельный вес измеряется в Н/м^3. Масса и вес связаны между собой соотношением:

$$G = m \cdot g,$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2.

Отсюда:

$$\gamma = \frac{m \cdot g}{V} = \rho \cdot g.$$

1.2 Вязкость

Вязкостью называется свойство жидкости оказывать сопротивление усилиям, вызывающим относительное перемещение ее частиц при ламинарном течении. Различают динамическую и кинематическую вязкость.

Причиной вязкостного сопротивления движению является молекулярное взаимодействие между частицами жидкости, а также взаимодействие между молекулами жидкости и движущегося в ней твердого тела.

Обусловленная вязкостью сила внутреннего трения направлена в сторону, противоположную движению слоя, перемещающегося с бóльшей скоростью, и действует на этот слой. Тем самым сила внутреннего трения вызывает сопротивление движению этого слоя жидкости. Вязкость является основным отличием реальной жидкости от жидкости идеальной, которая вязкости не имеет.

Первоначальные основы закона внутреннего трения между слоями жидкости даны И. Ньютоном в 1686 г. и сводятся, в частности, к следующему:

1) вязкость и сила внутреннего трения практически не зависят от давления;

2) внутреннее трение прямо пропорционально относительной скорости перемещения смежных слоев друг по другу или градиенту скорости. Под относительной скоростью в данном случае понимается приращение скорости при переходе от одного слоя «a» к другому слою «b» по нормали к направлению движения жидкости, т.е. dW/dn (рис. 1). Это приращение скорости на единицу длины по нормали к движению потока называют градиентом скорости.

Всесторонние исследования распределения скорости по нормали к стенке показали, что скорость струек различна. По мере приближения исследуемого потока к стенке скорость его уменьшается. На самой поверхности стенки жидкость как бы прилипает к ней, и скорость становится равной нулю. И наоборот, по мере удаления струйки от стенки скорость ее увеличивается.

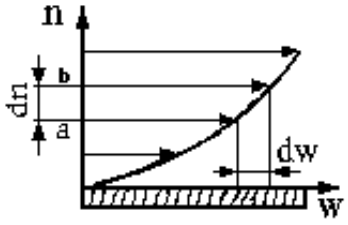


Рис. 1. Иллюстрация определения градиента скорости вблизи неподвижной поверхности

В дальнейшем высказанное Ньютоном положение о внутреннем трении жидкости было проверено опытами крупнейшего русского ученого Н.П. Петрова (1836–1920).

Математической формулировкой закона Ньютона является выражение:

$$T = \mu \cdot F \cdot dW / dn,$$

где T – сила внутреннего трения (Н) или касательная сила, которую нужно прилагать, чтобы перемещать один слой жидкости относительно другого с постоянной скоростью;

F – площадь соприкосновения слоев жидкости ($м^2$);

dW/dn – градиент скорости (1/сек);

μ – динамический коэффициент вязкости или динамическая вязкость (Па·с).

В технической системе единиц динамическая вязкость измеряется в пуазах (П) или сантипуазах и связана с единицей динамической вязкости в системе СИ выражением:

1 П =0,1 Па·с.

Из закона Ньютона вытекает понятие об удельной силе внутреннего трения или касательном напряжении:

$$\tau = T / F = \mu \cdot dW / dn.$$

Из последнего выражения следует, что при $dW/dn=1$, $\tau=\mu$. Следовательно, коэффициент динамической вязкости выражает силу трения T, приходящуюся на единицу поверхности F между двумя скользящими относительно друг друга слоями, когда на единице длины нормали к поверхности скольжения скорость движения изменяется на единицу скорости.

В системе СГС величина μ имеет размерность дина·с/см^2. От названия единицы силы – дина и произошло название «динамическая вязкость».

Кинематическая вязкость ν определяется по следующему уравнению:

$$\nu = \mu / \rho \ \text{м}^2/\text{с}.$$

В технической системе единиц кинематическая вязкость измеряется в стоксах (Ст) или сантистоксах. Соотношение единиц кинематической вязкости в технической системе единиц и в системе СИ имеет вид:

$$1 \ \text{Ст}=10^{-4} \ \text{м}^2/\text{с} = 1 \ \text{см}^2/\text{с}.$$

Эталоном вязкости служит дистиллированная вода, поэтому иногда вязкость измеряют в градусах Энглера. Вязкость в градусах Энглера ^{o}E является отношением времени τ_1 истечения 200 см^3 исследуемой жидкости из некоего сосуда ко времени τ истечения того же объема дистиллированной воды из того же сосуда при температуре 20 ^{o}C:

$$^{o}E=\frac{\tau_1}{\tau};$$

где τ = 51,6 с.

Переход от вязкости в градусах Энглера к кинематической вязкости в системе СИ выполняется по эмпирической формуле Убеллоде:

$$\nu = 0{,}0731 \cdot {}^{o}E - \frac{0{,}0631}{^{o}E} \ \text{см}^2/\text{с}.$$

Вязкость капельных жидкостей значительно снижается с возрастанием температуры. Вязкость газов, наоборот, увеличивается с ее повышением. Причина различия влияния температуры на вязкость капельных жидкостей и газов обусловлена тем, что вязкость газов имеет молекулярно-кинетическую природу, а вязкость капельных жидкостей в основном зависит от сил сцепления меж-

ду молекулами. Поскольку плотность газов примерно в тысячу раз меньше плотности капельных жидкостей, то их кинетическая вязкость может быть больше вязкости этих жидкостей.

Справка. Мы говорим «молекулы» воды, газа, белка и т.п. Слово молекула появилось почти 350 лет назад в книге французского философ Пьера Гассенди, изданной в 1647 г. По Гассенди молекула («массочка», от латинского слова «moles» – масса) – это несколько атомов, объединенных в одну группу, сохраняющую свою целостность. По разному объединенные атомы, т.е. разные молекулы, составляют «кирпичики», из которых природа строит разнообразные тела.

Молекулы всех веществ невообразимо малы. Их размеры – миллионные доли миллиметра, т.е. тысячные доли микрона. Ни в какой самый сильный оптический микроскоп невозможно разглядеть молекулы.

Все то, что мы видим, что можем потрогать руками, состоит из гигантского количества молекул. В капельке воды содержится сто секстиллионов молекул – единица с 23 нулями. А на кончике комариного жала (его площадь около10^{-10} мм^2) могут поместиться десятки тысяч молекул воды.

Молекулы состоят из атомов. Разновидностей атомов не так много: чуть более ста. Атомы – это «кирпичики», из которых составлены все вещества.

Догадки об атомарном строении вещества высказывали еще в глубокой древности. Более 2000 лет назад древнегреческий философ Демокрит представлял себе мир так: «…существуют атомы и пустота. Атомы – неделимые материальные элементы, вечные, неразрушимые, непроницаемые, различаются формой, величиной, положением в пустоте; из их вихря образуются как отдельные тела, так и все бесчисленные миры». [3, стр.36–41].

Слово «атом» происходит от греческого «atomos» – неделимый. Именно это свойство атома древнегреческие философы считали самым главным. Однако они ошибались. Атом оказался делимым. Его строение впервые было описано великим физиком Эрнестом Резерфордом в 1911 году. Он пришел к поразительному выводу: атом внутри не заполнен. Почти вся его масса сосредоточена

внутри центральной его части – атомном ядре, вокруг которого вращаются электроны. Атом подобен солнечной системе, уменьшенной в миллиарды миллиардов раз. Поэтому модель Резерфорда называют планетарной моделью атома. Простейшим из атомов является атом водорода, входящего в молекулу воды. Атом водорода состоит из ядра и вращающегося вокруг него по определенным орбитам электрона. Масса атома равна $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ г. Диаметр атома водорода приблизительно равен 10^{-8} см. Эта величина соответствует одному ангстрему. Точно определить размер атома нельзя – граница его как бы размыта. Радиус ядра атома водорода примерно в сто тысяч раз меньше радиуса атома и составляет $1{,}3 \cdot 10^{-13}$ см. Плотность вещества в ядре чрезвычайно велика. Она составляет около $2 \cdot 10^{14}$ г/см^3, т.е. около двухсот миллионов тонн в кубическом сантиметре. Плотность же воды равна 1 г/см^3. Булавочная головка из вещества с плотностью ядра оказалась бы тяжелее стальной глыбы размером с десятиэтажное здание.

1.3 Поверхностное натяжение

Всякая молекула, расположенная в глубине жидкости, притягивается своими соседками. Силы этого притяжения взаимно уравновешены и поэтому не будут заметны. Иная картина у тех молекул, которые расположены не в глубине, а в поверхностном слое жидкости. Они притягиваются снизу и со всех сторон, но не сверху, так как там находится уже не жидкость, а другая среда. В результате поверхностный слой находится как бы в натянутом состоянии, подобно упругой пленке.

Эти пленки удерживают небольших насекомых – водомерок, маленькие металлические иголки и другие предметы. Поверхностное натяжение определяется природой жидкости.

Для демонстрации действия поверхностного натяжения выпив чай, оставьте на дне чашки немного жидкости с чаинками. Чайной ложкой или спичкой осторожно коснитесь поверхности жидкости. Она тотчас «поползет» вверх,

увлекая за собой чаинки. Это явление – результат действия поверхностного натяжения.

Если две сухие стеклянные пластинки приложить друг к другу, они легко разъединяются. Если же одну из пластинок смочить водой, разъединить их будет значительно труднее. Это тоже результат действия поверхностного натяжения.

Поверхностный слой оказывает давление на всю остальную массу жидкости. Это так называемое молекулярное давление, как оказалось, измеряется весьма внушительными цифрами. Для эфира, например, оно составляет 1400, для спирта 2400, а для воды 11000 атмосфер. В этом может заключаться одна из причин того, что капельные жидкости практически несжимаемы. Ведь обычное внешнее давление ничтожно по сравнению с тем, которое жидкость уже испытывает от своих же молекул – молекул поверхностного слоя. Вторая причина ее несжимаемости – малые расстояния между молекулами, половина из которых связана внутренними межмолекулярными связями.

При создании новой поверхности жидкости требуется затрата энергии для преодоления сил внутреннего давления, которая характеризуется коэффициентом поверхностного натяжения σ, измеряемым в Н/м.

Коэффициент поверхностного натяжения рассматривается как сила, действующая на единицу длины поверхности раздела жидкости и соприкасающейся с ней среды, а также как работа, требуемая для образования единицы новой (межфазной) поверхности. С увеличением температуры жидкости поверхностное натяжение уменьшается, снижаясь до нуля в критической точке.

1.4 Силы, действующие в жидкости

Жидкость в гидравлике рассматривается как непрерывная среда, т.е. ее молекулярным строением пренебрегают. В покоящейся жидкости нет перемещения слоев относительно друг друга. Это показывает, что в жидкости действуют не сосредоточенные силы, а силы, непрерывно распределенные по ее объему (массе) или по поверхности. В связи с этим силы, действующие на жидкость, разделяют на массовые (объемные) и поверхностные.

Массовые силы пропорциональны массе жидкости и, если жидкость однородна, пропорциональны ее объему.

К массовым силам относятся сила тяжести и сила инерции, которая действует на жидкость при относительном ее покое во вращающихся или ускоренно движущихся сосудах.

Поверхностные силы непрерывно распределены по поверхности жидкости и в случае равномерности распределения пропорциональны площади этой поверхности. Если массовые силы обусловлены силами тяжести и инерции, то поверхностные силы обусловлены непосредственным воздействием других тел (твердых или газообразных), соприкасающихся с данной жидкостью. Согласно третьему закону Ньютона, жидкость действует на другие тела с той же силой, но в противоположном направлении. Массовые силы относят к единице массы (Н/м^3), а поверхностные – к единице поверхности (Н/м^2 =Па).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЙ И ТАРИРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Цель работы: повышение уровня знаний о приборах для измерения давлений, освоение метода измерения давлений.

Задачи работы:

1. Закрепление сведений о приборах для измерения давления.

2. Приобретение начальных навыков измерения медленно меняющегося давления и тарировки измерительных приборов.

3. Приобретение начальных навыков измерения быстропеременного давления и тарировки измерительного тракта.

4. Освоение методики статистической обработки результатов измерений с использованием ПЭВМ.

Теоретические сведения о давлении

Давление - сила, с которой жидкость воздействует на помещенную в нее поверхность единичной площади в направлении к нормали к поверхности. Жидкость, налитая в сосуд, испытывает давление атмосферы, а каждая частица жидкости испытывает давление, создаваемое весом вышележащих частиц, (см. рис. 2) [1].

Превышение давления над атмосферным называют избыточным. Давление на поверхности жидкости, т.е. на границе раздела с окружающей средой, может быть как больше, так и меньше атмосферного. В последнем случае оно называется вакуумным.

За единицу давления в международной системе единиц (СИ) принят паскаль (Па) - давление, вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м^2. Наряду с ней применяют кило-Паскаль (кПа) и мегаПаскаль (МПа) (приложение 1).

1 Па= 1 Н/м^2=10^{-3}кПа=10^{-6}мПа.

В технике продолжают применять внесистемные единицы - техническую атмосферу (ат) и бар (бар).

1 ат = 1 кгс/см^2 = 10000 кгс /м^2;

1 бар -10^{3}Па = 1,02 ат.

Для измерения давления применяют разнообразные приборы:

– для измерения атмосферного давления - барометры,

– для измерения избыточного давления - разности между абсолютным давлением и атмосферным давлением - манометры, вакуумметры (при давлении ниже атмосферного) или мановакуумметры. Эти приборы принципиально не различаются, но имеют разные настройки нулевого уровня (уровня отсчета) давления. Если измеряемое давление мало, прибор называют микроманометром;

– для измерения разностей давления в двух точках служат дифференциальные манометры.

Принцип работы барометра основан на деформации сильфонной трубки, внутренний объем которой герметизируют. При известном давлении окружаю-

щей среды стрелка прибора сразу выставляется на величину этого давления. При изменении атмосферного давления сильфон расширяется или сжимается, что вызывает отклонение стрелки в одну или другую сторону. По принципу работы манометры разделяются на пружинные и жидкостные.

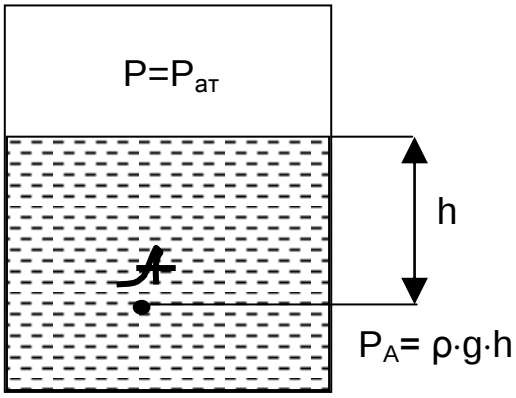


Рис. 2. Давление частицы жидкости, налитой в открытый сосуд

Пружинные манометры или мановакуумметры, чувствительным элементом которых является трубка Бурдона полая пружина, используют явление ее распрямления под действием давления, создаваемого в трубке или вне её. Они наиболее распространены в технике, перекрывают весь диапазон практически необходимых давлений, но требуют периодической проверки правильности показаний.

Жидкостные манометры используют явление уравновешивания измеряемого давления давлением столба жидкости в мерной трубке. Они предельно просты и могут быть изготовлены самостоятельно в любых условиях, отличаются точностью показаний и не требуют тарировок и проверок. Их недостаток - ограниченный диапазон измерений.

Быстропеременные давления измеряются специальными измерительными комплексами, включающими датчики давлений, самописцы и, при необходимости, согласующие приборы. Датчики давлений преобразуют измеряемое давление в электрический сигнал, который регистрируется самописцем. Для работы с такими измерительными комплексами необходимо освоить методику тарировок и расшифровок записей.

Для тарировки на применяемом измерительном комплексе записывают 2-10 показаний давления известного уровня и строят тарировочный график давлений в функции от уровня записи сигнала. В процессе расшифровок любой уровень записи сигнала переводят в давление, пользуясь тарировочным графиком.

В нашей работе в качестве измерительного комплекса (рис. 3) для измерения быстропеременных давлений используются датчики давления (2), усилитель (5) и осциллограф (1) со светочувствительной бумагой. Изменение давления преобразуется в перемещение светового луча гальванометра (6) на экране и в прорези кассеты со светочувствительной бумагой, причем перемещение луча происходит в направлении, поперечном относительно направления протяжки бумаги. В результате на светочувствительной бумаге регистрируется запись переменного давления в функции времени (осциллограмма).

На этой же осцилограмме записываются тарировочные уровни сигнала, позволяющие расшифровать запись. Все результаты лабораторных измерений подвергаются статистической обработке [2]. Её целью является отсеивание недостоверных результатов, определение средних величин и ошибок измерений, а также других более сложных статистических показателей - доверительного интервала $\Im_\beta$, соответствующего доверительной вероятности β, который накрывает истинное значение параметра $\overline{P}$, корреляционных связей параметров.

Формулы статистической обработки измерений:

1. Исходный ряд значений параметра:

$P_1; P_2; P_3; P_i \ldots P_{n-1}; P_n$ всего n значений параметра,

2. Среднее значение параметра:

$$\overline{P} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_1}{n}. \qquad (1.1)$$

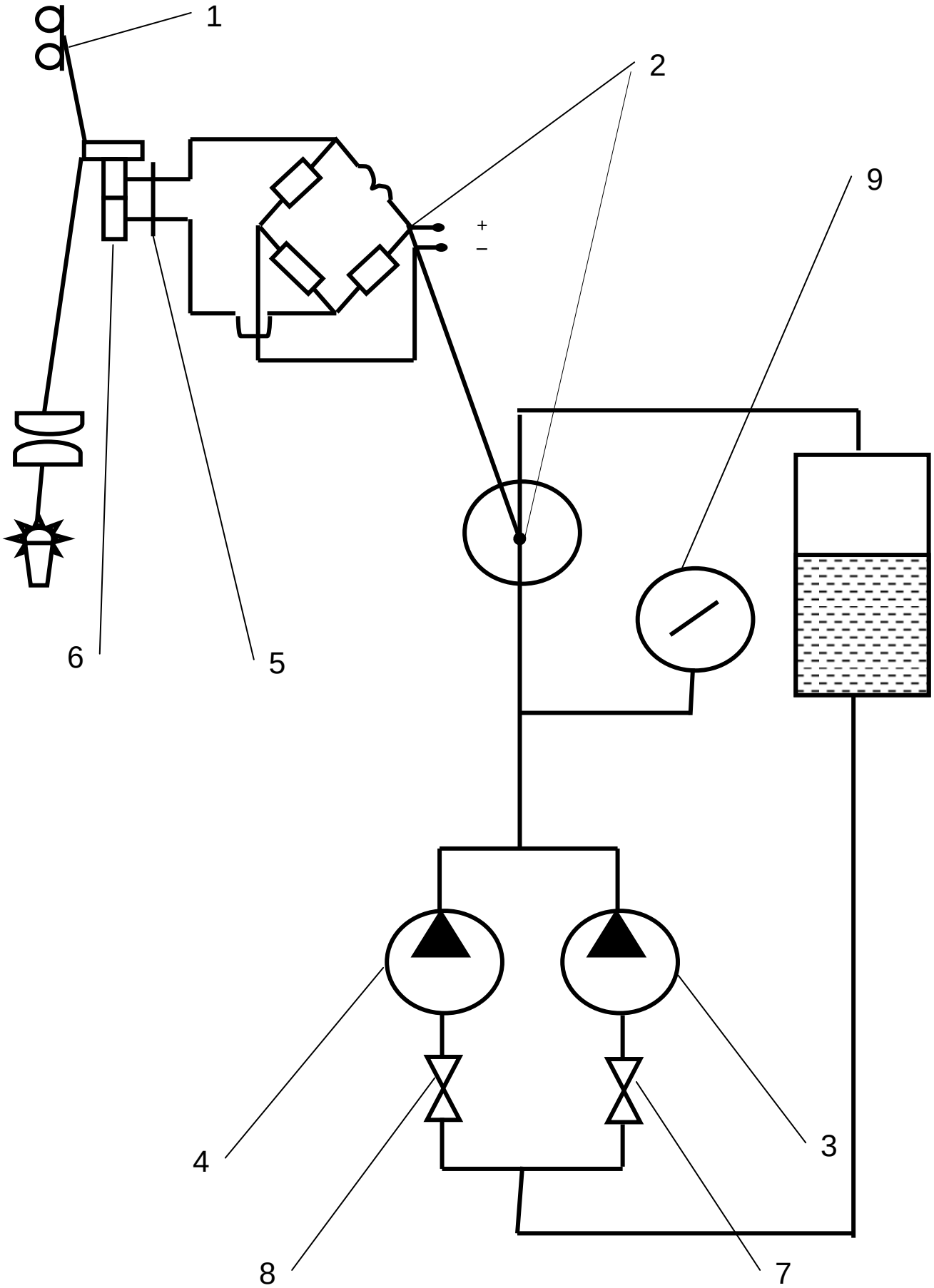


Рис. 3. Схема лабораторной установки измерения быстропеременных давлений

3. Среднее квадратичное отклонение (среднее отклонение произвольно взятого значения параметра от среднего):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_1 - \overline{P})^2}{n}}. \qquad (1.2)$$

4. Доверительный интервал

$$\Im_\beta = (\overline{P} \pm t_\beta \cdot \sigma); \qquad (1.3)$$

где t_β- число средних квадратичных отклонений, которые нужно отложить в одну и другую стороны от среднего значения для того, чтобы вероятность попадания среднего значения параметра в полученный интервал была равна β.

При нормальном распределении значения t_β равны

β=0,9; t_β = 1,643

β=0,95; t_β = 1,960

β=0,99; t_β = 2,576

В технических расчетах рекомендуется принимать β = 0,95.

Описание лабораторной установки для измерения быстропеременных давлений

Схема лабораторной установки представлена на рис. 3. Она включает насосы (3) и (4), вентили питания водой (7) и (8), мембранный датчик давления (2), тензометрический усилитель (5), осциллограф (1) с гальванометром (6), образцовый манометр (9).

В данной работе для измерения быстропеременных давлений используется измерительный комплекс, состоящий из датчика давления, тензометрического усилителя УТ-4, светолучевого осциллографа НО44. Мембранный датчик давления преобразует измеряемое давление в электрический сигнал малой величины, который увеличивается в тензометрическом усилителе. Сигнал с усилителя поступает в осциллограф со светочувствительной бумагой. Измерение

давления на исследуемом участке магистрали преобразуется в перемещение луча на экране осциллографа, в щели светочувствительной кассеты, причем перемещения луча происходят в направлении поперечном относительно направления протяжки бумаги (рис. 4). В результате на светочувствительной бумаге изображается осциллограмма записи переменного давления в функции времени. На этой же осциллограмме записываются тарировочные уровни сигнала, позволяющие расшифровать запись.

Последовательность выполнения работы

1. Включить в электрическую сеть приборы измерительного тракта.

2. Произвести запись на осциллограмме нулевого уровня сигнала (линия 1, рис.4).

3. Открыть вентиль (7).

4. При открытом вентиле (7) включить насос (3) и выполнить следующие операции.

4.1 Произвести запись на осциллограмме уровня сигнала (линия 2, рис.4).

4.2 Снять показания с образцового манометра 9 и занести в таблицу.

5. Открыть вентиль (8).

6. При открытых вентилях (7),(8) и работающем насосе (3), включить насос (4) и произвести запись сигнала на осциллограмме (линия 3, рис. 4).

7. Проявить осциллографную бумагу.

8. Расшифровать записи на осциллограмме в следующей последовательности.

8.1 Определить тарировочный коэффициент по формуле.

$$m = \frac{P_2 - P_1}{H}; \qquad (1.4)$$

где m, P, H – выбираются из табл. 1.1.

8.2 Снять пять показаний (h) исследуемого сигнала и занести в

табл. 1.1.

8.3 Перевести измеряемое давление, выраженное перемещение луча на осциллограмме и представленное в таблице в виде дискретного числового ряда в давление, измеряемое в **кгс/см^2**, используя тарировочный коэффициент по формуле

$$P = m \cdot h. \qquad (1.5)$$

8.4 Обработать результаты измерений на ПЭВМ и заполнить табл. 1.1.

Результаты измерений Таблица 1.1

Параметр		Единицы измерения	Способ определения	Результаты измерений					Результаты статистической обработки	
				1	2	3	4	5	M	σ
Показания образцового манометра	Давление до включения насоса P_1	кгс/см^2	измерение							
	Давление P_2 после включения насоса	кгс/см^2	измерение							
Давление, выраженное в перемещении луча на осциллограмме H		см	измерение							
Тарировочный коэффициент, m		кгс/см^2	$m = \frac{P_1 - P_2}{H}$							
Давление, выраженное в перемещении луча на осциллограмме, h		см	измерение							
Измеряемое давление, P		кгс/см^2	P=m·h							

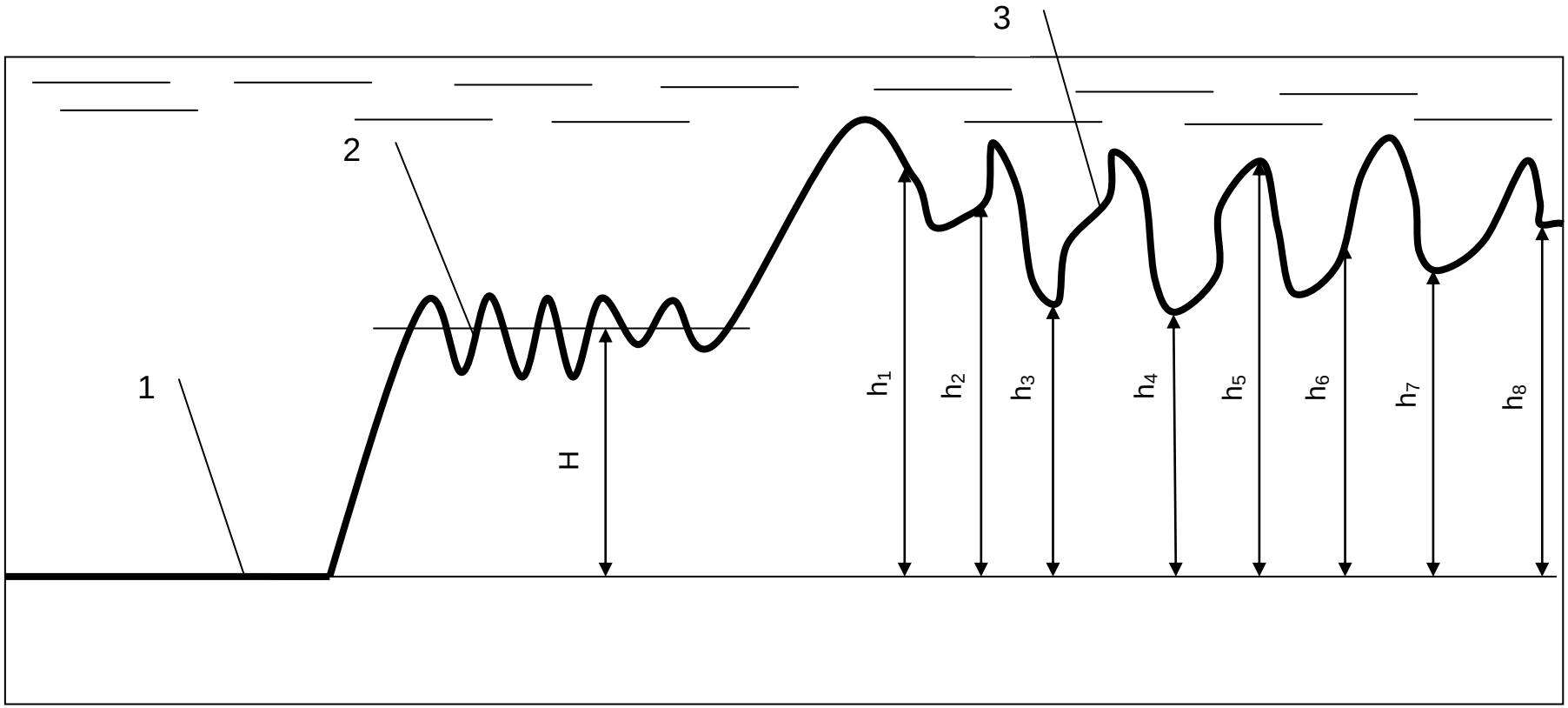


Рис. 4. Схема записи быстропеременных давлений на осциллограмме:
1 – насосы выключены; 2 – включен один насос; 3 – включены два насоса

Описание лабораторной установки измерения медленно меняющихся давлений

Схема лабораторной установки представлена на рис.5. Она включает вентиль (1) питания водой от водопровода, сливной вентиль (9), вентиль жидкостною манометре (6), вентиль (5) соединяющий резервуар (3) с атмосферной, жидкостного манометра (8) с измерительной шкалой (7), манометр (2) и мановакуометр (4).

Последовательность выполнения работы

При подготовке установки (рис.5) измерения медленно меняющихся давлений к пуску необходимо убедиться в том, что резервуар установки не заполнен жидкостью. Затем произвести измерение медленноменяющихся давлений и тарировку измерительных приборов.

1. Тарировка механического манометра жидкостным.

1.1 Перекрыть вентили (6),(9).

1.2 Открыть вентиль (5).

1.3 Открыть вентиль (1) и заполнись резервуар установки жидкостью на произвольную высоту h= 0,8÷1,3 м и вентиль (1) закрыть.

1.4 При закрытом вентиле (1) выполнить пять измерений давления жидкостным и механическими манометрами (2).

1.5 Результаты измерений внести в табл. 1.2.

2. Тарировка манометрической части мановакуометра .

2.1 Перекрыть вентили (5),(6), и (9).

2.2 Открыть вентиль (1) и заполнить резервуар установки жидкостью на высоту h = 0,8 ÷1,3 м и вентиль (1) закрыть.

2.3 При закрытом вентиле (1) выполнить пять измерений давления жидкостным и механическим манометрами.

2.4 Результаты измерений занести в табл. 1.2.

2.5 Обработать результаты на ПЭВМ и заполнить табл. 1.2. Обозначения: M - математическое ожидание параметра; σ - среднее квадратичное отклонение

значений параметра.

3.Тарировка вакуумметрической части мановакуумметра.

3.1 Перекрыть вентиль (9).

3.2 Открыть вентили (5) и (6).

3.3 Открыть вентиль (1) и заполнить резервуар установки жидкостью на высоту h =0,8 ÷1,3 м и вентиль (1) закрыть.

3.4. Вентиль (5) закрыть.

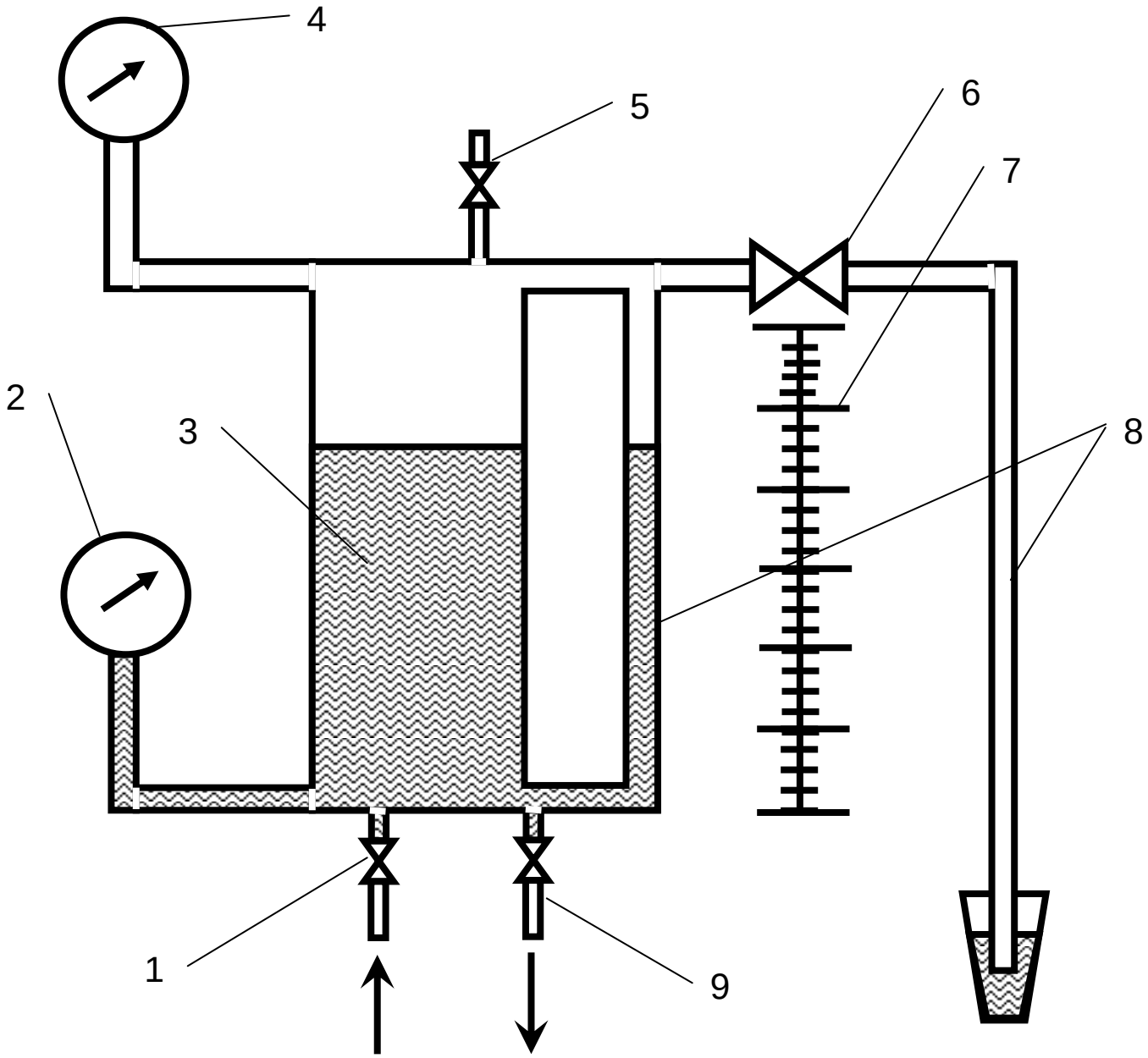


Рис. 5. Схема лабораторной установки измерения медленноменяющихся давлений

3.6 При открытом вентиле (9) выполнить (5) измерений давления жидко-

стным (8) и механическим мановакуумметром (4).

3.7 Результаты измерений занести в табл. 1.3.

3.8 Обработать результаты на ПЭВМ и заполнить табл. 1.3., 1.4.

Результаты измерений Таблица 1.2

Параметр	Единицы измерения	Результаты измерений					Результаты статистической обработки	
		1	2	3	4	5	M	σ
Высота столба жидкости в водомерной трубке, H	м							
Давление по механическому манометру, $P_м$	кгс/см^2							
Расчетная величина давления, $P_р$	кгс/см^2							
Поправка механическому манометру ΔP_1, $\Delta P_1 = P_р - P_м$	кгс/см^2							

Результаты измерений Таблица 1.3

Параметр	Единицы измерения	Способ определения	Результаты измерений					Результаты статистической обработки	
			1	2	3	4	5	M	σ
Высота столба жидкости в водомерной трубке, H	м	измерение							
Давление по механическому манометру (2) , $P_{М\ изм}$	кгс/см^2	измерение							
Давление по механическому манометру (4) , $P_{Мв\ изм}$	кгс/см^2	измерение							

Продолжение таблицы 1.3

Расчетная величина давления , $P_{Мв\ расч}$	кгс/см^2	$P_{Мвврас} = (P_{Мизм} + \Delta P_1) - H \cdot \rho \cdot g$							
Поправка механическому манова-кууметру, ΔP_2	кгс/см^2	$\Delta P_2 = \overline{P}м_{Врасч} - \overline{P}м_{Визм}$							

Результаты измерений Таблица 1.4

Параметр	Единицы измерения	Результаты измерений					Результаты статистической обработки	
		1	2	3	4	5	M	σ
Высота столба жидкости в водомерной трубке, H	м							
Давление по механическому манометру, $P_{мв}$	мм.рт.ст.							
Расчетная величина давления, $P_р$	мм.рт.ст.							
Поправка механическому манометру ΔP_1, $\Delta P_3 = P_р - P_м$	мм.рт.ст.							

Контрольные вопросы

1. Какое давление (абсолютное или избыточное) показывает механический (жидкостной) манометр?

2. Как перевести показания манометра в международную систему единиц (СИ)?

3. Для чего используется измерительный комплекс с осциллографированным изменением параметров?

4. Что представлено на осциллограмме записи давления?

5. Для чего выполняется статистическая обработка результатов измерений.

Литература

1. Байков, О.В. Лабораторный курс гидравлики и насосов / О.В. Байков и др. – М: Госэнергоиздат, 1961 -248 с.

2. Статистическая обработка экспериментальных данных: Методические указания по выполнению лабораторной работы. – ОФМИП, 1992. – 20 с.

3. Физический энциклопедический словарь / Под ред.-цией А.М.Прохорова.– М.: Советская энциклопедия, 1983.– 928 с.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Трубопроводы разделяются на короткие и длинные, простые и сложные. В коротких трубопроводах рассчитывают два вида потерь: по длине и местные. Потери определяются суммой сопротивлений:

$$h_п = h_{тр} + \sum h_{мс}.$$

Длинными называются трубопроводы, в которых потери напора по длине являются основными. Местные потери в трубопроводах обоих типов составляют 5...10 % от распределенных:

$$h_п = 1{,}1 \cdot h_{тр}.$$

Простые трубопроводы не имеют ответвлений, но могут иметь постоянный или переменный диаметр труб.

Сложные трубопроводы делятся на разветвленные и кольцевые, или замкнутые.

Расход жидкости Q рассчитывается по уравнению:

$$Q=W \cdot S,$$

где W – скорость движения жидкости;

S – площадь поперечного сечения труб.

Диаметр трубопроводов должен выбираться на базе технико-

экономического сравнения ряда вариантов, учитывающих все факторы, которые влияют на стоимость сооружения (стоимости трубопроводов и насосной установки, а также эксплуатационные расходы).

Экономичный диаметр трубопровода тот, при котором общая стоимость всей водопроводной системы и эксплуатации будет наименьшей.

Для того чтобы иметь возможность сопоставить единовременные затраты с ежегодными, пользуются понятиями окупаемости капитальных вложений в определённые сроки.

При расчете трубопроводов решают задачи: расчет расхода жидкости через трубопровод заданных размеров; расчет величины гидравлического напора при заданном расходе жидкости; определение диаметра трубопровода при заданных расходе и напоре.

При расчетах простого трубопровода задают перепад давлений на нем и принимают условие, что расход жидкости через него устанавливается таким, при котором сумма всех гидравлических сопротивлений компенсируется располагаемым перепадом давлений. По этим данным находится расход жидкости.

Все формулы для расчетов трубопроводов выводятся из уравнения Бернулли и граничных условий на концах трубопровода, определяющихся его схемой.

Сложный разветвленный трубопровод рассчитывается в форме решения уравнений баланса: расходов, перепадов давлений и гидравлических сопротивлений по ветвям трубопровода.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТРЕНИЯ (ПО ДЛИНЕ).

Цель работы: повышение уровня знаний о гидравлических сопротивлениях при движении жидкости по трубам, приобретение навыков их самостоятельного определения.

Задачи работы:

1. Закрепить сведения о видах гидравлических сопротивлений и способах их определения.

2. Измерить сопротивление трения движению жидкости по трубе.

3. Проанализировать причины различий экспериментальных и расчетных данных.

Теоретические основы работы

Существует два вида потерь гидравлического напора при движении жидкости: потери на трение при движении по прямым участкам трубопроводов и потери на вихреобразование при каждом изменении конфигурации проходного сечения. Первые из них называют потерями на трение ($\Delta P_т$), а вторые - потерями на местных сопротивлениях ($\Delta P_м$), т.е.

$$\Delta P = \Delta P_т + \Delta P_м. \qquad (2.1)$$

Потери гидравлического напора, связанные с распределенными по длине трубопровода потерями на трение, рассчитывают по формуле Дарси-Вейсбаха, так же как часть гидродинамического напора движущегося потока.

$$\Delta P_T = \lambda \frac{\ell}{d} \cdot \frac{\alpha \cdot \rho \cdot \upsilon^2}{2}, \qquad (2.2)$$

где λ - коэффициент гидравлического сопротивления трения,

ℓ, d - длина и диаметр трубопровода;

α - коэффициент Кориолиса. При Re < 2320 берется $\alpha \approx 2$.

ρ - плотность жидкости, кг/м^3;

υ - скорость движения жидкости по трубопроводу.

Коэффициент гидравлического сопротивления определяется двумя факторами - значением числа Рейнольдса и шероховатостью поверхности трубопровода. В связи с изменением характера течения при изменении критерия Рейнольдса изменяются также и зависимости для расчета коэффициентов гидравлического сопротивления. Каждая из расчетных зависимостей применима лишь в соответствующей области значения критерия Рейнольдса. На практике пользуются несколькими записями расчетных формул, наиболее распространенные из которых сведены
в табл. 2.1.

Формулы для расчета коэффициента гидравлического сопротивления Таблица 2.1

Формула	Область применимости по критерию Рейнольдса	Область применимости по общей характеристики
$\lambda=64/Re$	$Re<2320$	Для всех труб при ламинарном режиме течения
Формула Плевако $\lambda=0{,}029\div0{,}775(Re-2320)10^{-5}$	$2320<Re<4500$	Для всех труб при переходном режиме течения
Формула Блазиуса $\lambda=0{,}31/Re^{0{,}25}$	$4500<Re<40\cdot d/\Delta$	Для всех гладких труб
Формула Мурина $\lambda=(2\cdot\lg\frac{d}{\Delta}+1{,}14)^{-2}$	$Re>500\cdot d/\Delta$	Для всех шероховатых труб при развитом турбулентном режиме течения

Используемые в расчетах величины шероховатости труб, изготовленных из различных материалов, представлены в табл. 2.2.

Средние величины шероховатости труб Таблица 2.2.

Материал и способ изготовления трубы	Состояние трубы	Шероховатости Δ, мм
Тянутые из стекла и цветных металлов	Новые и технически гладкие	0,001–0,002
	Новые и чистые	0,01–0,02
	После нескольких лет эксплуатации	0,15–0,3
	Умеренно ржавые	0,30–0,70
Бетонные	Новые	0,15–0,30

Описание лабораторной установки

Схема блока лабораторной установки представлена на рис. 6. Она состоит из расходного (1) и сливного (7) кранов, жидкостных манометров (2) и (3 - сумма статического и скоростного напоров), экспериментального участка трубопровода для изучения сопротивлений трения (4) и местных сопротивлений (5), счетчика воды (6).

При открытии кранов (1) и (7) вода проходит через установку и попадает в емкость для слива. Расход воды измеряется счетчиком, а сопротивление трения трубопровода и местные сопротивления - разностью уровней (h) по показаниям манометров (2) и (3).

Последовательность выполнения работы

При работе установки вода насосом подается в исследуемый трубопровод (4), внутренний диаметр которого d=7,5 - 8 мм. Длина трубопровода равна 832 мм, это исключает возможность влияния различных местных особенностей (нарушение формы, размеров).

Перед началом работы необходимо ознакомиться с данным методическим указанием и проверить исправность установки.

1. Открыть кран слива (7) и, открывая кран (1), установить максимальное значение расхода жидкости по показанию счетчика воды (6).

2. Записать, в протокол испытаний реализованные значения расхода воды Q и высоту столба жидкости h_1 и h_2 по манометрам 2.

3. Закрыть кран (1).

4. Выполнить работы по п.п. 1-3 последовательно для пяти значений расхода в области ламинарного течения и пяти значений расхода в области турбулентного течения. Показания манометров и счетчика воды записать в протокол испытаний соответственно для ламинарного и турбулентного режимов течения.

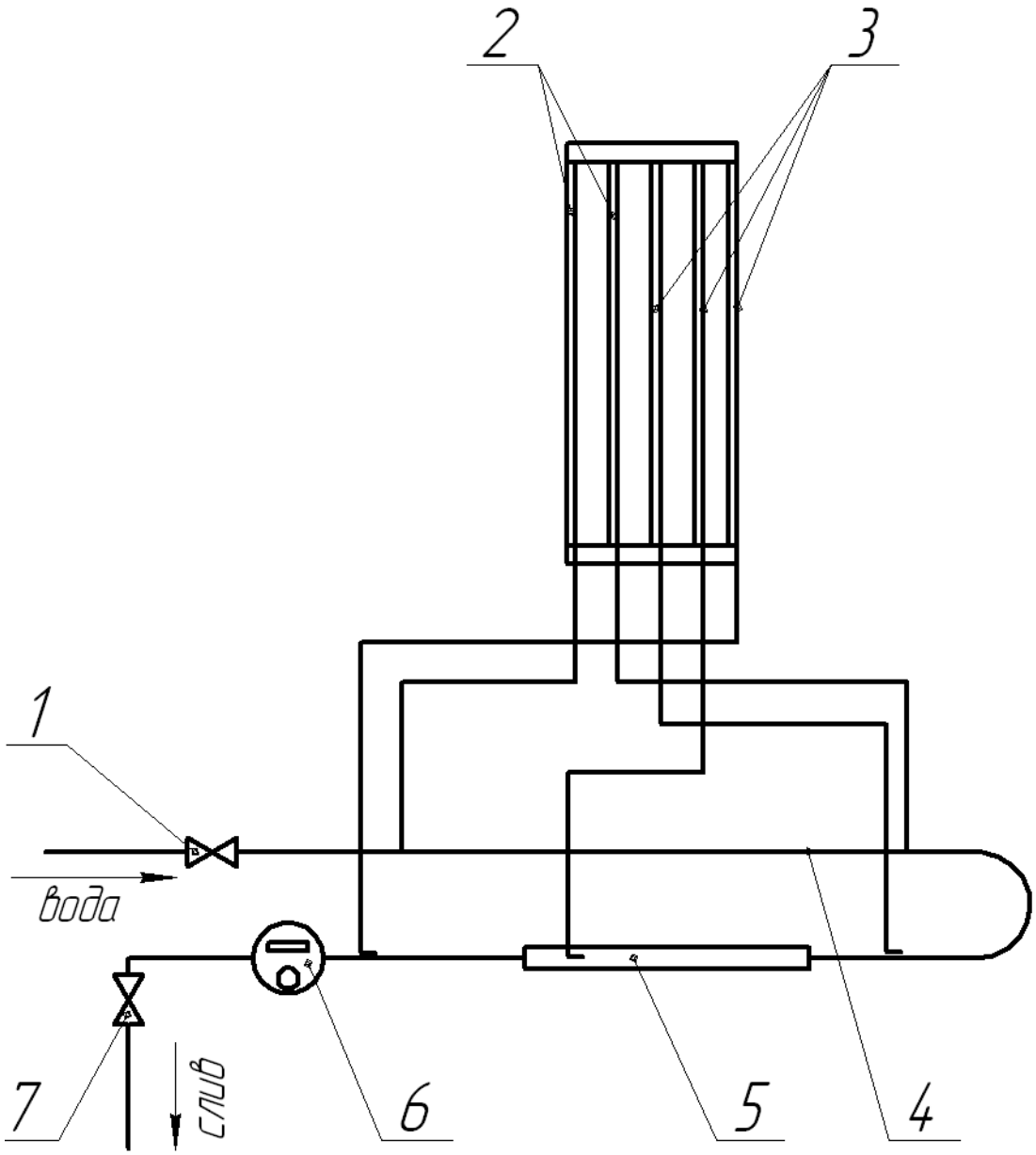


Рис. 6. Схема экспериментальной установки

5. Вычислить экспериментальные значения коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda_э$ по экспериментальным данным для всех реализованных значений параметров (реализовать ламинарный и турбулентный режимы течения жидкости).

Использовать для этого формулы:

$$\lambda_э = \frac{\Delta h}{\frac{\ell}{d} \cdot \alpha \cdot \frac{\upsilon^2}{2g}} = \frac{h_1 - h_2}{\alpha \cdot \upsilon^2} \cdot \frac{2g \cdot d}{\ell}; \qquad (2.3)$$

$$\upsilon = \frac{4Q}{\pi \cdot d^2}. \qquad (2.4)$$

6. Вычислить расчетные значения коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda_р$ по формулам

$$\lambda_р = 0{,}32 / \mathrm{Re}^{0{,}25}; \qquad \text{при } 2320 < \mathrm{Re} < 2 \cdot 10^5; \qquad (2.5)$$

$$\lambda_р = 64 / \mathrm{Re}; \qquad \text{при } \mathrm{Re} < 2320; \qquad (2.6)$$

$$\mathrm{Re} = \frac{\upsilon \cdot d}{\nu}, \qquad (2.7)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости (по графику) рис. 7.

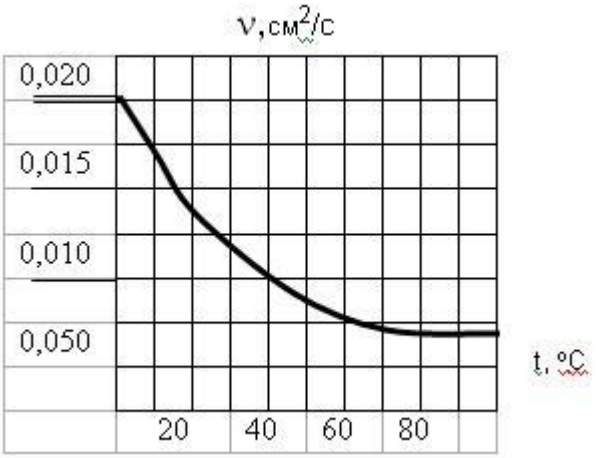


Рис. 7. Зависимость кинематической вязкости воды от температуры

7. Занести все результаты оценок в табл. 2.3.

Результаты измерений Таблица 2.3

Параметр		Единицы измерения	Способ определения	Результаты измерений									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Объем, V		$м^3$	измерение										
Время, t		с	измерение										
Расход воды, Q		$м^3/с$	$Q = \frac{V}{t}$										
Показания пьезометров	h_1	мм.вод.ст	измерение										
	h_2	мм.вод.ст	измерение										
Потери напора, Δh		мм.вод.ст	$\Delta h = h_2 - h_1$										
Скорость течения,		м/с	$\upsilon = \frac{4Q}{\pi \cdot d^2}$										
Коэффициент гидравлического сопротивления (экспериментальный), $\lambda_э$		б/р	$\lambda_э = \frac{\Delta h}{\frac{\ell}{d} \cdot \alpha \cdot \frac{\upsilon^2}{2g}}$										
Критерий Рейнольдса		б/р	$\mathrm{Re} = \frac{\upsilon \cdot d}{\nu}$										
Коэффициент гидравлического сопротивления (расчетный), $\lambda_р$		б/р	$\lambda_p = 0{,}32 / \mathrm{Re}^{0{,}25}$; $\lambda_p = 64 / \mathrm{Re}$										

8. Сравнить экспериментальные и расчетные значения коэффициентов трения $\lambda_э$ и λ_p (по средним значениям для ламинарного и турбулентного режимов течения жидкости).

Вопросы для контроля

1. Чем различаются местные и распределенные по длине трубопровода сопротивления?

2. Какие виды течения жидкости различают?

3. Какие величины входят в критерий Рейнольдса и в чем заключается его физический смыл?

4. Каков физический смысл коэффициентов сопротивления?

Литература

1. Башта, Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных ВУЗов /Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Е. Некрасов и др. - 2-е изд., переработанное. –М: Машиностроение, 1982.–423 с.

2. Идельчик И.Б. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. - М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕСТНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ.

Цель работы: повышение уровня знаний о гидравлических сопротивлениях при движении жидкости по трубам, приобретение навыков их самостоятельного определения.

Задачи работы:

1. Закрепить сведения о видах гидравлических сопротивлений и способах их определения.

2. Измерить местное сопротивление в трубе.

3. Проанализировать причины различий экспериментальных и расчетных данных.

Теоретические основы работы

Существует два вида потерь гидравлического напора при движении жидкости: потери на трение при движении по прямым участкам трубопроводов и потери на вихреобразование при каждом изменении конфигурации проходного сечения. Первые из них называют потерями на трение ($\Delta P_т$), а вторые - потерями на местных сопротивлениях ($\Delta P_м$), т.е.

$$\Delta P = \Delta P_т + \Delta P_м. \qquad (2.8)$$

Потери на местных сопротивлениях определяются формулой Вейсбаха, как часть динамического напора потока (н/м^2) перед сопротивлением:

$$\Delta P_м = \xi \cdot \rho \cdot \frac{\upsilon^2}{2}, \qquad (2.9)$$

где ρ - плотность жидкости, кг/м^3;

υ^2 - скорость движения жидкости по трубопроводу перед местным сопротивлением, м/с;

ξ – коэффициент местного сопротивления.

Коэффициент местного сопротивления (ξ) зависит от критерия Рейнольдса (Re) и от конфигурации проходного сечения в устройстве, являющимся местным сопротивлением:

$$\mathrm{Re} = \frac{\upsilon \cdot d}{\nu}, \qquad (2.10)$$

где d - диаметр трубы (м) или другой характерный размер устройства;

ν - кинематическая вязкость жидкости, $м^2/с$.

Кинематическая вязкость жидкости зависит от температуры. Зависимость вязкости от температуры представлена на графике рис. 8. Зависимость коэффициента местного сопротивления от критерия Рейнольдса имеет место лишь при малых скоростях потока, соответствующих значениям критерия Рейнольдса Re<500. При практике местные сопротивления обычно работают при более высоких значениях критерия Рейнольдса.

В этой области коэффициенты сопротивления остаются постоянными. Поэтому данная область (область Re > 500) называется областью автомодельности по критерию Re. В ней местные сопротивления зависят только от конфигурации проходного сечения устройства, определяющего это сопротивление. Это позволяет составить справочные таблицы по гидравлическим сопротивлениям основных используемых в технике устройств

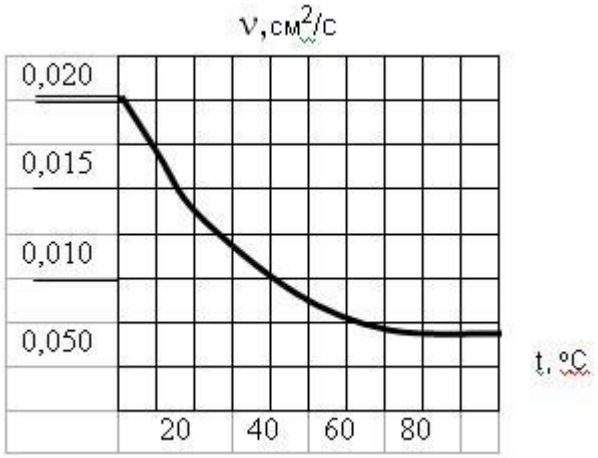


Рис.8. Зависимость кинематической вязкости воды от температуры

Описание лабораторной установки

Схема блока лабораторной установки представлена на рис. 9. Она состоит из расходного (1) и сливного (7) кранов, жидкостных манометров (2) и (3), экспериментального участка трубопровода для изучения сопротивлений трения (4) и местных сопротивлений (5), счетчика воды (6).

При открытии кранов (1) и (7) вода проходит через установку и попадает в емкость для слива. Расход воды измеряется счетчиком, а сопротивление трения трубопровода и местные сопротивления - разностью уровней (h) по показаниям манометров (3), регистрирующих сумму статического и скоростного напоров .

Последовательность выполнения работы

При работе установки вода насосом подается в исследуемый трубопровод (5) переменного сечения (d_1=8 мм; d_2=16 мм). Такая конфигурация трубопровода приводит к образованию местных сопротивлений. Расход, пройденной через трубопровод жидкости, определяется показанием счетчика (6).

Перед началом работы необходимо ознакомиться с данным методическим указанием и проверить исправность установки. Для этого:

1. Открыть кран слива (7) и, открывая кран (1), установить такое значение расхода жидкости (6), при котором образуется турбулентный режим движения.

При ламинарном режиме движения жидкости местные сопротивления играют малую роль, по сравнению с сопротивлениями трения, и ими можно пренебречь.

2. Расход жидкости определить по показанию счетчика (6) и записать соответствующие измерения в протокол испытаний.

3. Закрыть кран (1).

4. Выполнить работы по п.п. 1-3 последовательно для пяти значений рас-

хода в области турбулентного течения. Показания манометров (3) и счетчика воды (6) записать в протокол испытаний.

5. Вычислить экспериментальные значения коэффициента местного сопротивления $\xi_э$ в области внезапного сужения и внезапного расширения трубопровода по формулам:

$$\xi_э = \frac{2gh_м}{\upsilon^2}; \qquad (2.11)$$

где υ – значение скорости течения жидкости;

для области внезапного расширения: $\upsilon_1 = \frac{4Q}{\pi d_1^{\,2}}$;

для области внезапного сужения: $\upsilon_2 = \frac{4Q}{\pi d_2^{\,2}}$;

6. Вычислить расчетные значения коэффициента местного сопротивления ξ_p в области внезапного расширения и внезапного сужения трубопровода по формулам:

$$\xi_{расш} = (1 - \frac{S_1}{S_2})^2; \qquad (2.12)$$

$$\xi_{суж} = (1 - \frac{S_2}{S_1})/2; \qquad (2.13)$$

где S_1 и S_2 – площади соответствующих сечений трубопровода.

7. Занести все результаты оценок в табл. 2.4.

8. Сравнить значения коэффициентов местных сопротивлений расчетных и экспериментальных. При наличии различий значений коэффициентов местных сопротивлений рекомендуется учитывать поправку – использовать в расчетах, например, эквивалентный диаметр (для кольцевого сечения трубопроводов) и др..

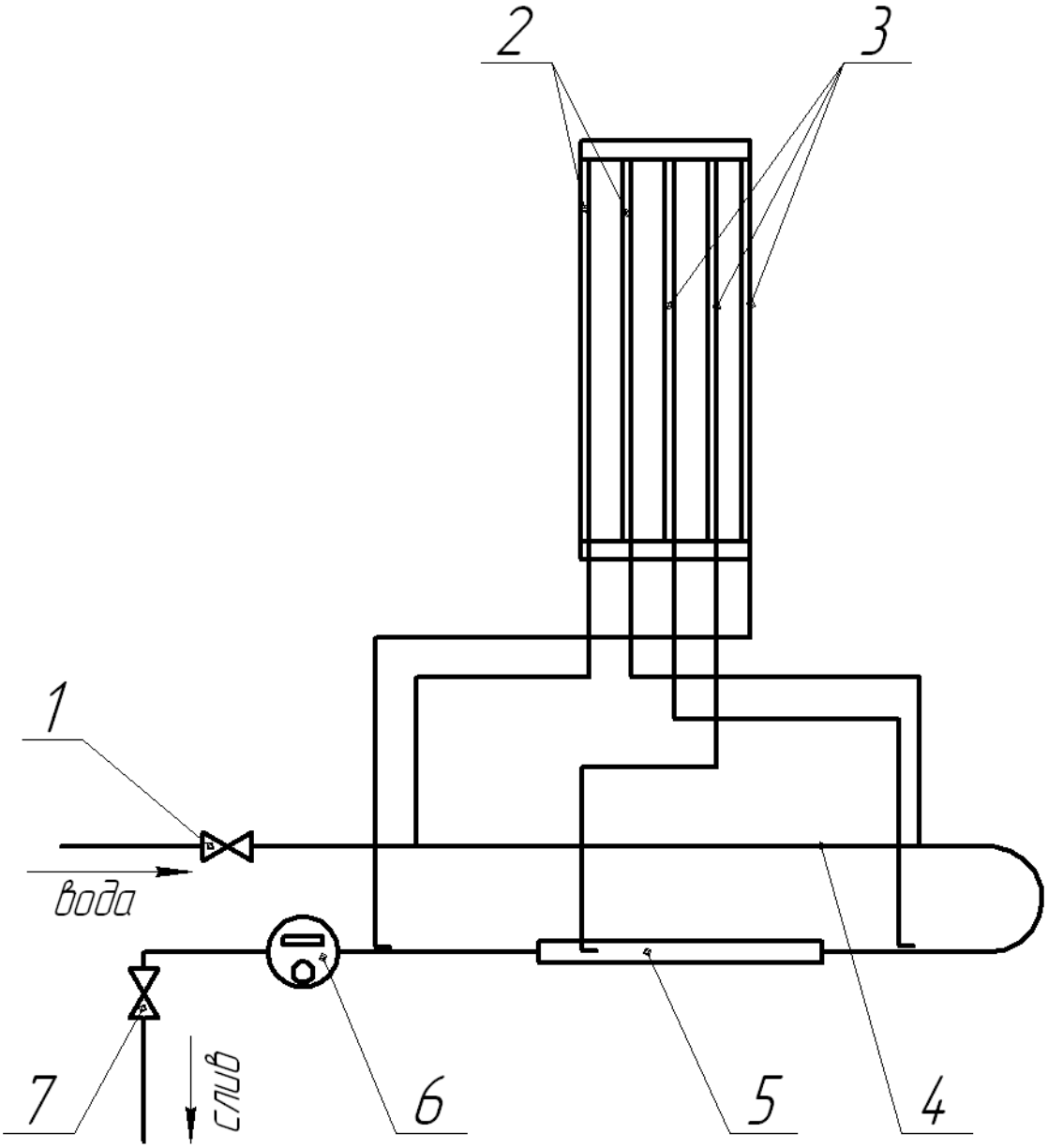

2
3
1
вода
7
слив
6
5
4

Рис. 9 Схема экспериментальной установки

Результаты измерений Таблица 2.4

Параметр	Единицы измерения		Способ определения	Результаты измерений				
				1	2	3	4	5
Объем, V	$м^3$		измерение					
Время, t	с		измерение					
Расход воды, Q	$м^3/с$		$Q = \frac{V}{t}$					
Показания трубок полного напора	h_1	мм.вод.ст	измерение					
	h_2	мм.вод.ст	измерение					
	h_3	мм.вод.ст	измерение					
Скорость течения, υ_i	м/с		$\upsilon_i = \frac{4Q}{\pi \cdot d_i^2}$					
Коэффициент местного сопротивления (экспериментальный), $\xi_{э\,суж}$	б/р		$\xi_{эсуж} = \frac{2gh_м}{\upsilon_2^{\ 2}}$					
Коэффициент местного сопротивления (экспериментальный), $\xi_{э\,расш}$	б/р		$\xi_{эрасш} = \frac{2gh_м}{\upsilon_1^{\ 2}}$					
Критерий Рейнольдса	б/р		$\mathrm{Re}\,i = \frac{\upsilon_i \cdot d_i}{\nu}$					

Коэффициент местного сопротивления, область сужения (расчетный), $\xi_{рсуж}$	б/р	$\xi_{рсуж} = (1 - \frac{S_2}{S_1}) / 2;$					
Коэффициент местного сопротивления, область расширения (расчетный), $\xi_{ррасш}$	б/р	$\xi_{ррасш} = (1 - \frac{S_1}{S_2})^2$					

Вопросы для контроля

1. Чем различаются местные и распределенные по длине трубопровода сопротивления?

2. Какие виды течения жидкости различают?

3. Какие величины входят в критерий Рейнольдса и в чем заключается его физический смыл?

4. Каков физический смысл коэффициентов сопротивления?

Литература

1. Башта, Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных ВУЗов /Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Е. Некрасов и др. - 2-е изд., переработанное. –М: Машиностроение, 1982.–423 с.

2. Идельчик И.Б. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. - М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.

3. Статистическая обработка экспериментальных данных: Методические указания по выполнению лабораторной работы. - Оф МИП, 1992. – 20 с.

3. КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА ЖИДКОСТИ

Движение жидкостей и газов характеризуется скоростями W и ускорениями а частиц в различных точках потока жидкости, а также давлением Р в этих точках.

Различают установившиеся и неустановившиеся движения жидкостей.

Установившимся называется движение, в котором скорость частиц, плотность, температура, давление и расход жидкости в каждой фиксированной точке пространства не изменяются во времени. Для установившегося движения можно записать:

$$W_x = f(x, y, z), \quad \partial W / \partial \tau = 0.$$

Пусть, например, жидкость движется в трубопроводе переменного сечения. Скорость жидкости при этом то увеличивается, то уменьшается в зависимости от места в трубопроводе, но в каждом фиксированном сечении она неизменна во времени. Такое движение называют стационарным. При неустановившемся или нестационарном движении все факторы изменяются во времени, т.е. скорость является не только функцией координаты, но и времени:

$$W_x = f(x, y, z, \tau), \quad \partial W / \partial \tau \neq 0.$$

Примером неустановившегося движения является истечение жидкости из резервуара при переменном ее уровне в резервуаре.

Неустановившиеся режимы течения реализуются главным образом в периодических процессах или возникают кратковременно при пусках, остановках, а также изменениях режима работы аппаратов непрерывного действия.

3.1 Режимы движения вязких жидкостей

Исследование механизма движения жидкости показало, что имеют место два резко отличающихся друг от друга режима движения.

Это различие подтверждено в 1883 году опытами английского физика О. Рейнольдса (рис.10). При малых скоростях струйка чернил (1) движется параллельно стенкам трубки (2). Этот режим движения называется ламинарным, или слоистым («ламина» с латинского означает слой).

При увеличении скорости движения жидкости линия тока струйки закручивается в виде вихря, а при еще большей скорости движение становится неупорядоченным, частицы движутся по хаотическим траекториям. Линии тока в трубке исчезают в беспорядке бурного турбулентного движения. Этот режим называется турбулентным (от латинского «турбулентус» – беспорядочный).

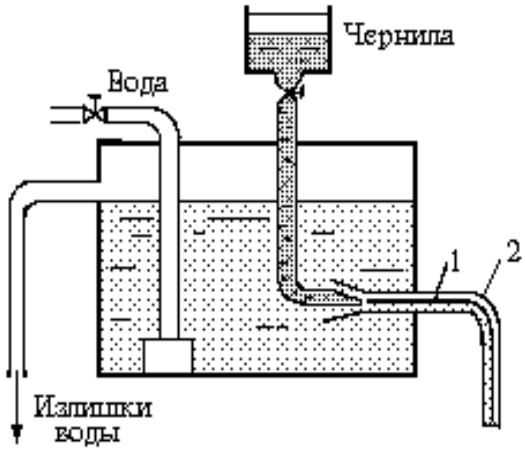


Рис. 10. Схема опыта Рейнольдса

Исходя из опытных данных и некоторых теоретических соображений О. Рейнольдс установил общие условия, при которых возможно существование того или иного режима и переход из одного режима в другой, а именно, что характер движения жидкости зависит от вязкости μ, скорости ее движения W, плотности жидкости ρ и диаметра трубки d.

Для характеристики режима движения введен безразмерный комплекс, учитывающий влияние перечисленных факторов. Этот комплекс впоследствии назван критерием Рейнольдса:

$$Re = W \cdot d\rho / \mu = W \cdot d / \nu, \qquad (3.1)$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости.

Границы существования того или иного режима определяются двумя критическими значениями критерия Рейнольдса: $Re_{кр,н}$ и $Re_{кр,в}$. При $Re \leq Re_{кр,н}$ всегда имеет место ламинарный режим; при $Re \geq Re_{кр,в}$ – режим устойчиво турбулентный. Для воды $Re_{кр,н} = 2320$ и $Re_{кр,в} = 10000$.

В диапазоне $Re_{кр,н} \leq Re \leq Re_{кр,в}$ режим движения жидкости чаще всего

турбулентный, однако он неустойчив. Поэтому этот режим называется переходным, хотя точнее этот диапазон значений критерия Рейнольдса следовало бы называть переходной зоной.

В критерий Рейнольдса входит величина d – это определяющий размер канала, по которому течёт жидкость.

Если труба не круглого сечения, то вводится понятие гидравлического радиуса $R_г$, который определяется по уравнению:

$$R_г = \frac{S}{P},$$

где S – площадь сечения потока;

P – смоченный периметр.

Смоченным периметром P называется линия контакта (соприкосновения) живого сечения потока жидкости со стенками, вдоль которых движется поток.

Для открытого канала (рис. 11):

$$R_г = B \cdot h / (2h + B).$$

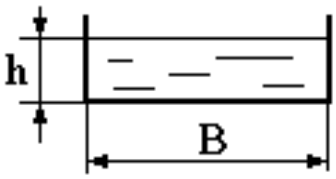


Рис. 11. Схема открытого канала

Для круглой трубы:

$$R_г = (\pi \cdot d^2/4) / (\pi \cdot d) = d/4.$$

В расчетах часто используют понятие эквивалентного диаметра:

$$d_{экв} = 4 \cdot R_г. \qquad (3.2)$$

Для двух сечений установившегося потока идеальной жидкости можно

записать:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{W_1^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{W_2^2}{2 \cdot g}. \qquad (3.3)$$

Рассмотрим геометрический смысл уравнения Бернулли (рис. 12) .

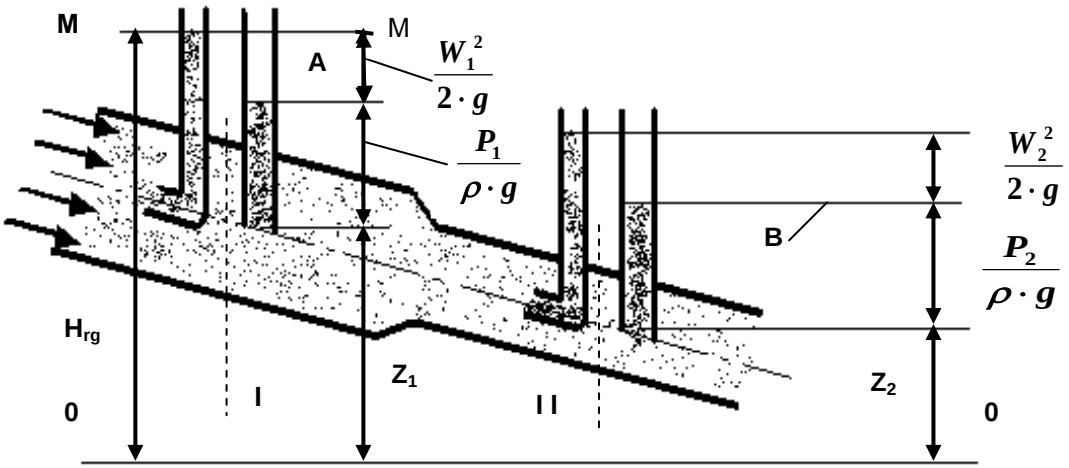


Рис. 12. Иллюстрация геометрического смысла уравнения Бернулли

Из уравнения (3.3) видно, что каждый из его членов имеет размерность длины. Величина Z представляет собой геометрическую высоту центра тяжести сечения рассматриваемой элементарной струйки над плоскостью сравнения. Она называется геометрической высотой или геометрическим напором.

Второе слагаемое $\frac{P}{\rho \cdot g}$ представляет собой высоту, показываемую пьезометром. Эта высота соответствует гидродинамическому давлению в центре тяжести сечения и называется пьезометрической высотой или пьезометрическим напором.

Из теоретической механики известно, что выражение $\frac{W^2}{2 \cdot g}$ определяет высоту, с которой должно упасть тело, чтобы в конце падения его скорость равнялась W. В гидравлике выражение $\frac{W^2}{2 \cdot g}$ называется скоростным или динамическим напором. Оно также имеет размерность длины.

Согласно уравнению (3.3) сумма $Z+\frac{P}{\rho\cdot g}+\frac{W^2}{2\cdot g}$ трех высот по всей длине элементарной струйки постоянна, поэтому вершины всех трех отрезков для любого сечения расположатся на одинаковых расстояниях от плоскости сравнения 0-0 или в одной горизонтальной плоскости ММ на высоте H_{rg} от плоскости сравнения.

Плоскость ММ называется напорной плоскостью; линия ММ – напорной линией. Линия АВ, соединяющая уровни в пьезометрах, называется пьезометрической линией.

Величина H_{rg} называется гидродинамическим напором.

Уравнение Бернулли является частным случаем закона сохранения энергии.

Геометрическая высота Z представляет собой удельную потенциальную энергию положения, высота $\frac{P}{\rho\cdot g}$ – удельную потенциальную энергию давления, и скоростной напор $\frac{W^2}{2\cdot g}$ равен кинетической энергии единицы веса жидкости, а $\frac{\rho\cdot W^2}{2}$ представляет кинетическую энергию единицы массы жидкости. Кинетическая энергия тела массой m равна $m\cdot W^2/2$, поэтому при G=1 имеем m=1/g. Тогда $mW^2/2= W^2/(2\cdot g)$.

Таким образом, в соответствии с уравнением Бернулли при установившемся движении идеальной жидкости сумма потенциальной и кинетической энергии для любого сечения струйки остается величиной постоянной по всей ее длине.

3.2 Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости

При движении реальных жидкостей начинают действовать силы внутреннего трения в потоке жидкости и силы трения о стенки трубы. На преодоление гидравлических сопротивлений расходуется часть энергии потока. Поэтому общее количество энергии потока по длине трубопровода будет уменьшаться

вследствие перехода потенциальной энергии в потерянную энергию, рассеиваемую в окружающую среду.

Потерянная энергия учитывается величиной потерянного гидравлического потока $h_п$. Поэтому для реальной жидкости уравнение Бернулли приобретает следующий вид:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{a_1 \cdot W_1^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{a_2 \cdot W_2^2}{2 \cdot g} + h_п, \qquad (3.4)$$

где $\frac{a_1 \cdot W_1^2}{2 \cdot g}$, $\frac{a_2 \cdot W_2^2}{2 \cdot g}$ – удельные кинетические энергии потока в первом и втором сечениях;

$\frac{P_1}{\rho \cdot g}$, $\frac{P_2}{\rho \cdot g}$ – удельные потенциальные энергии положения;

$h_п$ – потери гидравлического напора при переходе жидкости из сечения I в сечение II (8).

Коэффициенты a_1 и a_2, называемые коэффициентами Кориолиса или коэффициентами кинетической энергии, учитывают влияние неравномерности распределения скоростей движения слоев по поперечному сечению потока на его кинетическую энергию. Для ламинарного движения $a \cong 2$. Для турбулентного режима $a \cong 1{,}05 \div 1{,}1$.

Потери гидравлического напора $h_п$ возникают в следствие сил трения о стенки трубы и из-за локальной потери энергии потоком жидкости при преодолении местных сопротивлений (сужения, поворотов и т.д.). По законам термодинамики эта энергия рассеивается в окружающую среду.

3.3 Практические приложения уравнения Бернулли

3.3.1 Расходомер Вентури

В расходомере Вентури (рис. 13) искусственно создается перепад давления, измерив который можно рассчитать расход жидкости.

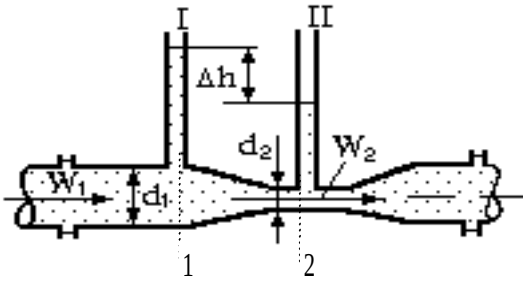


Рис. 13. Схема расходомера Вентури

Для реального потока жидкости с достаточной для большинства технических измерений и исследований точностью в уравнении Бернулли (3.4) величины a_1 и a_2 можно принять равными единице.

Для двух сечений горизонтального расходомера имеем:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{W_1^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{W_2^2}{2 \cdot g} + h_{п,1-2}. \qquad (3.5)$$

На участке трубки 1–2 потери гидравлического напора можно принять равными нулю $h_{п,1-2} = 0$. Тогда:

$$\frac{W_2^2 - W_1^2}{2 \cdot g} = \left(Z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g}\right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g}\right).$$

Величина $\left(Z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g}\right) = E_1$ представляет собой потенциальную энергию E_1 положения единичной массы жидкости и ее давления, аналогично $\left(Z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g}\right) = E_2$.

Разность потенциальных энергий жидкости в сечениях I и II равна $E_1 - E_2 = \Delta h$ и измеряется с помощью пьезометров (рис. 11).

Следовательно:

$$(W_2^2 - W_1^2)/(2 \cdot g) = \Delta h. \qquad (3.6)$$

В соответствии с законом сохранения массы имеем:

$$W_1 \cdot S_1 = W_2 \cdot S_2, \qquad (3.7)$$

где S_1, S_2 – площади поперечных сечений I и II трубки Вентури.

С учетом (3.7) получим:

$$W_1 = W_2 \cdot \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \qquad \text{или} \qquad W_2 = W_1 \cdot \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2. \tag{3.8}$$

Подставив (3.6) в (3.4), найдем**:**

$$W_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \Delta h}{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}} \qquad \text{или} \qquad W_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \Delta h}{\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4 - 1}}.$$

Расход жидкости равен Q:

$$Q = W_2 \cdot S_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}} \cdot \sqrt{\Delta h} = K_т \cdot \sqrt{\Delta h}, \tag{3.9}$$

где $K_т$ – постоянная расходомера Вентури:

$$K_т = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}}.$$

Выражение для расхода жидкости можно получить и так:

$$Q = W_1 \cdot S_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4 - 1}} \cdot \sqrt{\Delta h} = K_т \cdot \sqrt{\Delta h}, \tag{3.10}$$

где $K_т = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4 - 1}}.$

3.3.2 Расходомерная диафрагма

Более простым по сравнению с предыдущим является метод измерения расхода жидкости с помощью измерительной шайбы или диафрагмы (рис. 14). Расход жидкости определяется по уравнениям (3.9 и 3.10).

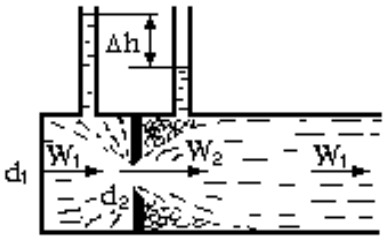


Рис. 14. Схема расходомерной диафрагмы

3.3.3. Трубка Пито - Прандтля

Простейшим прибором для измерения скорости движущейся жидкости или газа является трубка Пито - Прандтля. Конструкция ее представлена на рис. 15. Она состоит из трубок прямой (1) и согнутой под прямым углом (2).

Запишем уравнение Бернулли для сечений I и II.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{W_1^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{W_2^2}{2 \cdot g}, \qquad (3.11)$$

где P_1, P_2 – гидростатические давления жидкости в сечениях I и II,

g – ускорение свободного падения, м/с^2.

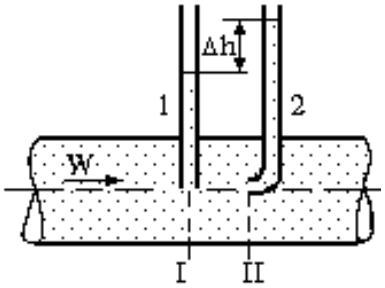


Рис. 15. Схема измерений, используемых в трубке Пито - Прандтля

В сечении II скорость жидкости или газа перед изогнутым концом трубки равна нулю $W_2 = 0$, т.к. здесь жидкость тормозится. Тогда из (3.11) получим:

$$\frac{W_1^2}{2 \cdot g} = \left(Z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} \right) - \left(Z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} \right) = E_2 - E_1,$$

где E_1, E_2 – потенциальные энергии жидкости в сечениях I и II.

Поскольку $E_2 - E_1 = \Delta h$, получим:

$$\frac{W_1^2}{2 \cdot g} = \Delta h, \qquad (3.12)$$

где Δh – разность высот в пьезометрических трубках.

Отсюда найдем скорость жидкости или газа W_1 в трубопроводе:

$$W_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}. \qquad (3.13)$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФОРМ ЭНЕРГИИ СТРУИ ЖИДКОСТИ

Цель работы: повышение уровня знаний о движении жидкости в трубопроводах, о преобразовании кинетической и потенциальной форм энергии в них.

Задачи работы:

1. Убедиться на опыте в переходе кинетической энергии потока в потенциальную и обратно.

2. Оценить полноту преобразования форм энергии и связанные с этим потерями на гидравлические сопротивления.

3. Вычислить параметры преобразования форм энергии на отдельных участках экспериментального трубопровода и сравнивать результаты с экспериментальными данными.

Теоретические основы работы

Для реальной жидкости, уравнение Бернулли имеет вид

$$\alpha \frac{\rho \cdot \upsilon^2}{2} + P + \rho \cdot h \cdot g + \Delta P_n = P^{\bullet} = const.$$

где ρ - плотность жидкости, кг/м^3;

υ - скорость движения жидкости, м/с;

P - статическое давление, Па;

h - нивелировочная высота жидкостной струи над уровнем её отсчета, м;

g - ускорение силы тяжести, м/с^2;

ΔP_n - потери давления, на рассматриваемом участке, Па;

α - коэффициент кинетической энергии (коэффициент Кориолиса), определяемый различиями средних по сечению местных скоростей течения жидкости;

P^* - полное давление.

Уравнение Бернулли называют также основным уравнением гидродинамики, его физический смысл следующий: «Статическое давление жидкости, текущей по трубе, больше там, где скорость движения жидкости меньше, и обратно: статическое давление меньше там, где скорость движения жидкости больше», и этот закон назван по имени швейцарского физика и математика Даниила Бернулли (1700-1782).

Часто уравнение Бернулли записывают в несколько измененном виде

$$\alpha \frac{\upsilon^2}{2g} + \frac{P}{\rho \cdot g} + h = H = const,$$

где $\alpha \frac{\upsilon^2}{2g}$ – скоростная высота столба жидкости, являющаяся мерой скоростного напора струи жидкости, м;

$\frac{P}{\rho \cdot g}$ – пьезометрическая высота столба жидкости в струе, характеризующая статическое давление, м;

h - нивелировочная высота струи над нулевым уровнем отсчета;

H - полная гидравлическая высота (полное давление в жидкости), м.

Это выражение читается так: "Полная гидравлическая высота столба жидкости, характеризующего его полное давление, складывается из суммы скоростной, статической и нивелировочной высоты и не изменяется при течении идеальной жидкости". Полная механическая энергия жидкости не исчезает, а лишь перераспределяется между указанными тремя составляющими. Если скоростной напор потока $\frac{\alpha \cdot \rho \cdot \upsilon^2}{2}$ перевести в статическое давление путем торможения струи, то давление в этом месте будет равно полному давлению равному

$$P^* = \alpha \frac{\rho \cdot \upsilon^2}{2} + P_o + \rho \cdot h \cdot g = const. \qquad (3.14)$$

В горизонтально расположенной трубе, во всех сечениях которой нивелировочная высота одинакова, она суммируется с константой в правой части уравнения (2.1). В этом случае разность полного и статического давлений равна динамическому напору, т.е.

$$P^* - P_o = \frac{\alpha \cdot \rho \cdot \upsilon^2}{2}. \qquad (3.15)$$

Все три составляющие полного давления равноправны в его создании. В частности, машины для повышения давления (насосы) могут увеличивать любую из этих составляющих.

Описание лабораторной установки

Принципиальная схема установки для иллюстрации уравнения Бернулли приведена на рис. 16. Основной элемент установки – это плоский трубопровод переменного сечения (2).

При работе установки вода из напорного резервуара поступает в наклон-

ный плоский трубопровод (2) переменного сечения и при открытом кране (4) попадает в емкость для слива. Расход жидкости считывают по показаниям счетчика для воды (3).

В пяти наиболее характерных сечениях трубопровода установлены по две измерительные трубки (1). Левые трубки являются трубками статического напора, правые – полного напора.

Последовательность выполнения работы

Перед началом работы необходимо ознакомиться с данными методическими указаниями и проверить исправность установки.

1. Открыть кран слива (4).

2. Установить расход жидкости, обеспечивающий максимальную разницу высоты столба жидкости между статическим и полным напорами.

3. Занести результаты измерений в протокол испытаний (табл. 3.1).

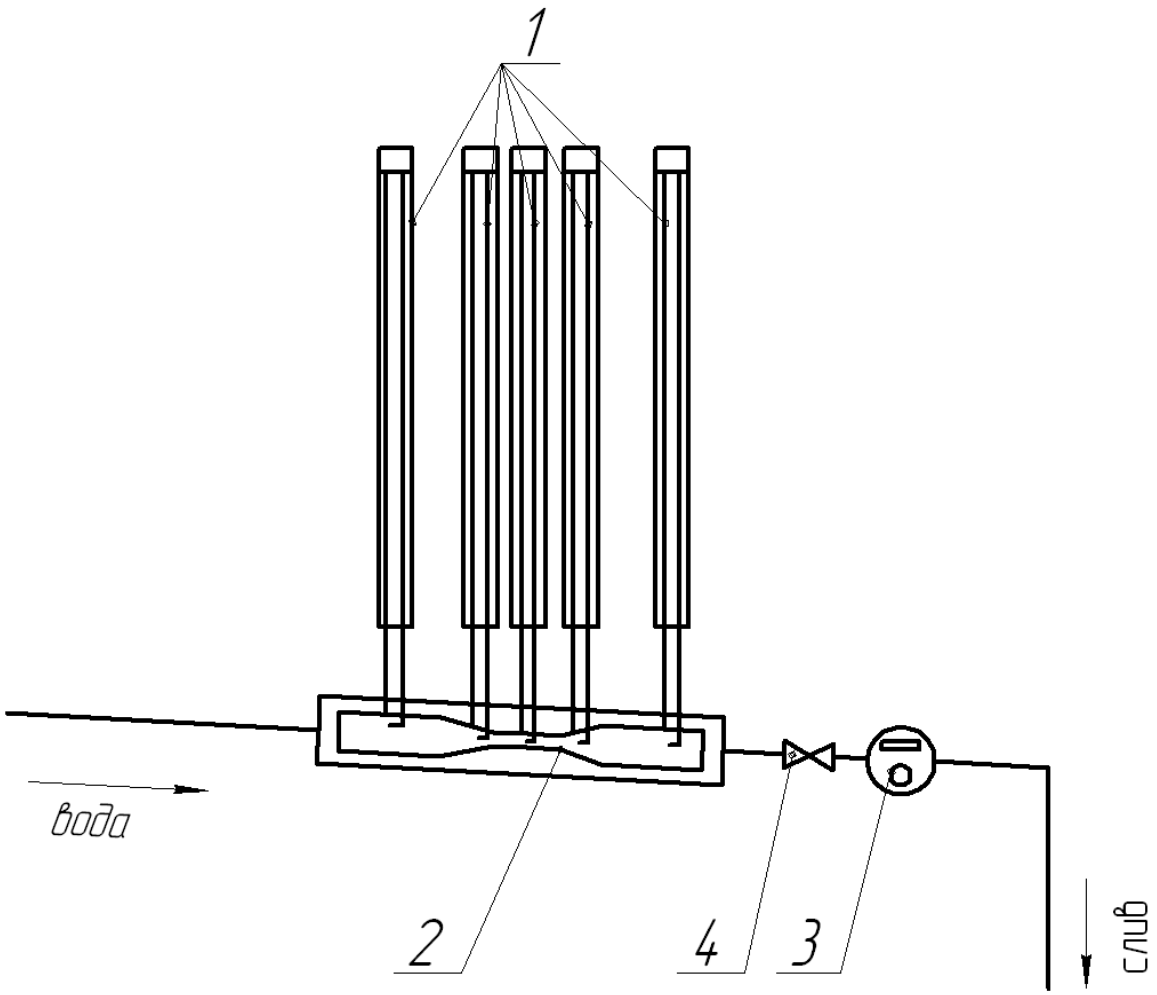


Рис. 16. Схема экспериментальной установки

4. Вычислить экспериментальные значения скорости течения жидкости υ по среднему значению скоростного напора (для 3-его сечения), по формуле:

$$\upsilon = \sqrt{2gh_v}; \qquad (3.16)$$

5. Вычислить расчетные значения расхода жидкости Q_p для 3-его сечения, по формуле:

$$Q_p = \upsilon \frac{\pi d_{экв}^{\ 2}}{4}. \qquad (3.17)$$

6. Занести результаты измерений в протокол испытаний.

Протокол испытаний Таблица 3.1

Параметр	Единица измерения	Формула обозначений	Значения показателей по сечениям установки				
			1	2	3	4	5
Объем, V	$м^3$	измерение					
Время, t	с	измерение					
Эквивалентные диаметры проходных сечений	мм	$d_{экв}$	12.4	12.4	8	12.4	12.4
Полный напор	мм.вод.ст.	$h^{\bullet}$					
Пьезометрический напор	мм.вод.ст.	h					
Скоростной напор	мм.вод.ст.	$h_v = h^{\bullet} - h$			*		
Скорость потока	м/с	$\upsilon = \sqrt{2gh_v}$			*		
Расход жидкости (экспериментальный)	$м^3/с$	$Q = \frac{V}{t}$			*		
Расход жидкости (расчетный)	$м^3/с$	$Q_p = \upsilon \frac{\pi d_{экв}^2}{4}$			*		

* расчет Q и Q_p, их сравнение производить для 3-его сечения, где наблюдается наибольшее значение скоростного напора (уменьшается вероятность ошибки при измерении).

7. По результатам измерений построить диаграмму уравнения Бернулли.

8. Сравнить расчетное и экспериментальное значения расхода жидкости в трубопроводе (для 3-его сечения).

Вопросы для контроля

1. В чем заключается физическая сущность уравнения Бернулли?

2. Что такое «полное давление жидкости»?

3. Почему в сужающемся сопле давление, измеряемое по пьезометру, уменьшается?

4. Почему на графике результатов измеренное полное давление уменьшается?

Литература

1. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов /Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. - 2-е изд., перераб. – М: Машиностроение, 1982. - 423 с.

2. Элементарный учебник физики: Учебное пособие. В 3-х т. / Под ред.Г.С. Ландсберга. Т. 1. Механика. Теплота. Молекулярная физика.– 10-е изд., перераб.– М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985.– 608 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ЖИДКОСТИ С ПОМОЩЬЮ СУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Цель работы: повышение уровня знаний по теме «Уравнение Бернулли для движения жидкости по трубам» (пример практического применения уравнения Бернулли) и приобретение практических навыков по измерению расхода жидкости одним из легко реализуемых практически способов.

Задачи работы:

1. Знакомство с общей теорией измерения расхода жидкости и, в частности, с помощью сужающих устройств.

2. Знакомство со способом приближенного тарирования простейших измерительных устройств.

Теоретические основы работы

Для измерения расхода жидкости или скорости ее движения по трубопроводам применяется большое количество разнообразных приборов и устройств. Как правило, они требуют создания специальных мерных участков

трубопроводов, в которых устанавливаются приборы. В условиях эксплуатации машин и сооружений может возникнуть задача приближенного определения расхода жидкости без их существенной переделки для установки измерителей расхода (скорости). Во многих случаях приемлемое решение этой задачи может быть обеспечено использованием сужающих устройств. Они представляют собой либо дроссельную шайбу или диафрагму (рис. 17), либо плавно изменяющееся по проходному сечению сопло (рис. 18). Возможны и другие формы сужающих устройств вплоть до использования вместо них достаточно простых местных сопротивлений, имеющихся в реальной магистрали.

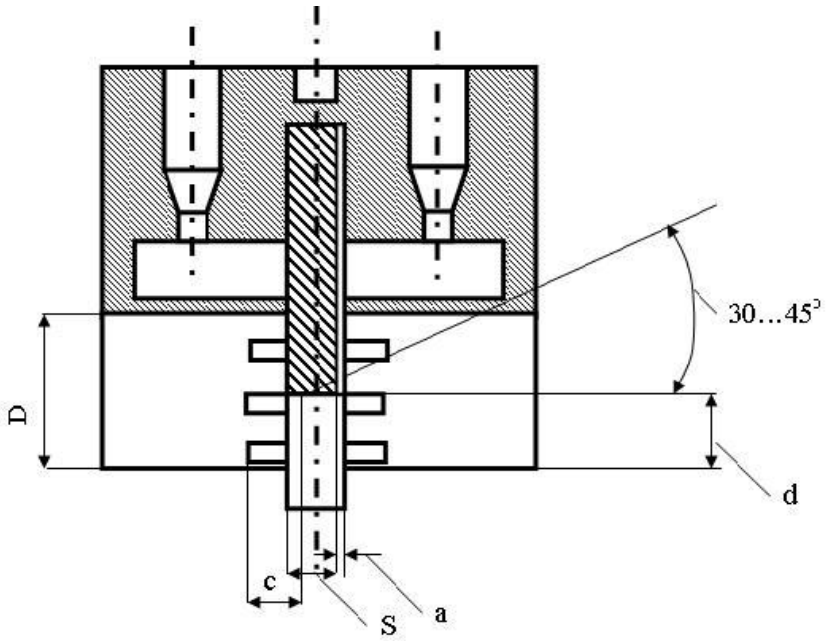


Рис. 17. Нормальное сужающее устройство - диафрагма

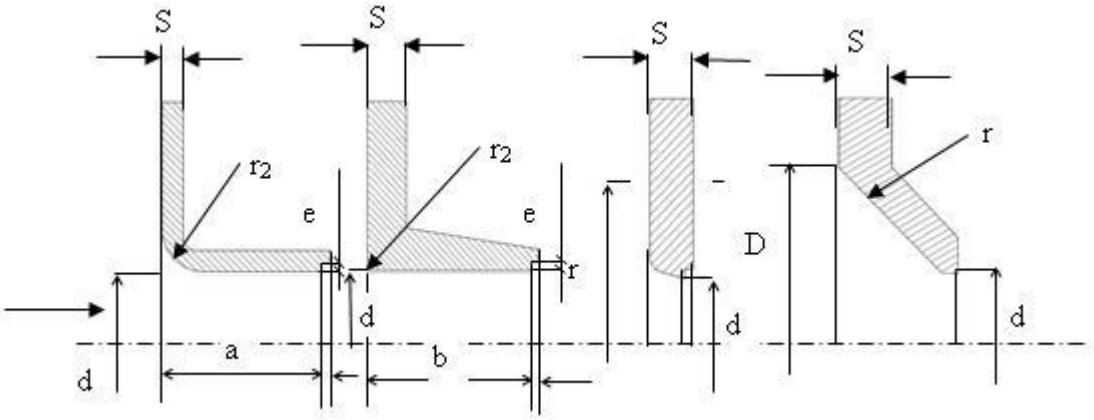


Рис. 18. Нормальное сужающее устройство - сопла

Измеряя перепады статического давления на сужающем устройстве (ΔH), можно определить объемный расход жидкости (Q) по формуле:

$$Q = c\sqrt{\Delta H}, \qquad (3.18)$$

где c - расходная характеристика сужающего устройства.

Зависимость (3.1) можно использовать для измерения расхода жидкости. Задача состоит лишь в том, чтобы определить характеристику (c) применяемого устройства. Ее можно найти двумя способами – экспериментально, путем тарировки данного устройства на стенде или рассчитать по приводимым далее зависимостям.

Описание установки

Для проведения лабораторной работы используется схема блока установки, представленная на рис. 19.

Жидкость, участвующая в автономном процессе, поступает из напорного резервуара, проходит через установку и при открытом кране (2) попадает в резервуар для слива. По мере движения вода проходит трубопровод переменного сечения (квадратное или прямоугольное) (4) с прозрачной передней стенкой. Перепад статических давлений на сужающем устройстве измеряется жидкостными манометрами (1). Расход жидкости измеряется при помощи счетчика (3).

Размеры установки, необходимые в расчетах:

Для расходомера «сопло»:

$D_{экв}$= 12,4 мм; $d_{экв}$=8 мм; $d_{экв}$/ $D_{экв}$ = 0,65;

размеры прямоугольного сечения трубопровода: $a = 8мм; b = 28мм;$

размеры квадратного сечения трубопровода: $a = 8мм; b = 8мм.$

Последовательность выполнения работы

Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с инструкцией и убедиться в исправности установки.

1. Открыть кран (2) слива воды из установки.

2. Медленно, регулируя кран (2) установить разницу столба жидкости в

жидкостных манометрах.

3. Выполнить отсчет счетчика воды и перепадов давлений жидкости по манометрам. Записать результаты измерений в протокол испытаний.

4. Повторить отсчет показаний приборов при другом значении расхода воды (всего пять отсчетов). Расход воды изменяется открытием крана (2) на выходе из установки.

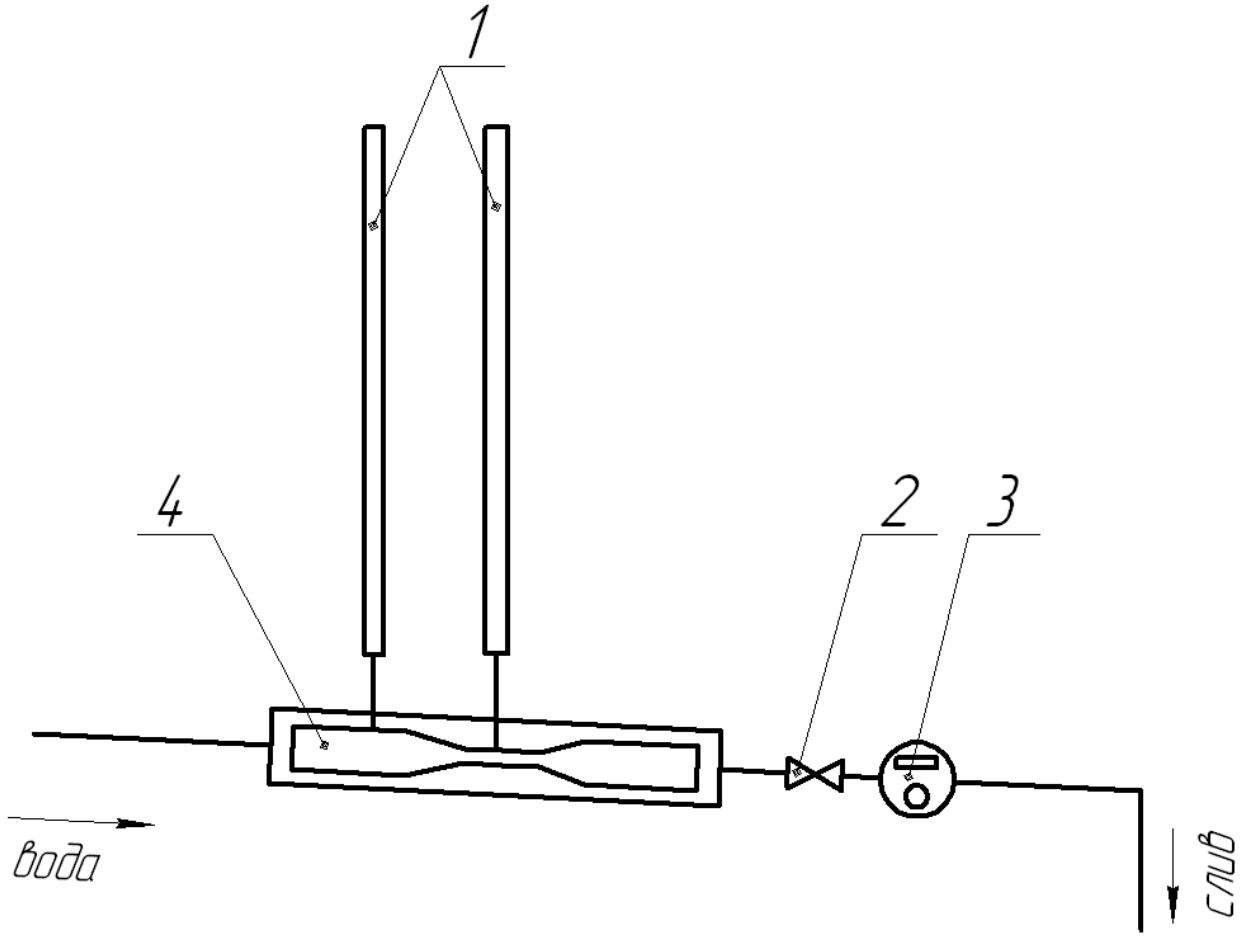


Рис. 19. Схема лабораторной установки

5. Выполнить расчетные оценки расходных характеристик сужающих устройств:

а) по экспериментальным данным (для всех результатов измерений), используя формулу

$$C_э = \frac{Q}{\sqrt{\Delta H}};$$

(3.19)

б) определить расчетную расходную характеристику по формуле

$$C_p = \frac{\pi d^2{}_{экв}}{4}\sqrt{\frac{2g}{1-\left(\frac{d^2{}_{экв}}{D^2{}_{экв}}\right)^2+\xi}}.$$

7. Занести результаты оценки в протокол испытаний, табл.4.1.

8. Сравнить значения расходных характеристик (экспериментальная и расчетная) сужающего устройства.

Протокол испытания расходомера Таблица 4.1

(сопло dэкв=0,008 м, Dэкв=0,0124 м, ξ=0,03 - 0,15)

Параметр		Единицы измерения	Формула или способ определения	Результаты измерений по номерам экспериментов				
				1	2	3	4	5
Объем, V		$м^3$	измерение					
Время, t		с	измерение					
Расход воды, Q		$м^3/с$	$Q=\frac{V}{t}$					
Показания пьезометров	h_1	мм.вод.ст.	измерение					
	h_2	мм.вод.ст.						
Разность показаний пьезометров, Δh		мм.вод.ст.	$\Delta h=h_1-h_2$					
Расходная характеристика, $C_э$(экспериментальная)		$м^{2,5}/с$	$C_э=\frac{Q}{\sqrt{\Delta h\cdot 10^{-3}}}$					
Расходная характеристика, $C_р$(расчетная)		$м^{2,5}/с$	$C_p=\frac{\pi d^2{}_{экв}}{4}\sqrt{\frac{2g}{1-\left(\frac{d^2{}_{экв}}{D^2{}_{экв}}\right)^2+\xi}}$					

Вопросы для контроля

1. Чем можно объяснить расхождения расчетных и экспериментальных данных по определению расходных характеристик сужающих устройств?

2. Правильно ли установлены в экспериментах измерители давлений?

3. Каковы границы областей турбулентного и ламинарного течений жидкости?

4. В какой области чисел Рейнольдса применимы выполненные оценки характеристик расходомеров?

Литература

1. Кремлевский, Л.П. Расходомеры и счетчики количества. – Л.: Машиностроение, изд-3-е, 1975.- 776 с.

2. Башта, Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машино-строительных вузов /Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др.- 2-е изд., перераб. - М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.

3. Идельчик, И.Б. Справочник по гидравлическим сопротивлениям.- М.:Машиностроение, 1995.- 559 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ.

Цель работы: повышение уровня знаний в области определения и анализа режимов движения жидкостей и приобретение практических навыков по измерению основных параметров характеризующих режим течения жидкости.

Задачи работы:

1. Знакомство с общей теорией режимов течения жидкости и критериями

характеризующими это течение.

2. Знакомство со способом определения критериев характеризующих движение жидкости и их зависимостями.

Теоретические основы работы

Существуют два режима движения жидкости – ламинарный и турбулентный.

При ламинарном режиме частицы жидкости перемещаются по направлению движения без поперечного перемешивания. Это спокойное, упорядоченное течение, при котором отдельные струйки жидкости движутся параллельно друг другу.

При турбулентном режиме частицы жидкости перемещаются по случайным искривленным траекториям, при этом имеют место поперечные пульсации скорости и давления и гораздо большие затраты энергии на перемещение жидкости. Это беспорядочное, хаотическое движение.

Режим движения жидкости в трубопроводе устанавливается расчетным путем по значению безразмерного числа - критерия Рейнольдса (***Re)***

$$\mathrm{Re} = \frac{\upsilon \cdot d}{\nu}, \qquad (3.20)$$

где υ – средняя скорость движения жидкости;

d – диаметр трубопровода;

ν - коэффициент кинематической вязкости жидкости.

В потоке жидкости при её движении находятся во взаимодействии две силы - сила трения и сила инерции. Локальные (местные) возмущающие факторы - примеси, неровности поверхности и др. приводят к появлению сил инерции. Вязкость приводит к неравномерной эпюре скоростей и появлению силы трения. Число Re -мера отношения силы инерции к силе трения.

При малых скоростях движения силы инерции невелики и силы трения гасят возмущения (выравнивают траектории). Движение остается упорядоченным, то есть ламинарным. При увеличении скорости силы инерции растут, а силы трения практически не меняются, струйки распадаются на отдельные вих-

ри и наступает турбулизация потока. Число Рейнольдса, при котором ламинарное движение сменяется турбулентным, называется критическим ($\boldsymbol{Re_{кр}}$). Критическое число Рейнольдса определяется экспериментально и приводится в справочной литературе.

При определении режима движения необходимо вычислить по известным параметрам расчетное число Рейнольдса и далее сравнить его с критическим значением для данного случая.

Если $Re < Re_{кр}$ - ламинанарный режим движения;

Если $Re > Re_{кр}$ - турбулентный режим движения.

Описание лабораторной установки

Схема блока лабораторной установки представлена на рис. 20. Она состоит из напорного резервуара (1), резервуара с подкрашенной жидкостью (2), вертикального стеклянного трубопровода $d = 18$ мм (3), счетчика воды (4), кранов (5) и (6) для слива.

Вода из напорного резервуара поступает в стеклянный трубопровод. Для регулирования скорости движения жидкости установлен кран. В центр водяного потока в трубопровод поступает подкрашенная жидкость. Для определения расхода жидкости установлен счетчик воды.

В процессе проведения эксперимента ведется наблюдение за поведением подкрашенной жидкости при разных скоростях движения воды. Скорость движения регулируется с помощью крана.

Последовательность выполнения работы

Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с инструкцией и убедиться в исправности установки.

1. Открыть краны (5) и (6).
2. Наблюдать за режимами движения жидкости в стеклянном трубопроводе $d = 18$ мм (3) в зависимости от степени открытия крана (5).

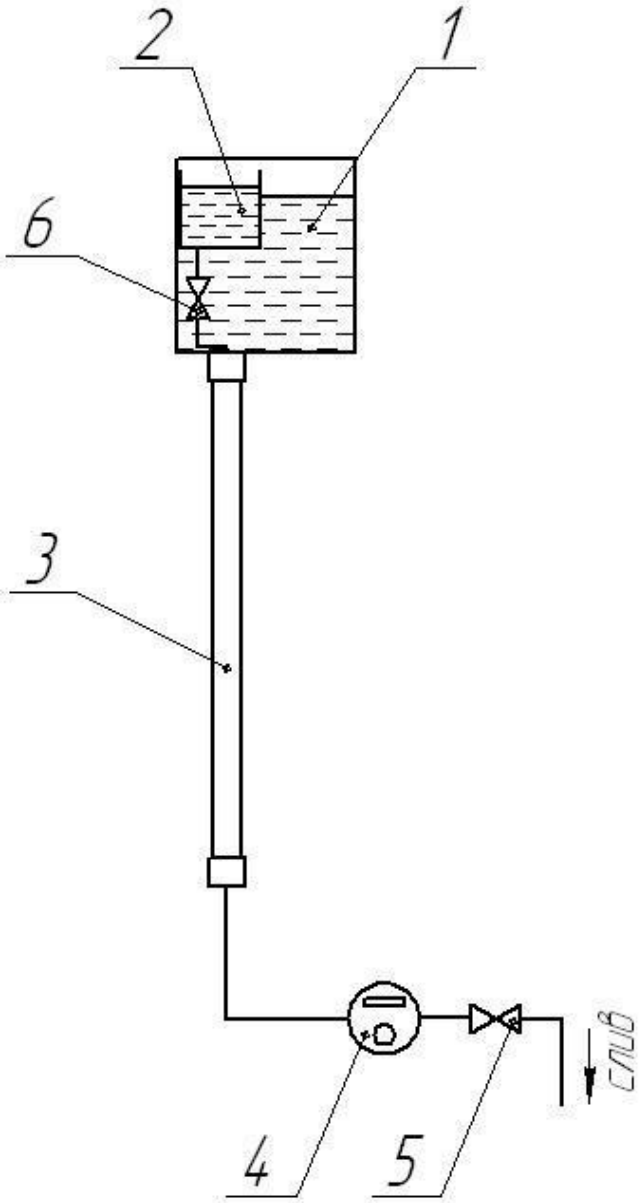


Рис. 20. Схема экспериментальной установки

3. Установить визуально ламинарный и турбулентный режим движения.
4. Снять значения расхода жидкости по показанию счетчика (4).
5. Вычислить для каждого опыта значение скорости течения жидкости по формуле:

$$\upsilon_m = \frac{4Q}{\pi d^2}; \qquad (3.21)$$

6. Определить экспериментальное значение числа Рейнольдса по формуле:

$$\mathrm{Re}_{э} = \frac{\upsilon_m d}{\nu}; \qquad (3.22)$$

Струйка подкрашенной жидкости (рис.21) движется параллельно оси трубопровода и не смешивается с водой.

Режим движения ламинарный – Re < 2320.

Рис.21. Движение жидкости при малых скоростях

Струйка подкрашенной жидкости пропала (рис.22) – жидкость перемешалась с водой.

Режим движения турбулентный – Re>2320.

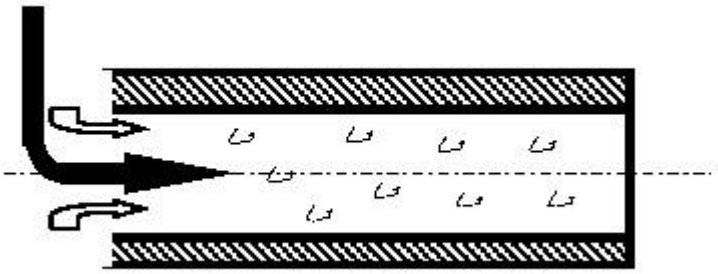


Рис.22. Движение жидкости при больших скоростях

7. Сравнить результаты экспериментальных и теоретических исследований.
8. Результаты оценок занести в таблицу 5.1.

Результаты измерений Таблица 5.1

Параметр	Единицы измерения	Способ определения	Результаты измерений
Объем, V	$м^3$	измерение	
Время, t	с	измерение	
Расход воды, Q	$м^3/с$	$Q = \frac{V}{t}$	
Скорость течения, υ_m	м/с	$\upsilon_m = \frac{4Q}{\pi d^2}$	
Критерий Рейнольдса (расчетный)	б/р	$\mathrm{Re}_p = \frac{\upsilon_m d}{\nu}$	
Режим движения		визуально	

Вопросы для контроля

1. Чем можно объяснить появление различных течений жидкости?
2. Как влияют режимы движения жидкости на гидравлические процессы?
3. Каковы границы областей турбулентного и ламинарного течений жидкости?
4. Как определить критерий Рейнольдса?

Литература

1. Башта, Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машино-строительных вузов /Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др.- 2-е изд., перераб. - М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.

2. Идельчик, И.Б. Справочник по гидравлическим сопротивлениям.- М.:Машиностроение, 1995.- 559 с.

4. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ

Общие замечания

В инженерной практике часто приходится рассматривать вопросы истечения жидкости через отверстия в днище или в боковых стенках аппаратов, а также через короткие патрубки, называемые насадками [14].

Отверстие называется затопленным, если находится в перегородке, и жидкость вытекает в смежный заполненный резервуар. Отверстие считается незатопленным, если жидкость вытекает в атмосферу.

Если для отверстия справедливо условие:

$$\delta < 3d, \tag{4.1}$$

где δ – толщина стенки;

d – диаметр отверстия,

оно называется отверстием в тонкой стенке. В этом случае струя преодолевает лишь местное сопротивление самого отверстия. Огибая переднюю кромку, струя вытекает из отверстия, не касаясь его внутренней поверхности (рис. 23а).

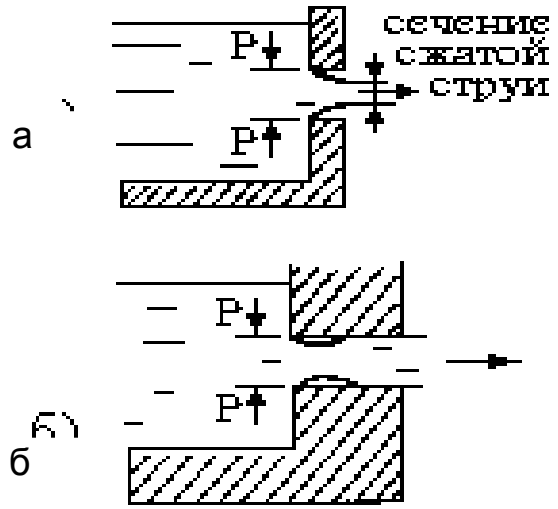


Рис.23. Схемы истечения из тонкостенного (а) и толстостенного (б) отверстий

В толстостенных отверстиях следует учитывать не только потери вследствие сжатия, но также потери по длине отверстия (рис. 23б). В этом случае

$\delta > 3d$. На некотором, достаточно близком расстоянии от внутренней стенки аппарата образуется так называемое сжатое сечение, имеющее наименьшую площадь. Сжатие струи объясняется условием подхода частиц к отверстию. На струю действуют не только силы, выталкивающие ее, но также силы P, нормальные ей. Так называемое совершенное сжатие струи (рис. 22а) имеет место в отверстии, границы которого удалены от боковой поверхности или дна не менее чем на 3d, где а, в – размеры сторон прямоугольного отверстия (рис. 24а).

При полном сжатии струя испытывает сжатие со всех сторон (рис. 24а). На рис. 24б показано неполное сжатие, струя не испытывает сжимающего действия со стороны днища аппарата.

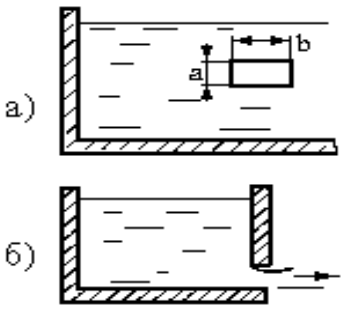


Рис. 24. Схема совершенного и несовершенного сжатия струи при истечении: а – полное сжатие; б – неполное сжатие

Задача об истечении жидкости сводится к определению скорости истечения, продолжительности истечения жидкости при снижении уровня ее в определенных пределах или полного опорожнения емкости.

Истечение жидкости при постоянном ее уровне в аппарате

Если уровень жидкости постоянен и отверстие достаточно глубоко погружено под свободной поверхностью жидкости, т.е. на ее истечение не влияют возмущения на поверхности при подаче воды в аппарат, то это движение будет установившимся (рис. 25). Составим уравнение Бернулли для сечений 1 и 2. При этом примем, что жидкость идеальная, а ее масса равна единице. Получим:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{W_1^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{W_2^2}{2 \cdot g}.$$

Для открытого аппарата давление p_1 на поверхности жидкости и на поверхности вытекающей струйки p_2 равны ($p_1 = p_2$).

Скорость движения жидкости W_1 через сечение 1–1 аппарата пренебрежимо мала по сравнению со скоростью движения жидкости W_2 в сечении 2–2 струи, поэтому $W_1 \approx 0$.

Поскольку расстояние L от днища аппарата до узкого сечения струи 2–2 небольшое по сравнению с габаритами аппарата и составляет приблизительно половину диаметра отверстия ($L \cong 0{,}5d$), то можно принять $Z_1 - Z_2 \cong H$, где H – уровень жидкости над днищем аппарата. С учетом сказанного получим:

$$\frac{W_2^2}{2 \cdot g} = H. \qquad (4.2)$$

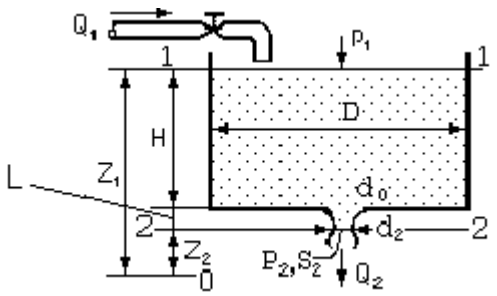


Рис. 25. Схема истечения при постоянном уровне жидкости

При движении реальной жидкости часть гидравлического напора H теряется на преодоление гидравлических сопротивлений, обусловленных внезапным сужением и трением потока жидкости в отверстии о стенки аппарата. Поэтому скорость движения реальной жидкости в сечении 2–2 будет меньше скорости движения идеальной жидкости:

$$W_2 = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}, \qquad (4.3)$$

где φ – поправочный коэффициент, который называется коэффициентом скорости ($\varphi < 1$).

Площадь поперечного сечения струи в плоскости 2–2 меньше поперечного сечения S_o отверстия. Поэтому скорость жидкости W_o в отверстии меньше W_2:

$$W_o = \varepsilon \cdot W_2, \qquad (4.4)$$

где ε – коэффициент сжатия струи, $\varepsilon = S_2 / S_o$.

Для отверстий в тонкой стенке $\varepsilon \cong 0{,}60 \div 0{,}64$. С учетом (4.2, 4.3) получим:

$$W_o = \varepsilon \cdot \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}\,. \qquad (4.5)$$

где α – коэффициент расхода, $\alpha = \varepsilon \cdot \varphi$.

Этот коэффициент определяется опытным путем, для воды при совершенном сжатии α=0,60 ÷ 0,62; при несовершенном – $\alpha > 0{,}62$.

Объемный секундный расход определяется формулой:

$$Q_{сек} = S_o \cdot W_o = S_o \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}. \qquad (4.6)$$

Из формулы (4.5) видно, что расход жидкости, вытекающей из аппарата, зависит только от уровня жидкости H над отверстием и не зависит от формы сосуда. Если в аппарате избыточное давление Δp, то формула (4.6) приобретает вид:

$$Q_{сек} = S_o \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H + \frac{\Delta P}{\rho \cdot g})}\,.$$

При истечении жидкости через затопленное отверстие формула (4.6) примет вид:

$$Q = S_o \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_1 - H_2)}\,,$$

где H_1, H_2 – уровни жидкости в смежных резервуарах.

Истечение жидкости через насадки

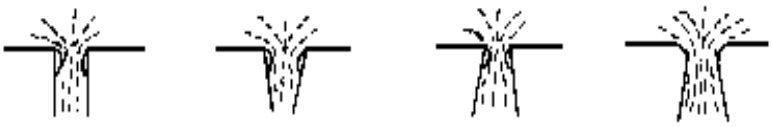
Насадки – короткие патрубки, присоединяемые к отверстию в тонкой стенке (рис. 26) с целью:

1) увеличения пропускной способности отверстия, т.е. расхода жидкости;

2) увеличения скорости истечения струи;

3) уменьшения скорости истечения струи.

Рассмотрим, каким образом решаются эти задачи.



а б в г

Рис. 26. Формы насадок и схемы истечения жидкости через них

Пример 1. Цилиндрический насадок (рис. 26а) имеет длину L=(3÷4)·d.

Струя жидкости при выходе из отверстия и входе в насадок подвергается некоторому сжатию ($d_{стр} \cong 0{,}8 \cdot d$).

В сжатом сечении струи давление ниже атмосферного. В связи с этим в патрубке происходит дополнительный подсос жидкости из аппарата и увеличивается пропускная способность отверстия. Экспериментально установлено, что коэффициент расхода $\alpha_н$ при использовании насадка равен приблизительно 0,82. Таким образом, цилиндрический насадок может увеличить пропускную способность на 30 % по сравнению с истечением из отверстия. Наряду с этим происходит также некоторое уменьшение скорости истечения. Действительно, при истечении жидкости через отверстие имеем:

$$\varphi = \alpha / \varepsilon.$$

Коэффициент сжатия струи:

$$\varepsilon = (0{,}8 \cdot d_o)^2 / d_o^2 = 0{,}64.$$

Коэффициент скорости φ для воды:

$$\varphi = \alpha / \varepsilon = 0{,}62 / 0{,}64 = 0{,}97.$$

При использовании насадка $\varepsilon_н = S_н / S_o = 1$,

где $S_н$ – площадь поперечного сечения насадка, $S_н = S_o$.

Коэффициент расхода $\alpha_н$ при использовании насадка:

$$\alpha_н = 1{,}3 \cdot \alpha \cong 0{,}81.$$

Коэффициент скорости $\varphi_н$ при использовании насадка равен:

$$\varphi_н = \alpha_н / \varepsilon_н = 0{,}81.$$

Поскольку $\varphi_н < \varphi$, то скорость истечения жидкости из насадка меньше скорости жидкости, истекающей из отверстия.

Основное назначение цилиндрического насадка – увеличение расхода жидкости, истекающей из отверстия.

Пример 2. Конический сходящийся насадок (рис. 26б).

В нем происходит увеличение скорости струи за счет уменьшения ее диаметра. Струя, выходящая из такого насадка, обладает компактностью и способностью сохранять свою форму на дальних расстояниях, не распадаясь на капли. Поэтому конические насадки применяются в качестве сопел, наконечников, пожарных брандспойтов и т.д. При этом расход жидкости не увеличивается.

Пример 3. Конический расходящийся насадок (рис. 26в).

В этом насадке струя испытывает значительное сжатие, а в патрубке создается значительный вакуум. Конические расходящиеся насадки обладают бóльшим всасывающим свойством, чем цилиндрические насадки. Расход жидкости при установке таких насадков увеличивается, скорость же значительно уменьшается ($\varphi \cong 0{,}45$). Угол конусности должен быть меньше 8°, иначе струя не будет касаться стенок, вакуум в насадке не образуется, и он не будет оказывать влияния на условия истечения жидкости.

Пример 4. Коноидальный насадок устраняет сжатие струи, все потери энергии сводит к минимуму ($\varphi \cong 0{,}97$). В нем создается большой запас кинетической энергии.

Этот насадок является усовершенствованным коническим сходящимся насадком. Поэтому здесь наряду с уменьшением сопротивления насадка и большой скоростью струи увеличивается расход жидкости (рис. 26г).

Истечение жидкости при переменном ее уровне

в аппарате постоянного сечения

Процесс истечения жидкости в этом случае является нестационарным, т.е. скорость истечения переменна во времени. За бесконечно малый промежуток времени $d\tau$ из сосуда (рис. 27) вытекает жидкость объемом $dV = Q \cdot d\tau$. Из

этого условия с учетом (4.6) получим:

$$dV = S_0 \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \cdot d\tau. \qquad (4.7)$$

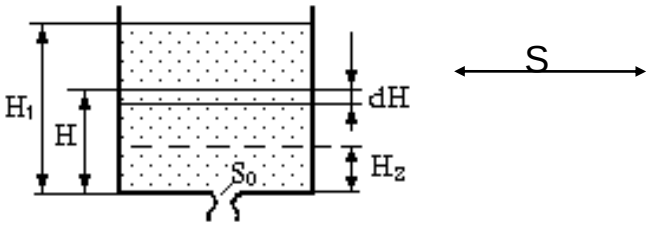


Рис. 27. Схема истечения жидкости из сосуда при переменном ее уровне

Уровень жидкости в сосуде при этом понизится на величину dH, поэтому можно записать:

$$dV = S \cdot (-dH),$$

где S – площадь поперечного сечения аппарата. В нашем случае $S = Const$.

Знак минус в этом выражении указывает на уменьшение уровня жидкости при истечении. Теперь получим:

$$S_o \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \cdot d\tau = -S \cdot dH, \qquad (4.8)$$

отсюда найдем:

$$d\tau = -\frac{S \cdot dH}{S_o \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}}. \qquad (4.9)$$

Проинтегрируем (5.8) при $\alpha = Const$:

$$\int X^n \cdot dX = \frac{X^{n+1}}{n+1}. \qquad (4.10)$$

Поменяв местами пределы интегрирования, получим:

$$\tau = \frac{S}{S_0 \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \int_{H_2}^{H_1} \frac{dH}{\sqrt{H}} = \frac{2 \cdot S}{S_0 \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \left(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}\right). \qquad (4.11)$$

Уравнение (4.10) позволяет рассчитать время истечения из аппарата жид-

кости объемом $V = S \cdot (H_1 - H_2)$.

Продолжительность истечения из резервуара всей жидкости получим из (4.10) при $H_2 = 0$:

$$\tau = \frac{2 \cdot S \cdot \sqrt{H_1}}{S_o \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \tag{4.12}$$

или

$$\tau = \frac{2 \cdot S \cdot H_1}{S_o \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_1}} = \frac{2 \cdot S \cdot H_1}{Q_1}. \tag{4.13}$$

Числитель в уравнении (4.12) – удвоенный объем резервуара; знаменатель – секундный расход Q_1 в начальный момент истечения жидкости, т.е. при уровне H_1. Следовательно, время опорожнения аппарата в два раза больше времени истечения того же объема жидкости при постоянном напоре, равном первоначальному H_1. Если жидкость в аппарате находится под давлением P_o, то уравнение (4.8) приобретает вид:

$$d\tau = \frac{S \cdot dH}{S_o \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(H + \frac{P_o}{\rho \cdot g}\right)}}.$$

Отсюда получим:

$$\tau = \frac{2 \cdot S}{S_o \cdot \alpha \sqrt{2 \cdot g}} \left(\sqrt{H_1 + \frac{P_o}{\rho \cdot g}} - \sqrt{H_2 + \frac{P_o}{\rho \cdot g}} \right). \tag{4.14}$$

$$\tau = \frac{2 \cdot S \cdot \sqrt{H_1}}{S_o \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \tag{4.15}$$

или

$$\tau = \frac{2 \cdot S \cdot H_1}{S_o \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_1}} = \frac{2 \cdot S \cdot H_1}{Q_1}. \tag{4.16}$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ЖИДКОСТИ В ЗАКРЫТОМ СОСУДЕ

Цель работы: повышение уровня знаний по теме «Уравнение Бернулли для движения жидкости» и освоение практического приема определения объема жидкости в закрытом сосуде.

Задачи работы:

1. Знакомство со способом измерения объема жидкости в сосуде путем ее переливания в другой сосуд.

2. Освоение практического приема измерения и обработки результатов.

Теоретические основы

В инженерной практике встречаются задачи определения объема жидкого продукта в резервуаре, когда каких-либо устройств для измерения не имеется. В этом случае может быть применен следующий прием.

Жидкий продукт свободно выпускается через отверстие известного размера **(d)** в днище другого сосуда. Измеряется время перетекания **(τ)**. Вычисляется объем жидкости в сосуде по выражению [1]:

$$Q = \alpha \cdot d^4 \cdot \tau^2; \qquad (4.17)$$

$$\alpha = g \cdot \mu^2 \cdot \pi^2 / 32F, \qquad (4.18)$$

где F - площадь основания сосуда, м^3;

g - ускорение силы тяжести, g=9,81 м/с^2;

μ - относительное сужение отверстия, μ≈0,6.

Вывод расчетной зависимости

Формула Бернулли, связывающая скорость **V**, м/с истечения жидкости из отверстия в резервуаре с высотой уровня жидкости над ним **(h):**

$$V = \mu\sqrt{2gh}; \qquad \mu = 0{,}6. \qquad (4.19)$$

За время dτ уровень жидкости в сосуде понизится на dh. Приравнивая

объемы вытекающей жидкости, рассчитанной через изменение объема в сосуде и через объем вытекшей воды при скорости истечения V, получим

$$d\omega = -\pi R^2 dh; \qquad d\omega = \pi \cdot r^2 V d\tau = \pi \cdot r^2 \mu \sqrt{2gh} \cdot d\tau; \tag{4.20}$$

$$-R^2 dh = \mu \cdot r^2 \sqrt{2gh} \cdot d\tau; \qquad d\tau = -\frac{R^2}{\mu \cdot r^2 \cdot \sqrt{2g}} \cdot \frac{dh}{\sqrt{h}}. \tag{4.21}$$

Интегрируем полученное выражение

$$\tau = c - \frac{2R^2}{\mu \cdot r^2 \sqrt{2g}} \cdot \sqrt{h}; \tag{4.22}$$

где c – постоянная.

Постоянную (c) находим из начального условия.

При h=0 (полное опорожнение сосуда)

$$\tau = \frac{2R^2 \sqrt{h_0}}{\mu \cdot r^2 \sqrt{2g}} \tag{4.23}$$

где $\pi \cdot R^2 = F$ - площадь основания сосуда,

$Q = Fh_0$ - объем вытекшей жидкости.

$$h_0 = (\tau \cdot \mu \cdot r^2 \sqrt{2g} / 2R^2)^2; \qquad Q = F\tau^2 \mu^2 r^4 2g / 4R^4; \qquad r = d/2; \tag{4.24}$$

$$Q = \alpha \cdot d^4 \tau^2; \qquad \alpha = g\mu^2 \pi^2 / 32F.$$

При $g = 98 см/с^2$; $\mu = 0,6$; $R = 7,5 см$; $d = 1,5$ см

$$h_p = \frac{g \cdot \mu^2}{32(R)^4} d^4 \tau^2 = 0,018\tau^2. \tag{4.25}$$

Описание установки

Эксперимент проводится на установке, схема которой изображена на рис. 28. В днище вертикального цилиндрического сосуда диаметром D15 см изготовлено отверстие диаметром d = 1,5 см, связанное со сливной канализацией. Для контроля результатов расчета установка имеет мерное стекло.

Заполнив ее на высоту h_0 и открыв сливной вентиль, можно по времени истечения жидкости до высоты h_1, равному τ, определить начальную высоту заполнения h_0. Расчетная величина h_0 контролируется результатом ее измерения.

Последовательность выполнения работы

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с инструкцией и убедиться в исправности установки.

1. Закрыть вентиль слива и открыть вентиль наполнения сосуда установки.

2. После заполнения сосуда несколько более выбранной высоты h_0 =130 см, закрыть вентиль наполнения сосуда.

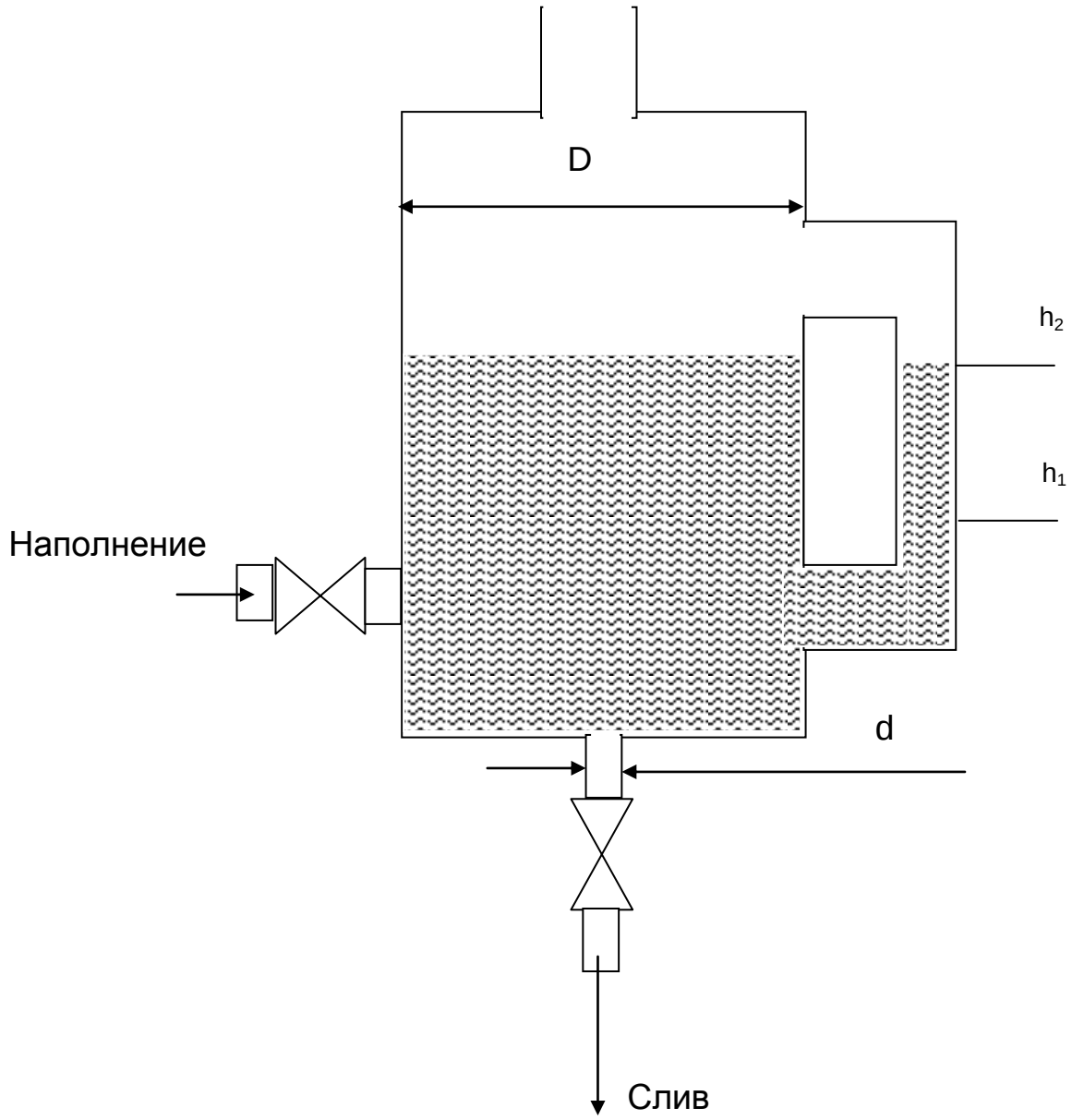


Рис. 28. Схема экспериментальной установки

3. Открыть вентиль слива. При прохождении уровнем жидкости отметки

h_2=130 см включить секундомер. После достижения высоты слива h_1=30 см выключить секундомер и результат отсчета времени по нему записать в протокол. Записать в протокол высоту уровня сливаемой жидкости, равную

$h_0 = h_2 – h_1$=130–30=100 см.

4. Повторить результаты измерений пять раз.

5. Вычислить начальный уровень воды (h_p) в сосуде по формуле $h_p = 0{,}018\tau^2$.

6. Выполнить статистическую обработку [2] результатов измерений величин h_p и h_0 на ПЭВМ по программе «Статистическая обработка». Записать результаты в протокол.

7. Сравнить результаты вычисления и измерения h_p и h_0 по программе «статистическая значимость различий». Записать результат сравнения в протокол (табл. 6.1).

Вопросы для контроля

1. Какими факторами можно объяснить различия измерения и расчетов начальной высоты заполнения h_0?

2. Для каких целей можно использовать данный способ измерения объема жидкости?

3. Как практически реализовать этот способ измерения, если имеется сливной кран на емкости, а проходные сечения трубопроводов перед ним и после него известны?

Литература

1. Т.М. Башта. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов /Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. - 2-е изд. перераб. - М.: Машиностроение, 1982. - 423 с.

2. Статистическая обработка экспериментальных данных: Методические указания по выполнению лабораторной работы. - ОФМИП, 1992.- 20 с.

Протокол испытаний Таблица 6.1

Параметр	Единицы измерения	Формула или способ определения	Результаты измерений					Результаты статистической обработки	
			1	2	3	4	5	M	σ
Начальная высота заполнения h_1	м	измерение с переводом размерностей							
Время опорожнения до высоты $h_{1,\tau}$	с	измерение							
Расчетный уровень, h_p	м	$h_p=0{,}018\cdot\tau^2$							

5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПОРНО-РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСОСА И УСТАНОВКИ

Цель работы:

1. Повышение уровня знаний о характеристиках насосов и насосных установок при проектировании и способах их определения.

2. Приобретение навыков экспериментального определения характеристик насосов и насосных установок.

Задачи работы:

1. Определить напорно-расходную характеристику насоса.

2. Определить характеристику насосной установки (расчетную и экспериментальную).

3. Определить рабочую точку гидравлической системы.

Теоретические сведения

Для перемещения жидкости по трубопроводам установки (рис. 29) из приемного резервуара в напорный, необходимо затрачивать энергию на подъем жидкости на высоту $\mathbf{H_г}$, на преодоление разности давлений $\mathbf{p''-p'}$ в резервуарах и на преодоление суммарных гидравлических сопротивлений $\sum h_n$ всасывающего и напорного трубопроводов. Энергия, необходимая для перемещения единицы веса жидкости из приемного резервуара в напорный по трубопроводам установки, или потребный напор равен

$$H_{потр} = H_Г + \frac{P'''' - P''}{\rho \cdot g} + \sum h_n = H_{ст} + \sum h_n . \qquad (5.1)$$

Характеристикой насосной установки является зависимость потребного напора от расхода жидкости.

Для определения режима работы насоса в сети следует на характеристику гидравлической линии (насосной установки) нанести в том же масштабе характеристику насоса (рис. 40). Гидравлическая система работает в таком режиме, при котором напор насоса **H** равен потребному напору $\mathbf{H_{потр}}$, т.е. режим работы насоса определяется точкой А (G_A, H_A) пересечения характеристик насоса и гидравлической линии установки.

Описание установки

Эксперимент проводится на установке, схема которой представлена на рис. 30.

Питающий бак (6) залит водой. Через кран (1) из бака при помощи насосу (2) подается вода по трубопроводу через регулирующую заслонку (3) и расходомер (4) вновь в питающий бак. При этом кран (8) должен быть закрыт. Давление P_1 в напорной магистрали измеряется по манометру (5), давление в гидравлической линии контролируется по манометру (5’), а количество жидкости подаваемой насосом определяется по расходомеру (4).

В данной насосной установке насос находится выше уровня жидкости в баке. При определении давления создаваемого насосом в напорной магистрали необходимо делать поправку к показаниям значений давлении по манометру

необходимо прибавить значение давления, необходимого для поднятия жидкости на высоту Н.

Исходные данные, необходимые для проведения расчетов представлены в табл. 7.1.

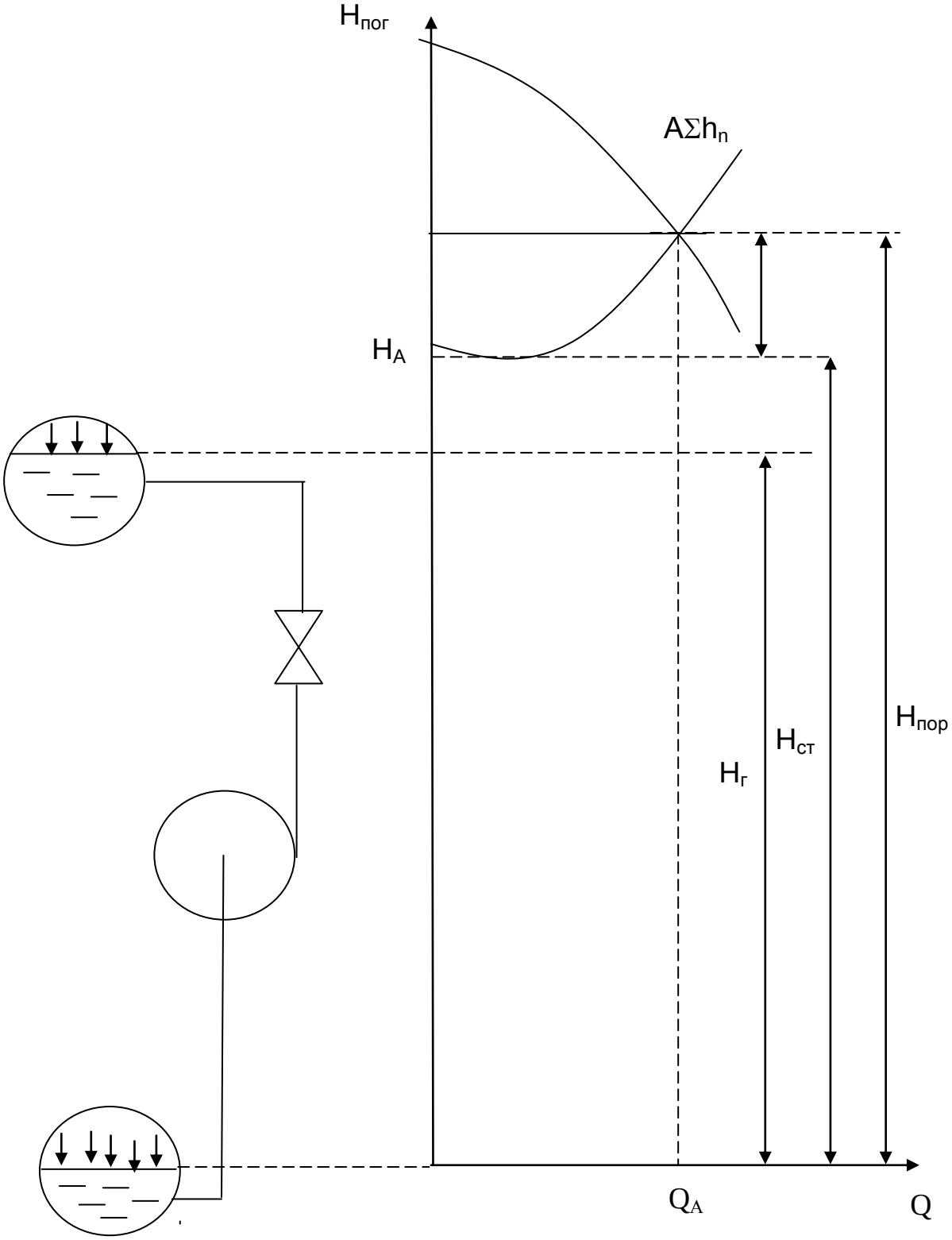


Рис. 29. Характеристика насосной установки

Последовательность выполнения работы

1. Экспериментальное определение характеристики насоса и насосной установки.

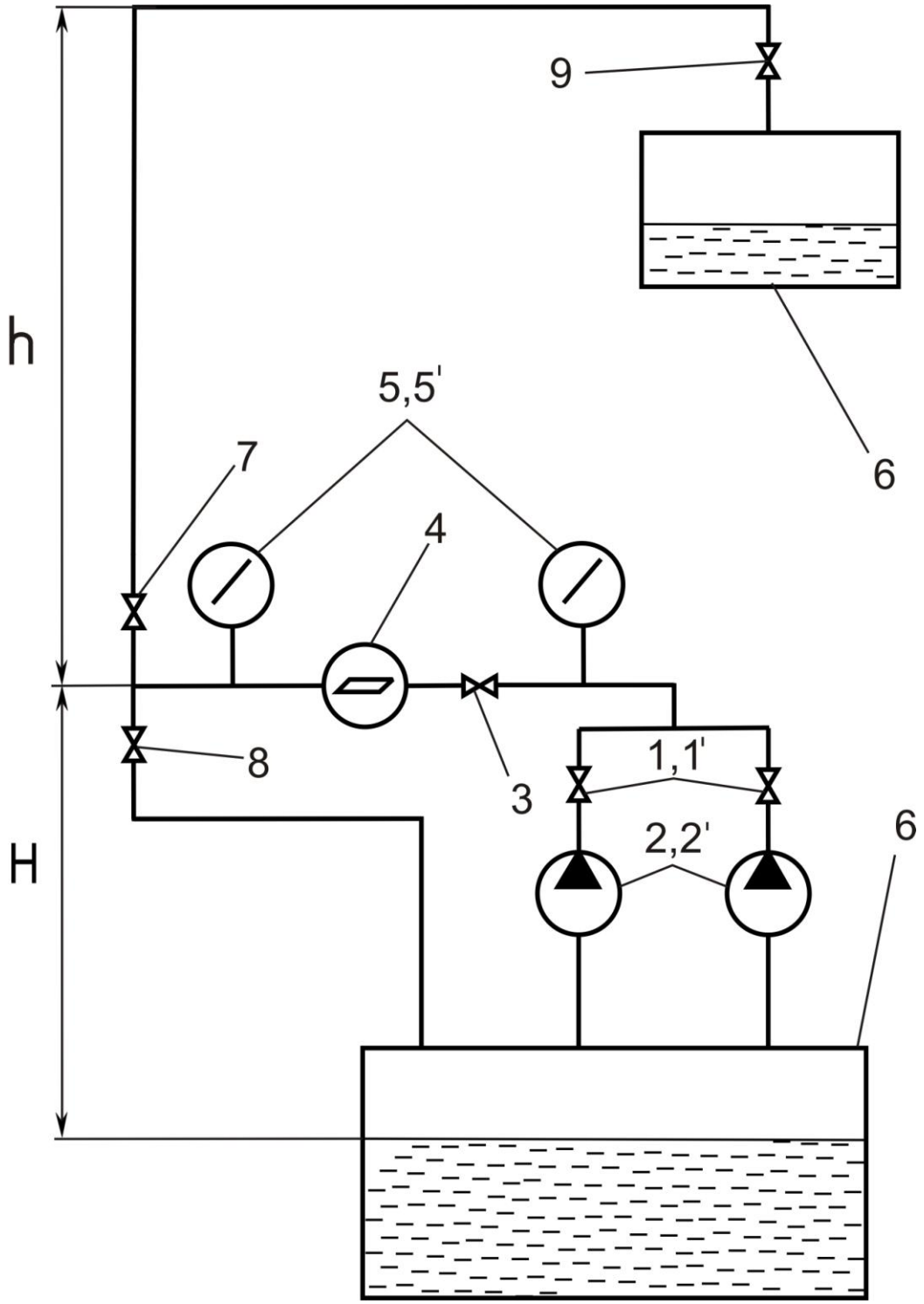


Рис.30. Схема насосной установки

1.1 Открыть кран (1,7,9) подачи воды к насосу и регулирующую заслонку (3).

1.2 Включить насос.

1.3 При включенном насосе регулирующей заслонкой установить пять значений (0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5) кгс/см^2 давлений в напорной магистрали, контролируемых по манометру (5), и снять показания давления в гидравлической линии установки по манометру (5’).

1.4 Для каждого значения давления снять (5) измерений по расходомеру количества воды (м^3), подаваемой насосом за время.

1.5 Обработать результаты измерения и заполнить табл. 7.2.

2. Определение расчетной характеристики гидравлической линии.

2.1 Используя исходные данные насосной установки (табл. 7.1) и экспериментальные данные расход воды G (табл. 7.2) произвести расчет потребного напора установки.

2.2 Заполнить табл. 7.3.

Таблица 7.1

Исходные данные

Наименование	Обозначение	Единицы измерения	Значения
Длина трубопровода	ℓ	м	2,9
Диаметр трубопровода	d	м	0,01
Осредненный коэффициент местных сопротивлений	ξ	б/р	0,65
Количество местных сопротивлений	n	шт	14
Вязкость жидкости (вода при 20°С)	ν	см^2/с	0,01
Расстояние между высотой подъема воды и уровнем воды в питательном баке	h	м	1,1
Разность уровней входа манометров и уровня жидкости в баке	H	м	0,4

3. По данным табл. 7.2 и 7.3 построить в координатах ΔP_i, G графические зависимости характеристик.

- насоса;
- насосной установки (расчетную и экспериментальную).

4. По экспериментальным данным из графика определить режим работы насоса на сеть.

Таблица 7.2

Результаты расчетов характеристики гидравлической линии насосной установки

Параметр	Формула	Единица измерения	Расход воды, Q, $м^3/с$(л/мин)				
			1	2	3	4	5
Скорость жидкости	$V = \frac{4G}{\pi \cdot d^2}$	м/с					
Критерий Рейнольдса	$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}$	б/р					
Коэффициент гидравлического сопротивления	$\lambda = 0{,}32 / Re^{0{,}25}$; $\lambda = 64 / Re$	б/р					
Потери давления на трение	$\Delta P_{тр} = \lambda \cdot \frac{\ell}{d} \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2}$	$кгс/см^2$					
Потери давления на местные сопротивления	$\Delta P_{м} = \xi \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2} \cdot n$	$кгс/см^2$					
Геометрический напор	$\Delta P_{Г} = (H + h) \cdot \rho \cdot g$	$кгс/см^2$					
Разность давлений в емкостях	$\Delta P_{р} = P'' - P'$	$кгс/см^2$					
Потребный напор	$\Delta P_2 = \Delta P_Г + \Delta P_р + \Delta P_{тр} + \Delta P_м$	$кгс/см^2$					

Контрольные вопросы:

1. Каковы необходимые элементы экспериментальной установки для определения характеристики гидравлической линии?

2. Каковы составляющие потребного напора установки?

3. Как определить режим работы насоса в установке? За счет чего он изменяется?

Таблица 7.3

Результаты экспериментальных измерений

Показания манометров, кгс/см^2		Давление создаваемое насосом кгс/см^2	Давление на входе манометра, кгс/см^2	Потребное давление, кгс/см^2	Время измерения, мин	Объем воды, прошедшей через расходомер, л			Расход воды, л/мин
P_1	P_2	$\Delta P_1=P_1+P_{вх}$	$P_{вх}=H\cdot\rho\cdot g$	$\Delta P_2=P_2+\Delta P_г$	t	$G_н$	$G_к$	$G=G_к-G_н$	$Q=G_i/t$

Литература

1. Башта, Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов /Т. М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. - 2-е изд., перераб. - М.: Машиностроение, 1982. - 423 с.

2. Байков, О.В. Лабораторный курс гидравлики и насосов. - М.- Л.: Госэнергоиздат, 1961. -248 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Соотношение некоторых единиц измерений в различных системах

Длина

1мкм = 10^{-6} м

1дюйм = $25{,}4 \cdot 10^{-3}$ м

Давление

1дин/кв.см = 10^{-1} Па

1кгс/кв.см = $9{,}81 \cdot 10^{-4}$ Па

1мм.рт.ст. = 133,3 Па

1мм.вод.ст.= 9,81 Па

1бар = 10^{-5} Па

Масса

1г = 10^{-3} кг

1моль = 10^{-3} кмоль

Вязкость

1спз = 10^{-3} Па·с

1кгс с/кв.м = 9,81 Па·с

1ст (стокс) = 10 $м^2/с$

Сила

1дин = 10^{-5} Н

1кгс = 9,81Н

Теплоемкость

1ккал/(кг град) = 4,187кДж/(кг·К)

Работа, энергия

1эрг = 10^{-7} Дж

1кгс м = 9,81Дж

1ккал = 4,187кДж

Мощность

1Вт = 1Дж/с

1эрг/с = 10^{-7} Вт

1кгс м/с = 9,81Вт

1л.с. = 736Вт

Теплопроводность

1ккал/(м ч град) = 1,163Вт/(м·К)

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица П.2.1

Физические свойства воды на линии насыщения

Температура °С	Плотность ρ, кг/м^3	Энтальпия $i\cdot10^{-3}$ Дж/кг	Теплоемкость $C\cdot10^{-3}$ Дж/(кг·К)	Теплопроводность $\lambda\cdot10^{2}$ Вт/(м·К)	Вязкость динамическая $\mu\cdot10^{6}$ Па· с	Вязкость кинематическая $\nu\cdot10^{6}$м^2/с	Коэф. объемного расширения $\beta\cdot10^{4}$1/К	Число Прандтля Pr
0	1000	0	4,23	55,1	1790	1,70	–0,63	13,70
10	1000	0,41,9	4,19	57,5	1310	1,31	0,70	9,52
20	998	83,8	4,19	59,9	1000	1,01	1,82	7,02
30	996	126,0	4,18	61,8	804	0,81	3,21	5,42
40	992	168,0	4,18	63,4	657	0,66	3,87	4,31
50	988	210,0	4,18	64,8	549	0,556	4,49	3,54
60	983	251,0	4,18	65,9	470	0,478	5,11	2,98
70	978	293,0	4,19	66,8	406	0,415	5,70	2,55
80	972	335,0	4,19	67,6	355	0,365	6,32	2,21
90	965	376,0	4,19	68,0	314	0,326	6,95	1,95
100	958	419,0	4,23	68,2	283	0,295	7,52	1,75
120	943	502,0	4,27	68,5	238	0,252	8,84	1,47
140	926	590,0	4,27	68,5	201	0,217	9,72	1,26

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица П.3.1

Значения плотности жидкостей

Тип жидкости	Плотность, кг/м^3, t ^{o}C		Кинематическая вязкость, $\nu \cdot 10^{-4}$, м^2/с, при t ^{o}C			
	20	50	20	40	60	80
Вода пресная	998	-	0,01	0,0065	0,0047	0,0036
Нефть лёгкая	884	-	0,25	-	-	-
Нефть тяжёлая	924	-	1,4	-	-	-
Бензин авиационный	745	-	0,0073	0,0059	0,0049	-
Керосин Т-1	808	-	0,015	0,018	0,012	0,01
Дизтопливо	846	-	0,28	0,12	-	-
Глицерин	1245	-	9,7	3,3	0,88	0,38
Ртуть	13550	-	0,0016	0,0014	0,001	-
Касторовое масло	960	-	15	3,5	0,88	0,38
Трансформаторное А	884	880	0,28	0,13	0,076	-
Веретенное АУ	-	892	0,48	0,19	0,098	0,059
Индустриальное 12	-	883	0,48	0,19	0,098	0,059
Турбинное масло	-	900	0,97	0,38	0,16	0,088
АМТ- 10	-	850	0,17	0,11	0,085	0,065

Приложение 4
Таблица П.4.1

Плотность и теплопроводность некоторых материалов

Материал	Плотность ρ, кг/м^3	Теплопроводность λ, Вт/(м·К)
Асбест	600	0,151
Асбокартон	1000…1400	0,157
Асбоцементная плита	300	0,087
Асфальт	1900…2000	0,070…0,080
Бетон	1900…2200	0,900…1,300
Битум	950…1000	0,302…0,348
Бумажная изоляция	200…250	0,070…0,080
Бутовая кладка	1700…2200	0,900…1,400
Стекловата	130	0,038
Шлаковата	250	0,076
Вата минеральная	200	0,052…0,064
Войлок минеральный	200	0,064
Войлок строительный	160	0,046…0,058
Газобетон теплоизоляционный	400…600	0,110…0,060
Дерево	500…800	0,140…0,230
Железобетон	2200…2400	1,400…1,500
Земля и насыпи	1600…1800	0,700…0,930
Камыши в щитах	250…300	0,070…0,090
Совелит	450	0,097
Текстолит	1380	0,240

Продолжение табл. П.4.1

Шлакобетон	1000…1500	0,400…0,700
Штукатурка цементная	1800	0,990…1,160
Алюминий	2700	202
Кладка кирпичная	1700	0,696…0,812
Опилки древесные	250…300	0,090…0,120
Лед	920	2,330
Пенобетон	550…570	0,140…0,170
Плиты пробковые	150…180	0,045…0,060
Плиты минераловатные	350	0,075
Плиты древесноволокнистые	400	0,054
Пенопласт	30	0,0464
Рубероид	600…800	0,140…0,170
Сталь черная	7850	46,5
Сталь нержавеющая	7900	17,40
Чугун	7500	46,40…92,80
Медь	8800	384,0
Эмаль	2350	0,872…1,163
Ржавчина (окалина)	–	1,16
Краска масляная	–	0,233

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Таблица П.5.1

Средние величины шероховатости труб

Материал и вид трубы	Состояние трубы	$h_э$,мм *
1.Тянутые трубы из стекла и цветных металлов	Новые, технически гладкие	0...0,002 / 0,001
2. Бесшовные стальные трубы	Новые	0,01...0,02 / 0,014
	После нескольких лет эксплуатации	0,15...0,3 / 0,2
3. Стальные трубы сварные	Новые	0,03...0,1 / 0,06
	С незначительной коррозией	0,1...0,2 / 0,15
	Старые заржавевшие	0,8...1,5 / 1
4. Оцинкованные железные трубы	Новые	0,1...0,2 / 0,15
	После нескольких лет эксплуатации	0,4...07 / 0,5
5. Чугунные трубы	Новые асфальтированные	0...0,16 / 0,12
	Новые без покрытия	0,2...0,5 / 0,3
	Бывшие в употреблении	0,5...1,5 / 1
	Очень старые	1…3
6. Бетонные трубы	Новые центробежные	0,15...0,3 / 0,2
	Бывшие в употреблении	0,3...0,8 / 0,5
	Из необработанного бетона	1…3

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Таблица П.6.1

Коэффициенты местных сопротивлений

Вид сопротивления	A	$\xi_{кв}$
Внезапное расширение	30	1
Внезапное сжатие	30	0,5
Угольник:		
90^0	400	1,4
120^0	600	0,4
Колено с углом 90^0	130	0,2
Тройник	150	0,3
Пробковый кран	150	0,4
Обыкновенный вентиль	3000	6
Угловой вентиль	400	0,8
Шаровой клапан	5000	45
Задвижка (полное открытие)	75	0,15

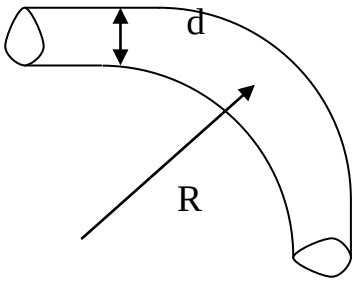


Рис.П.6.1. Плавный поворот на 90^0

Таблица П.6.2

Значения местных сопротивлений в зависимости от диаметра трубы и радиуса плавного поворота (для рис.П.6.1)

$\frac{R}{d}$	1	2	3	4	5
ξ	0,29	0,15	0,12	0,1	0,08

Таблица П.6.3

Внезапное сжатие сечения трубы (для рис.П.6.2)

$\frac{S_2}{S_1}$	0-0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
ξ	0,5	0,45	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0

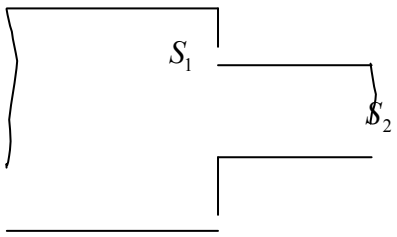


Рис.П.6.2 Внезапное сжатие трубы

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Таблица П.7.1

Значения коэффициента температурного расширения

Жидкость	$\beta_p, 10^{-9}\ \frac{м^2}{Н}$	$E, 10^9$ Па	β_t, град$^{-1}$
Вода	0,485	2,06	0,00015
Бензин	-	-	0,00100
Глицерин	0,245	4,08	0,00050
Керосин	0,73	1,37	0,00100
Масло	0,581	1,72	0,00072
Нефть	0,781	1,28	0,00100
Спирт	1,02	0,98	0,00110
Ртуть	0,041	24,6	0,00018