

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Безопасность жизнедеятельности»

# ГИДРАВЛИКА, ГИДРОПРИВОД И ГИДРОПНЕВМОАВТОМАТИКА. ГИДРАВЛИКА И ПНЕВМАТИКА. ГИДРАВЛИКА И ГИДРОПРИВОД

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов специальностей 1-37 01 02 «Автомобилестроение»,  
1-37 01 06 «Техническая эксплуатация автомобилей»,  
1-37 01 07 «Автосервис», 1-36 01 06 «Оборудование  
и технология сварочного производства»  
дневной и заочной форм обучения*

## ГИДРАВЛИКА



Могилев 2019

УДК 532:621.22  
ББК 31.56:34.447  
Г46

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Безопасность жизнедеятельности»  
«29» августа 2019 г., протокол № 1

Составитель канд. техн. наук, доц. В. И. Мрочек

Рецензент канд. техн. наук, доц. О. В. Голушкова

Методические рекомендации предназначены для студентов технических специальностей и используются при выполнении лабораторных работ по дисциплинам «Гидравлика, гидропривод и гидропневмоавтоматика», «Гидравлика и пневматика», «Гидравлика и гидропривод».

Учебно-методическое издание

ГИДРАВЛИКА, ГИДРОПРИВОД И ГИДРОПНЕВМОАВТОМАТИКА.  
ГИДРАВЛИКА И ПНЕВМАТИКА. ГИДРАВЛИКА И ГИДРОПРИВОД

Ответственный за выпуск	В. И. Мрочек
Технический редактор	С. Н. Красовская
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 56 экз. Заказ № .

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2019



## Содержание

Введение.....	4
1 Основные требования техники безопасности при работе на стенде .....	5
2 Описание устройства лабораторного стенда.....	5
3 Лабораторная работа № 1. Измерение давления и расхода, определение режима течения жидкости .....	9
4 Лабораторная работа № 2. Построение напорной и пьезометрической линий трубопровода .....	17
5 Лабораторная работа № 3. Определение коэффициентов местных гидравлических сопротивлений.....	23
6 Лабораторная работа № 4. Определение коэффициента гидравлического трения.....	31
7 Лабораторная работа № 5. Исследование нестационарных процессов истечения жидкости через гидродроссель .....	37
Список литературы .....	43



## Введение

Данными методическими указаниями предусмотрено выполнение пяти лабораторных работ, относящихся к разделу «Гидравлика». Все работы выполняются на одном лабораторном стенде.

Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы на стенде, необходимо изучить основные требования техники безопасности, устройство стенда, подготовиться к занятию. Подготовка к лабораторному занятию требует самостоятельной работы вне лаборатории и предусматривает изучение основных теоретических положений по теме выполняемой работы и оформление разделов отчета, не требующих наличия экспериментальных данных. В заготовках отчетов необходимо привести формы таблиц измеряемых и вычисляемых величин.

Неподготовленные студенты к занятию не допускаются.

Схему гидравлическую принципиальную стенда необходимо вычерчивать один раз и приводить ее в отчете по первой из выполняемых на стенде работ.

Отчет по лабораторной работе оформляется каждым студентом в отдельной тетради.

Содержание отчета:

- наименование лабораторной работы;
- цель;
- основные теоретические положения;
- схема установки и объекта исследования;
- таблицы измеряемых и вычисляемых величин;
- пример обработки результатов эксперимента (с подстановкой числовых значений величин, полученных в ходе выполнения одного опыта);
- графики;
- выводы.

Не позже чем на следующем лабораторном занятии отчет по лабораторной работе должен быть защищен.



## 1 Основные требования техники безопасности при работе на стенде

Работа на стенде допускается только в присутствии лаборанта или преподавателя.

При выполнении лабораторных работ необходимо руководствоваться требованиями данных методических указаний.

При работе на лабораторном стенде (описание стенда приведено в разд. 2) необходимо выполнять следующие требования.

Перед включением стенда необходимо убедиться (путем внешнего осмотра) в исправности защитного заземления стенда и целостности соединений трубопроводов.

Золотники гидрораспределителей перед включением насосов (насос включается путем подачи электрического питания на электродвигатель М) должны находиться в нейтральных позициях.

Перед включением стенда маховик управления регулятора расхода РР необходимо повернуть до ограничения против часовой стрелки.

Максимальное давление в гидравлической системе стенда не должно превышать 1,8...2,0 МПа.

Электрическое питание стенда – 380 В, 50 Гц. Для управления электромагнитами гидрораспределителей используется напряжение 24 В (постоянный ток).

При возникновении нештатных ситуаций необходимо выключить насосную установку и отключить электрическое питание стенда.

К работам по обслуживанию и ремонту стенда допускается лаборант, прошедший все виды инструктажей, обучение и проверку знаний по охране труда в соответствии с действующим законодательством.

## 2 Описание устройства лабораторного стенда

Лабораторный стенд предназначен для:

- изучения основных величин гидравлики и режимов течения жидкости;
- исследования течения жидкости в различных гидравлических сопротивлениях;
- изучения уравнения Бернулли.

Схема гидравлическая принципиальная стенда приведена на рисунке 2.1.

В состав стенда входят: гидробак Б, шестеренный насос Н, фильтр Ф, напорный гидроклапан КП, обратные клапаны КО1 и КО2, двухлинейный регулятор расхода РР, два гидрораспределителя Р1 и Р2, пружинный гидроаккумулятор А, присоединительная арматура и трубопроводы (в том числе исследуемые участки трубопроводов *аб*, *вг*, *де*). На участках *аб* и *де* установлены гидродроссели ДР1 и ДР2. Привод насоса осуществляется от электродвигателя М.

Информационно-измерительная система стенда включает 10 манометров (МН1–МН8, манометр МН9 – электроконтактный с двумя управляемыми кон-



тактами, манометр МН10 используется для контроля давления на выходе насоса), скоростной расходомер интегрирующего типа РА, термометр Т и электронный секундомер СЕК.

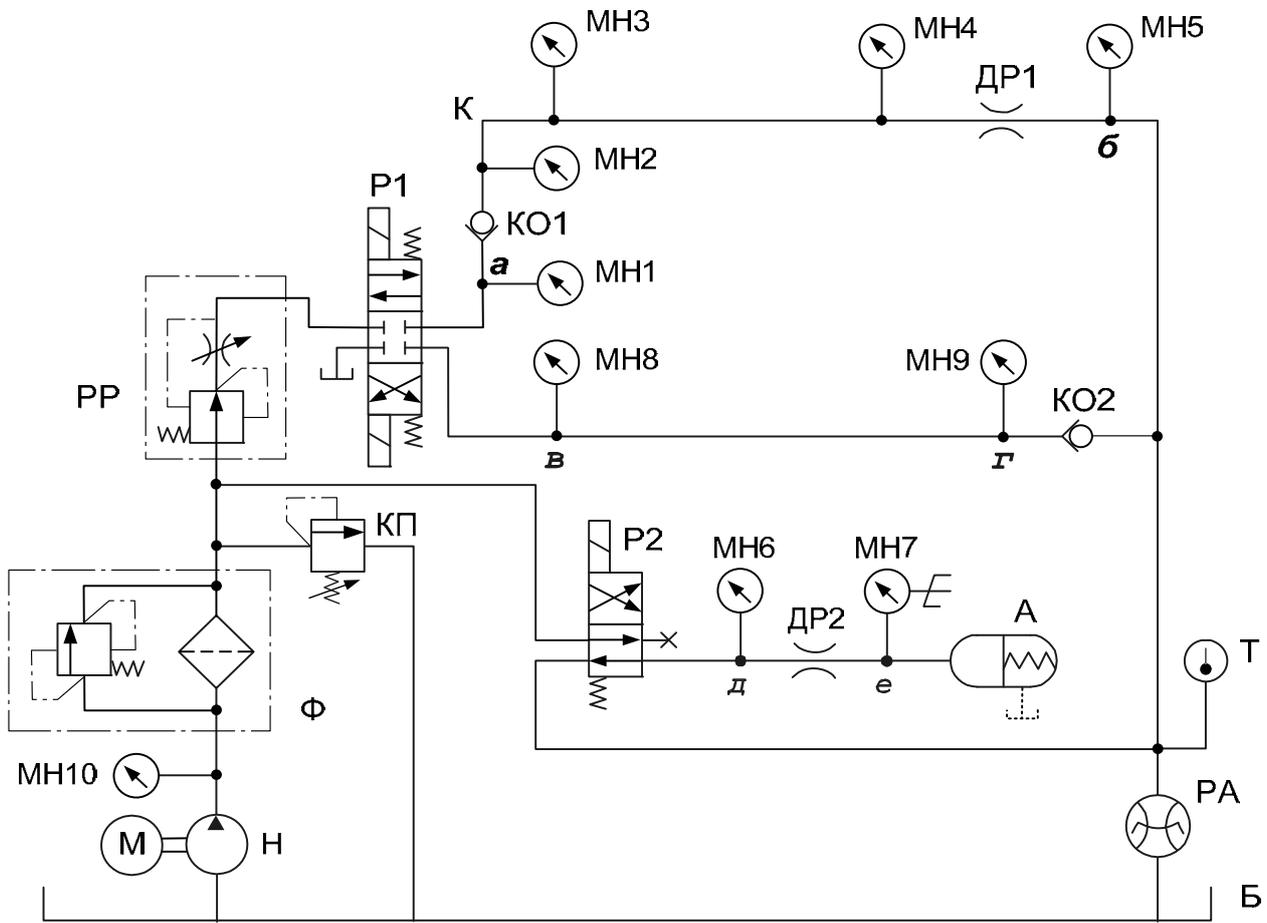


Рисунок 2.1 – Схема гидравлическая принципиальная

Гидрораспределитель Р1 – трехпозиционный, а Р2 – двухпозиционный. Управление гидрораспределителями осуществляется с помощью тумблеров (тумблеры установлены на панели и обозначены так же, как и распределители, для управления которых они служат).

Электронный секундомер (обозначен на панели «СЕК») имеет цифровую индикацию результатов счета. У секундомера возможны два режима работы – ручной и автоматический (указанные режимы работы устанавливаются тумблером на верхней панели).

При установке тумблера в положение «Ручн.» секундомер используется для определения времени прохождения через расходомер РА заданного объема жидкости (с тем, чтобы в дальнейшем определять расход жидкости в трубопроводе).

Питание секундомера включается тумблером «Вкл.», начало отсчета времени – тумблером «Счет», сброс показаний электронного табло – кнопкой «Сброс». При нажатии кнопки «Сброс». При нажатии кнопки «Сброс» секундомер не должен производить отсчет времени, т. е. тумблер «Счет» необходимо перед этим устанавливать в нижнее положение.

При установке тумблера установки режима работы в положение «Авт.» секундомер используется для подсчета времени заполнения и опорожнения рабочей полости пружинного гидроаккумулятора А (при этом должно быть включено питание секундомера и счет, т. е. тумблеры постоянно установлены в положение «Вкл.» и «Счет»). Включением и выключением секундомера управляет электроконтактный манометр МН9. После завершения процесса заполнения или опорожнения рабочей полости аккумулятора А фиксируется время процесса, а затем, нажав кнопку «Сброс», можно сбросить показание табло.

Внешний вид стенда показан на рисунке 2.2. Стенд имеет сборную рамную (из алюминиевого профиля) конструкцию, имеющую односторонний базис, на котором установлены три панели, содержащие:

- органы управления стендом и его устройствами;
- гидравлическую аппаратуру и объекты исследований;
- информационно-измерительную систему;
- гидравлическую принципиальную схему стенда.

Несущей конструкцией стенда является гидробак Б с установленными на нем электродвигателем М, насосом Н, напорным гидроклапаном КП. На выходе насоса для контроля давления установлен манометр МН10. Гидронасос Н установлен внутри гидробака.

На верхней панели стенда установлены световые индикаторы включения электродвигателя привода насоса и рабочих положений гидрораспределителей Р1 и Р2.

Номинальное давление в гидравлической системе стенда 1,8 МПа (максимальное до 2 МПа). Давление устанавливается с помощью регулировочного винта, установленного на напорном гидроклапане КП. Винт должен быть надежно зафиксирован с помощью контргайки.

**Внимание!** При попытке установки на стенде более высокого уровня давления из строя могут выйти манометры.

Напряжение питания стенда – 380 В, 50 Гц. Напряжение питания электромагнитов гидрораспределителей – 24 В (постоянный ток).

Для заправки гидросистемы необходимо 60...65 дм<sup>3</sup> масла. В качестве рабочей жидкости используется минеральное масло МГЕ-46В.



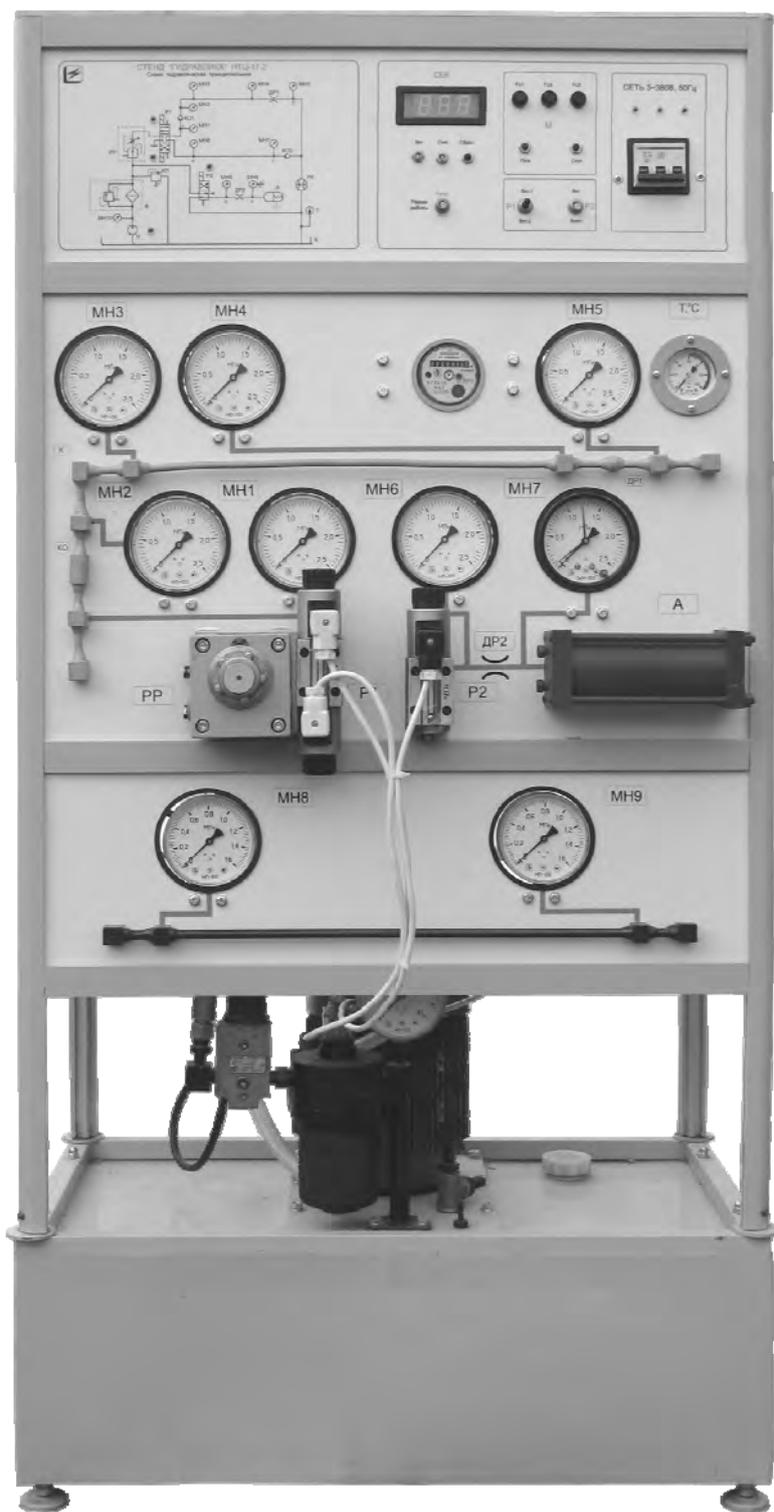


Рисунок 2.2 – Общий вид станда

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

#### Цель работы:

- ознакомление с физической сущностью основных величин гидравлики и пневматики, единицами и средствами, используемыми для их измерения;
- ознакомление с режимами течения жидких и газообразных сред и методикой их определения;
- уяснение зависимости потерь энергии от режима течения жидкости;
- экспериментальное определение режимов течения жидкости.

#### 3.1 Краткие теоретические сведения

Основными величинами гидравлики и пневматики являются давление  $p$  и расход (объемный)  $Q$ . Известно, что между системами различной физической природы существуют аналоги, которые показаны в таблице 3.1. В столбцах записаны **величины – аналоги**. Например, аналогом давления в электрических системах является напряжение  $U$ , а аналогом расхода – сила тока  $I$ . Размерности величин в таблице 3.1 приведены в СИ.

Таблица 3.1 – Основные величины систем различной физической природы и их аналоги

Тип системы		Основная величина	
Гидравлические и пневматические системы		$p$ – давление, Па	$Q$ – расход (объемный), м <sup>3</sup> /с
Электрические системы		$U$ – напряжение, В	$I$ – сила тока, А
Механические системы	Поступательного движения	$F$ – сила, Н	$v$ – скорость, м/с
	Вращательного движения	$M$ – момент, Н·м	$\omega$ – угловая скорость, с <sup>-1</sup>

Произведение основных величин для всех типов систем, приведенных в каждой строке таблицы 3.1, представляет собой не что иное, как **мощность** (в ваттах), т. е.

$$N = p Q \quad (N = U I; N = F v; N = M\omega) .$$

Таким образом, давление и расход являются важнейшими величинами. Для успешного решения задач проектирования и эксплуатации гидравлических и пневматических систем необходимо хорошо представлять, что такое давление и расход, какими они бывают, в чем и как их измеряют.

**3.1.1 Давление.** **Давление** – это напряжение, возникающее в жидкости или газе в результате действия сжимающих сил и сил трения.



Если система находится в состоянии покоя, то силы трения равны нулю. В этом случае давление иногда называют **гидростатическим**. Гидростатическое давление представляет собой не что иное, как напряжение сжатия. Важнейшим свойством гидростатического давления является его изотропность. Это означает, что давление в данной точке пространства во всех направлениях одинаково. В динамике из-за сил трения давление, строго говоря, изотропностью не обладает. Однако эта особенность при решении большинства прикладных инженерных задач не учитывается.

Различают давление среднее и давление в точке. Чаще всего используют среднее давление, которое равно

$$p = \frac{F}{A}, \quad (3.1)$$

где  $F$  – сила сжатия, приходящаяся на поверхность площадью  $A$ .

Давление бывает абсолютным  $p_{абс}$ , избыточным  $p_{изб}$  и вакуумметрическим  $p_{вак}$  (рисунок 3.1).

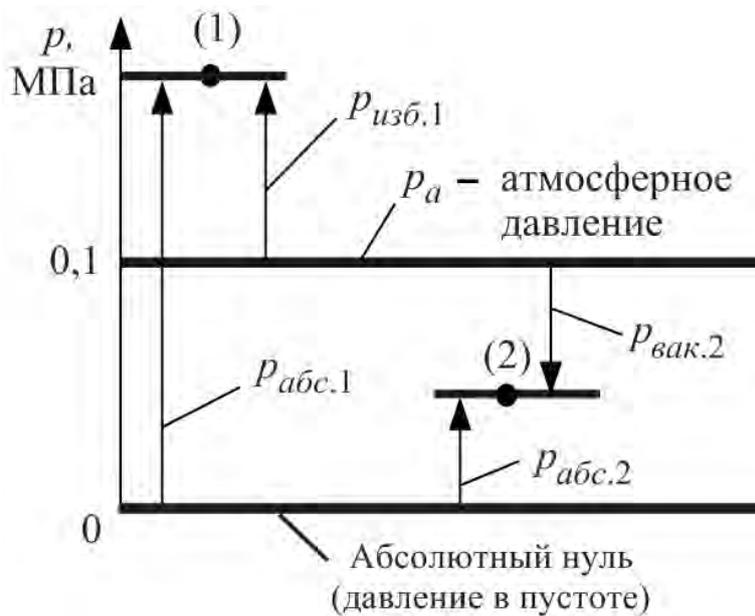


Рисунок 3.1 – Виды давлений

**Абсолютное давление**  $p_{абс}$  отсчитывается от абсолютного нуля, за который принято давление в пустоте. Абсолютное давление может быть только положительным.

**Избыточное давление**  $p_{изб}$  отсчитывается от нуля, за который принято атмосферное давление  $p_a$ .

Величина атмосферного давления  $p_a$  зависит от ряда факторов: высоты над уровнем моря, погодных условий и др.

При решении большинства инженерных задач атмосферное давление  $p_a$  можно считать постоянной величиной, равной 0,1 МПа (750 мм рт. ст.).

Поскольку большинство объектов находится в условиях атмосферного давления, то чаще всего на практике используют избыточное давление.

Связь избыточного и абсолютного давления устанавливается следующим выражением:

$$p_{изб} = p_{абс} - p_a \quad (3.2)$$

При  $p_{абс} < p_a$  избыточное давление является отрицательным. Давление в этом случае называют **вакуумметрическим** (отрицательным избытком над атмосферой, вакуумом).

Вакуумметрическое давление

$$p_{вак} = p_a - p_{абс} \quad (3.3)$$

Вакуумметрическое давление отсчитывается от атмосферного в сторону абсолютного нуля.

Предположим, что давление в системе соответствует точке 1 (см. рисунок 3.1). Это давление можно характеризовать абсолютным давлением –  $p_{абс.1}$ , а также избыточным давлением –  $p_{изб.1}$ .

Как видно из рисунка 3.1, давление  $p_{абс.1}$  больше  $p_{изб.1}$  на величину атмосферного давления, т. е. на 0,1 МПа. В точке 2 абсолютное давление  $p_{абс.2}$  меньше атмосферного. Поэтому давление в точке 2 можно характеризовать следующими давлениями: абсолютным  $p_{абс.2}$  или вакуумметрическим  $p_{вак.2}$ . Связь между ними устанавливается выражением (3.3). Как видно из рисунка 3.1, вакуумметрическое давление может изменяться в пределах 0...0,1 МПа. Абсолютному нулю соответствует давление  $p_{вак} = 0,1$  МПа.

За единицу давления в международной системе единиц (СИ) принят паскаль – давление, вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м<sup>2</sup>. Наряду с этой единицей давления применяют более крупные единицы: килопаскаль и мегапаскаль:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 10^{-3} \text{ кПа} = 10^{-6} \text{ МПа}.$$

В технике для измерения давления используют также внесистемные единицы – атмосферу техническую и бар:

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 98100 \text{ Па};$$

$$1 \text{ бар} = 10^5 \cdot \text{Па} = 1,02 \text{ ат}.$$

Давление также можно условно выражать высотой столба жидкости над рассматриваемой точкой. При этом высота столба жидкости определяется из выражения



$$h = \frac{P}{\gamma}, \quad (3.4)$$

где  $\gamma$  – удельный вес жидкости.

Как следует из (3.4), одно и то же давление, в зависимости от рода жидкости, может быть создано столбом различной высоты. Так, например, давление, равное 1 ат, создается столбом воды высотой 10 м, ртути – 0,736 м, т. е.

$$1 \text{ ат} = 10 \text{ м вод. ст.} = 736 \text{ мм рт. ст.}$$

Существует также единица измерения давления – атмосфера физическая

$$1 \text{ атм} = 101325 \text{ Па} = 10,33 \text{ м вод. ст.} = 760 \text{ мм рт. ст.}$$

Для измерения давления жидкостей и газов используют **пьезометры**, а также жидкостные, механические и электрические **манометры** [1, 2]. В технике для измерения давления наибольшее применение находят механические и электрические манометры.

Механические манометры бывают двух типов – пружинные и мембранные. Принцип их действия основан на деформации полой пружины или мембраны под действием измеряемого давления. Через преобразующий механизм эта деформация передается стрелке, которая показывает величину измеряемого давления на циферблате.

В электрическом манометре деформация мембраны передается на потенциометр, что приводит к изменению его электрического сопротивления. Потенциометр включен в электрическую измерительную схему.

С помощью **манометров** измеряют **избыточное давление**.

Для измерения **вакуумметрического давления** используют **вакуумметры**.

Существуют также комбинированные приборы – **мановакуумметры**, которые позволяют измерять как **избыточное**, так и **вакуумметрическое** давление.

Манометры, вакуумметры и мановакуумметры имеют одинаковый принцип действия. Ряд параметров и характеристик этих приборов регламентирован ГОСТ и другими нормативными документами [2].

Важнейшей характеристикой манометра является **класс точности** (указывается на циферблате). Манометры бывают следующих классов точности: 0,1; 0,15; 0,25; 0,4; 0,6; 1; 1,5; 2,5; 4.

Допустимая ошибка измерения давления манометром:

$$\Delta = \frac{K \cdot P}{100}, \quad (3.5)$$

где  $K$  – класс точности манометра;

$P$  – верхний предел измерения давления.

Для измерения давления с повышенной точностью используют **образцовые манометры**. Образцовые манометры имеют класс точности 0,1; 0,15; 0,25 или 0,4.



**3.1.2 Расход.** Второй важнейшей величиной гидравлики и пневматики является расход. Это количество жидкости (газа), проходящей через живое сечение потока в единицу времени.

Различают **объемный**  $Q$ , м<sup>3</sup>/с; **весовой**  $Q_G$ , Н/с, и **массовый**  $Q_M$ , кг/с, **расходы**.

Основной величиной в гидравлике является **объемный расход**. Для измерения объемного расхода часто используется внесистемная единица – литр в минуту.

Весовой и массовый расходы связаны с объемным следующими зависимостями:

$$Q_G = \gamma Q; \quad Q_M = \rho Q, \quad (3.6)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости (газа).

Измерение расхода может осуществляться различными способами [2, 3].

Наиболее простым способом измерения расхода является объемный с помощью мерного бака. Суть его заключается в том, что измеряется время  $t$  прохождения через систему определенного объема жидкости  $W_{жс}$ , которая поступает в мерный бак. Зная  $W_{жс}$  и  $t$ , затем вычисляют объемный расход, который равен

$$Q = W_{жс}/t. \quad (3.7)$$

На практике наиболее широкое применение для измерения расхода находят **расходомеры**, которые бывают двух типов: **объемные** и **скоростные** [2]. Следует также учитывать, что расходомеры могут быть интегрирующего типа, а могут измерять мгновенное значение расхода.

Принцип действия **объемных расходомеров** основан на попеременном заполнении и опорожнении рабочей (рабочих) камеры (камер). Число заполнений или опорожнений, подсчитываемое с помощью специальных устройств (механических, электрических), характеризует расход через систему. Достоинством объемных расходомеров является высокая точность измерения: максимальная относительная погрешность не превышает 1 %. Недостаток – громоздкость и сложность конструкций, а для некоторых расходомеров – невозможность применения для загрязненных жидкостей.

Объемные расходомеры бывают различных типов: дисковые, поршневые, шестеренные, кольцевые и лопастные.

Принцип действия **скоростных расходомеров** основан на том, что жидкость, протекающая через прибор, приводит во вращение крыльчатку или вертушку, частота вращения которой пропорциональна скорости потока и, следовательно, расходу. Ось крыльчатки или вертушки посредством передаточных механизмов соединена со счетчиком.



Скоростные расходомеры по конструкции проще объемных, но обладают меньшей точностью измерений. Максимальная относительная погрешность измерений может достигать 2...3 %.

По конструктивному признаку скоростные расходомеры подразделяются на крыльчатые и турбинные. Ниже при выполнении работы используется скоростной крыльчатый расходомер.

**3.1.3 Режимы течения жидкости.** Исследованиями ученых (Г. Хаген – 1869 г., Д. И. Менделеев – 1880 г., О. Рейнольдс – 1881–1883 гг.) установлено существование двух режимов течения жидкости: **ламинарного** и **турбулентного**.

**Ламинарным** называется такой режим, при котором поток жидкости движется отдельными струйками или слоями, и траектории отдельных частиц жидкости между собой не пересекаются; линии тока совпадают с траекториями частиц.

**Турбулентным** называется такой режим, при котором течение является возмущенным, частицы жидкости перемешиваются, а траектории частиц представляют сложные линии, пересекающиеся между собой.

Наличие ламинарного или турбулентного режима зависит от скорости движения, вязкости жидкости и от геометрических размеров живого сечения потока.

При постепенном увеличении средней скорости движение сохраняется ламинарным лишь до определенной скорости, после которой наступает турбулентный режим.

Переход от ламинарного режима к турбулентному происходит при так называемой верхней критической скорости  $v_{кр.в.}$ . Обратный переход от турбулентного режима к ламинарному происходит при нижней критической скорости  $v_{кр.н.}$ . Причем  $v_{кр.н.} < v_{кр.в.}$ . Однако в связи с тем, что движение между  $v_{кр.н.}$  и  $v_{кр.в.}$  неустойчивое, часто считают, что переход от ламинарного режима к турбулентному и от турбулентного режима к ламинарному происходит при одном и том же значении критической скорости  $v_{кр.} = v_{кр.н.}$ .

Для определения режима движения жидкости используется безразмерный критерий, который называют **числом Рейнольдса** и обозначают символом  $Re$ .

Для напорного движения в круглых трубах

$$Re = \frac{v d}{\nu}, \quad (3.8)$$

где  $v$  – средняя скорость движения потока жидкости, м/с;

$d$  – диаметр трубы, м;

$\nu$  – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с.

Для потоков некруглого сечения в формулу (3.8) вместо  $d$  подставляют так называемый гидравлический диаметр  $D$ .

Смене режимов движения соответствует численное значение числа Рейнольдса, которое называют **критическим**:  $Re_{кр} = 2320$ .



При  $Re < 2320$  режим движения ламинарный, а при  $Re > 2320$  – турбулентный.

Режимом движения интересуются из энергетических соображений. На рисунке 3.2 показана зависимость потерь напора (удельной энергии) на трение  $h_m$  от числа Рейнольдса.

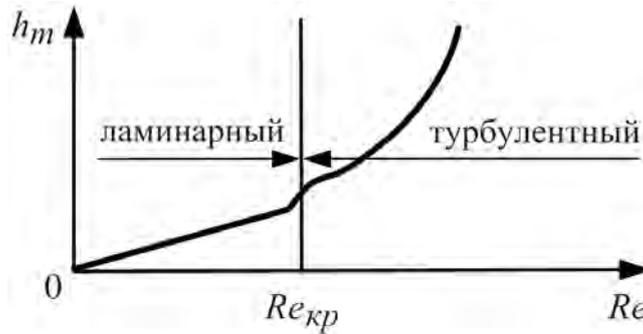


Рисунок 3.2 – Зависимость потерь напора (удельной энергии) на трение  $h_m$  от числа Рейнольдса  $Re$

Таким образом, как видно из рисунка 3.2, при ламинарном режиме течения потери энергии на трение меньше, чем при турбулентном режиме. При расчетах гидравлических систем приходится постоянно контролировать режим течения (определять  $Re$ ) для того, чтобы определить потери энергии на трение.

Режим течения газа определяется также на основе использования критерия (3.8).

### 3.2 Проведение испытаний

Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо изучить разд. 1 и 2.

Объектом испытаний в данной работе является стальной трубопровод на участке  $вг$  (см. рисунок 2.1). Для этого участка трубопровода необходимо научиться экспериментально определять режимы течения жидкости.

**3.2.1 Подготовка установки к работе.** Перед включением стенда необходимо убедиться, что:

- маховик управления регулятором расхода  $РР$  полностью вывернут против часовой стрелки (указатель положения маховика установлен в позицию «1»);
- тумблеры управления гидрораспределителями  $Р1$  и  $Р2$  установлены в положение «Выкл.»;
- тумблер установки режима работы электронного секундомера установлен в положение «Ручн.», а тумблер включения питания секундомера установлен в нижнее положение.

**3.2.2 Определение режима течения жидкости.** Включить электрическое питание стенда («Сеть»), электродвигателя  $М$  (кнопка «Пуск»), питание электронного секундомера (тумблер установить в положение «Вкл.»). Дать возмож-

ность поработать стенду в течение 3...5 мин.

Включить тумблер Р1 в нижнее положение «Вкл. 2». При этом жидкость от насоса через распределитель Р1 будет поступать к трубопроводу, установленному на нижней панели (участок **в2**, в начале этого участка установлен манометр МН8, а в конце – манометр МН9).

При различных настройках регулятора расхода провести шесть опытов. В каждом опыте необходимо измерять:

– время  $t$  прохождения через расходомер объема жидкости  $W_{жс}$ , с. Объемом  $W_{жс}$  необходимо задаться, приняв его, например, равным во всех опытах  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  (5 л);

– температуру рабочей жидкости  $T$ , °С (по термометру);

– давления  $p_8$  и  $p_9$ , МПа (по манометрам МН8 и МН9).

Результаты измерений занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты исследований

Номер опыта	1	2	3	4	5	6
Время $t$ прохождения через расходомер объема $W_{жс}$ , с						
Объем $W_{жс}$ , м <sup>3</sup>	$5 \cdot 10^{-3}$					
Температура рабочей жидкости $T$ , °С						
Давление $p_8$ (МН8), МПа						
Давление $p_9$ (МН9), МПа						
Расход $Q$ , м <sup>3</sup> /с						
Средняя скорость $v$ , м/с						
Кинематическая вязкость $\nu$ , м <sup>2</sup> /с						
Число Рейнольдса $Re$						
Режим течения						
Мощность потока $N_8$ , Вт						
Мощность потока $N_9$ , Вт						

### 3.3 Обработка результатов

Расход  $Q$  определяется по формуле (3.7).

Средняя скорость потока

$$v = Q / A_{mp} ,$$

где  $A_{mp}$  – площадь сечения трубопровода, м<sup>2</sup>.

Внутренний диаметр трубопровода  $d = 0,8 \cdot 10^{-2}$  м (8 мм).

Кинематическая вязкость  $\nu$  определяется по графику  $\nu = f(T)$ , который имеется в лаборатории (в качестве рабочей жидкости на стенде используется масло для гидрообъемных передач МГЕ-46 В).



Число Рейнольдса определяется по формуле (3.8).

Мощность потока в сечениях 8–8 и 9–9 равны:

$$N_8 = p_8 Q; \quad N_9 = p_9 Q.$$

При определении режима течения следует исходить из того, что если определенное в опыте число Рейнольдса меньше критического значения  $Re_{кр}$ , то режим течения ламинарный. Для труб круглого сечения  $Re_{кр} = 2320$ . При  $Re > Re_{кр}$  – режим течения турбулентный.

После заполнения таблицы 3.2 необходимо по формуле (3.5) определить допустимые ошибки измерения для всех типов манометров, установленных на стенде. Полученные результаты необходимо привести в отчете.

### **Контрольные вопросы**

1 Основные величины гидравлики, аналогии между системами различной физической природы.

2 Давление: физическая сущность; абсолютное, избыточное, вакуумметрическое давление, способы, приборы и единицы измерения.

3 Расход: физическая сущность; объемный, весовой и массовый расходы, способы, приборы и единицы измерения.

4 Режимы течения жидкости и газов, необходимость и методика их определения.

5 Влияние режима течения на потери энергии на трение по длине трубопровода.

6 Определение мощности в гидравлических системах.

7 Оценка допустимой погрешности измерения давления манометром.

## **4 Лабораторная работа № 2. Построение напорной и пьезометрической линий трубопровода**

### **Цель работы:**

- уяснить физическую сущность полного напора и всех его составляющих: геометрического, пьезометрического и скоростного напоров;
- уяснить физическую сущность закона Бернулли;
- построить напорную и пьезометрические линии трубопровода;
- построить графические зависимости изменения мощности потока по длине трубопровода.



#### 4.1 Краткие теоретические сведения

Основное назначение жидкости, используемой в машиностроительном гидроприводе, – **перенос энергии** от одного элемента к другому, в общем случае – от источника энергии к исполнительному устройству.

Для характеристики энергетического состояния потока в гидравлике применяется специальный показатель, который называют **полным напором** и обозначают буквой  $H$  (измеряется в метрах).

**Полный напор** представляет собой полную удельную (в расчете на единицу веса) энергию.

Полный напор в  $i$ -м сечении равен

$$H_i = h_{z,i} + h_{n,i} + h_{c,i}, \quad (4.1)$$

где  $h_{z,i}$  – геометрический напор в  $i$ -м сечении, м;

$h_{n,i}$  – пьезометрический напор в  $i$ -м сечении, м;

$h_{c,i}$  – скоростной напор в  $i$ -м сечении, м.

Входящие в  $H_i$  напоры равны:

$$h_{z,i} = z_i; \quad h_{n,i} = \frac{p_i}{\rho g}; \quad h_{c,i} = \frac{\alpha_i v_i^2}{2g},$$

где  $z_i$  – вертикальная координата  $i$ -го сечения трубопровода, м;

$p_i$  – давление в  $i$ -м сечении, Па;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$v_i$  – средняя скорость потока в  $i$ -м сечении, м/с;

$\alpha_i$  – коэффициент Кориолиса, определенный для  $i$ -го сечения.

Чаще всего выражение для полного напора (4.1) записывают в виде:

$$H_i = z_i + \frac{p_i}{\rho g} + \frac{\alpha_i v_i^2}{2g}. \quad (4.2)$$

Геометрический и пьезометрический напоры выражают удельную потенциальную энергию положения и давления жидкости соответственно. Скоростной напор представляет собой удельную кинетическую энергию потока.

При движении жидкости по трубопроводу происходит постоянное преобразование ее удельной энергии, постоянный переход одного вида удельной энергии в другой (рисунок 4.1). При изменении геодезической высоты потока геометрический напор  $h_z$  обратимо переходит в пьезометрический  $h_n$ , при изменении живого сечения – пьезометрический напор  $h_n$  переходит в скорост-



ной  $h_c$  и наоборот, и лишь переход пьезометрического  $h_n$  в потерянный напор  $h_{nom}$  происходит необратимо.

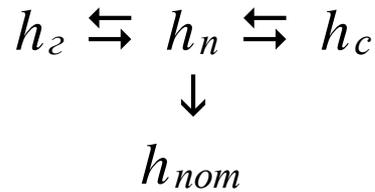


Рисунок 4.1 – Схема преобразования напоров

Связь между значениями удельной энергии в двух сечениях трубопровода на установившихся режимах устанавливается **уравнением Бернулли**, которое выражает **закон сохранения энергии для гидравлических систем** и записывается в следующем виде [1–3]:

$$z_i + \frac{p_i}{\rho g} + \alpha_i \frac{v_i^2}{2g} = z_{i+1} + \frac{p_{i+1}}{\rho g} + \alpha_{i+1} \frac{v_{i+1}^2}{2g} + h_{nom.i,i+1}. \quad (4.3)$$

Потерянный напор  $h_{nom.i,i+1}$ , выражаемый, как и другие напоры, в метрах, расходуется на преодоление гидравлических сопротивлений, расположенных между  $i$ -м и  $(i+1)$ -м сечениями трубопровода. Потери напора в гидравлических сопротивлениях бывают двух типов:

- 1) по длине трубопровода (линейные потери);
- 2) потери на местных сопротивлениях (местные потери).

Линия, характеризующая закон распределения полного напора по длине потока, называется **напорной линией**. Полный напор всегда уменьшается в направлении течения жидкости. Наклон этой линии (изменение на единицу длины трубопровода) называется **гидравлическим уклоном**.

Линия, характеризующая закон распределения удельной потенциальной энергии потока ( $z_i + p_i/(\rho g)$ ), называется **пьезометрической линией**. Наклон этой линии называется **пьезометрическим уклоном**.

Мощность и полный напор связаны следующим выражением:

$$N_i = H_i Q_{Gi} = H_i \gamma Q_i, \quad (4.4)$$

где  $Q_{Gi}$  – весовой расход, Н/с;

$\gamma$  – удельный вес жидкости, Н/м<sup>3</sup>;

$Q_i$  – объёмный расход, м<sup>3</sup>/с.

Потери мощности  $\Delta N_{i,i+1}$  между  $i$ -м и  $(i+1)$ -м сечениями трубопровода вычисляются из следующего выражения:

$$\Delta N_{i,i+1} = \gamma h_{nom.i,i+1} Q_i, \quad (4.5)$$



где  $Q_i$  – расход жидкости (объемный) на участке, заключенном между  $i$ -м и  $(i+1)$ -м сечениями ( $Q_i = Q_{i+1}$ ).

Потерянный напор

$$h_{ном. i, i+1} = H_i - H_{i+1}. \quad (4.6)$$

## 4.2 Проведение испытаний

Прежде, чем приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо изучить разд. 1 и 2.

**Объектом испытаний** в данной работе является стальной трубопровод (от сечения 1–1 до сечения 5–5), схема которого представлена на рисунке 4.2.

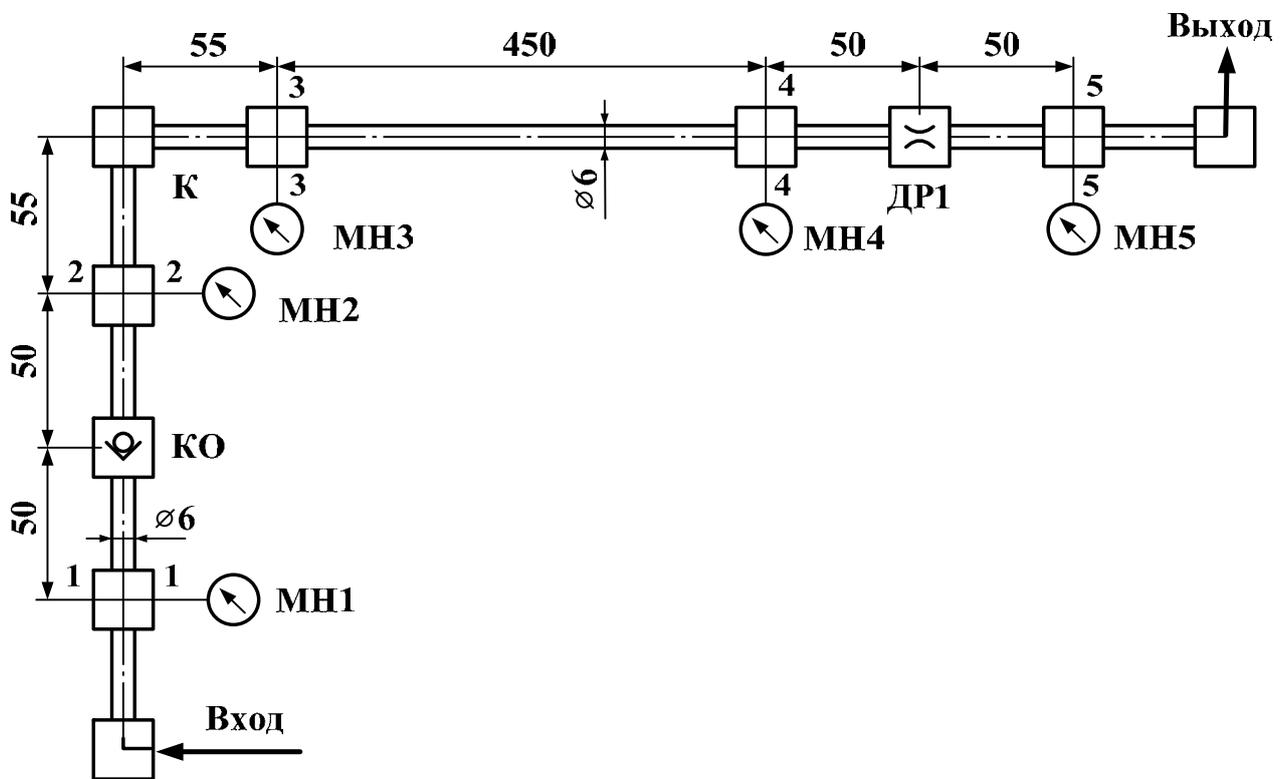


Рисунок 4.2 – Схема исследуемого трубопровода

Общая протяженность исследуемого трубопровода 760 мм (0,76 м). Размеры на схеме приведены в миллиметрах. Трубопровод содержит три местных сопротивления: клапан обратный КО (без пружины), колено К (поворот на 90 град), нерегулируемый гидродроссель ДР1. К пяти сечениям подключены манометры МН1–МН5.

**4.2.1 Подготовка установки к работе.** Перед включением стенда необходимо убедиться, что:

– маховик управления регулятора расхода РР полностью вывернут против часовой стрелки (указатель положения маховика установлен в позицию «1»);

– тумблеры управления гидрораспределителями P1 и P2 установлены в положение «Выкл.»;

– тумблер установки режима работы электронного секундомера установлен в положение «Ручн.», а тумблер включения питания секундомера установлен в нижнее положение.

**4.2.2 Проведение эксперимента.** Включить электрическое питание стенда («Сеть»), электродвигателя М (кнопка «Пуск»), питание электронного секундомера (тумблер установить в положение «Вкл.»). Дать возможность поработать стенду в течение 3...5 мин.

Включить тумблер P1 в верхнее положение «Вкл. 1». При этом жидкость от насоса через распределитель P1 направляется к исследуемому трубопроводу (установлен на средней панели стенда).

При различных настройках регулятора расхода РР провести два опыта. Первый опыт проводить при минимальном, а второй – при максимальном расходе (смотреть по расходомеру РА).

В каждом опыте необходимо измерять:

– давления  $p_1$ – $p_5$  по манометрам МН1–МН5;

– время  $t$  прохождения через расходомер объема жидкости  $W_{жс}$ , с.

Объемом  $W_{жс}$  необходимо задаться, приняв его, например, равным в обоих опытах  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  (5 л);

– температуру рабочей жидкости  $T$ , °С (по термометру).

Результаты измерений занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты исследований

Номер опыта	1					2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Номер сечения трубопровода $i$										
Величина давления $p_i$ , МПа										
Объем жидкости, проходящей через расходомер $W_{жс}$ , $\text{м}^3$	$5 \cdot 10^{-3}$					$5 \cdot 10^{-3}$				
Время прохождения объема $W_{жс}$ через расходомер $t$ , с										
Температура жидкости $T$ , °С										
Расход жидкости $Q$ , $\text{м}^3/\text{с}$										
Средняя скорость $v$ , м/с										
Кинематическая вязкость $\nu$ , $\text{м}^2/\text{с}$										
Число Рейнольдса $Re$										
Коэффициент Кориолиса $\alpha$										
Геометрический напор $z_i$ , м										
Пьезометрический напор $p_i/(\rho g)$ , м										
Скоростной напор $\alpha v^2/(2g)$ , м										
Удельная потенциальная энергия потока $z_i + p_i/(\rho g)$ , м										
Полный напор $H_i$ , м										
Мощность потока $N_i$ , Вт										



### 4.3 Обработка результатов

Расход жидкости в трубопроводе

$$Q = W_{жс} / t.$$

Средняя скорость потока

$$v = \frac{Q}{A_{mp}},$$

где  $A_{mp}$  – площадь сечения трубопровода, м<sup>2</sup>.

Во всех сечениях скорости одинаковые, поскольку диаметр трубопровода  $d$  во всех сечениях 6 мм.

Кинематическая вязкость  $\nu$  определяется по графику  $\nu = f(T)$ , который имеется в лаборатории (в качестве рабочей жидкости на стенде используется масло для гидрообъемных передач МГЕ-46 В).

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{v d}{\nu}.$$

Коэффициент Кориолиса  $\alpha$  при  $Re < 2320$  равен 2, а при  $Re > 2320$  –  $\alpha \approx 1$ .

Геометрические напоры  $z_i$  равны значениям вертикальных координат (в выбранной системе координат). В данной работе рекомендуется плоскость сравнения расположить таким образом, чтобы сечение 1–1 находилось в этой плоскости. Тогда расстояние от центра сечения трубопровода до плоскости сравнения будет равно геометрическому напору  $z_i$ .

При вычислении пьезометрических напоров  $p_i / (\rho g)$  плотность масла (МГЕ-46 В) принять 890 кг/м<sup>3</sup>.

При вычислении скоростного (динамического) напора коэффициент Кориолиса во всех опытах величина постоянная.

Полный напор  $H_i$  и мощность потока  $N_i$  вычисляются по формулам (4.2) и (4.4).

Результаты вычислений занести в таблицу 4.1 и построить для **обоих опытов** напорную и пьезометрические линии трубопровода  $H = f_1(l_{mp})$ ,  $z + p / (\rho g) = f_2(l_{mp})$ , а также зависимость  $N_i = f(l_{mp})$ .

При построении графиков необходимо учитывать, что начало трубопровода находится в сечении 1–1, а конец – в сечении 5–5.



### **Контрольные вопросы**

- 1 Устройство лабораторного стенда.
- 2 Физический смысл геометрического, пьезометрического, скоростного и полного напоров, методика их экспериментального определения.
- 3 Назначение и физический смысл уравнения Бернулли.
- 4 Напорная и пьезометрическая линии: назначение, методика построения.
- 5 Физический смысл гидравлического и пьезометрического уклонов.
- 6 Связь полного напора и мощности.
- 7 Определение потерь напора и мощности.

## **5 Лабораторная работа № 3. Определение коэффициентов местных гидравлических сопротивлений**

### **Цель работы:**

- изучение методики экспериментального определения коэффициентов местных гидравлических сопротивлений;
- экспериментальное определение коэффициентов сопротивления обратного клапана, колена, постоянного гидродресселя;
- установление зависимости коэффициентов местных гидравлических сопротивлений от режимов течения жидкости.

### **5.1 Краткие теоретические сведения**

**Местные гидравлические сопротивления** – это устройства или короткие участки трубопроводов, на которых имеют место **существенные потери энергии**, обусловленные изменениями скорости потока по величине и (или) направлению и возникновением вихревых зон.

При выполнении расчетов гидравлических систем считают, что местные гидравлические сопротивления не имеют протяженности и сосредоточены в точках.

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

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



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

Потери напора в местных сопротивлениях в большинстве случаев могут быть вычислены по формуле Вейсбаха [3, 4]:

$$h_m = \zeta_m \frac{v^2}{2g}, \quad (5.1)$$

где  $\zeta_m$  – коэффициент местного сопротивления (величина безразмерная);

$v$  – средняя скорость в сечении трубопровода перед местным сопротивлением или после него (так, например, для внезапного расширения, чаще всего, скорость принимается в сечении перед ним, а для внезапного сужения – наоборот, в сечении после него).

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

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

Экспериментальное определение  $\zeta_m$  осуществляется на основе уравнения Вейсбаха (5.1).

Рассмотрим методику экспериментального определения коэффициента местного сопротивления. Местное сопротивление (обозначено буквой «М») может быть любого типа. Схема приведена на рисунке 5.1.

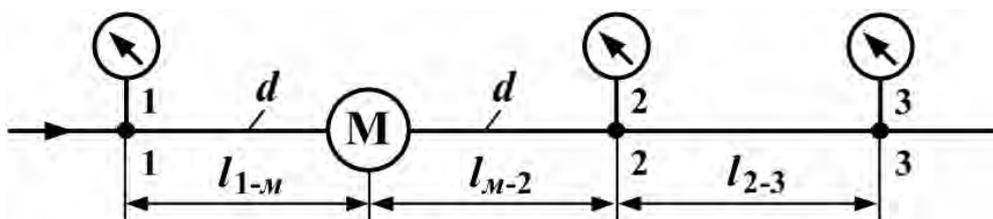


Рисунок 5.1 – Схема к определению  $\zeta_m$

В связи со сложностью процессов, протекающих в местных сопротивлениях (разрушение структуры потока, образование вихрей и т. д.), с целью повышения точности эксперимента рекомендуется измерять пьезометрические напоры или давления не непосредственно у местного сопротивления, а на неко-

тором удалении от него. То есть измерения должны производиться в сечениях со стабилизированной, восстановившейся структурой потока. Включать измерители (пьезометры или манометры) рекомендуют на удалении с обеих сторон от местного сопротивления  $M - (10...50)d$ , где  $d$  – внутренний диаметр трубопровода. Следовательно,  $l_{1-M} = l_{M-2} = (10...50)d$  (см. рисунок 5.1).

При определении  $\zeta_M$  возможны два случая:  $d_1 = d_2$ ;  $d_1 \neq d_2$ , где  $d_1$  и  $d_2$  – диаметры трубопроводов (внутренние) на входе и выходе местного сопротивления соответственно.

Исследуемый ниже в лабораторной работе трубопровод с тремя местными сопротивлениями имеет постоянный диаметр. Поэтому рассмотрим более подробно первый случай определения  $\zeta_M$ , при котором  $d_1 = d_2 = d$ .

В результате выполнения экспериментов определяются полные напоры в сечениях, к которым подключены измерители. Следовательно, полные напоры  $H_1$  и  $H_2$  в сечениях 1–1 и 2–2 (см. рисунок 5.1) будут определены экспериментально. В связи с тем, что напоры  $H_1$  и  $H_2$  определены не непосредственно у местного сопротивления, а на некотором удалении от него, потери напора

$$H_1 - H_2 = h_M + h_{\text{дл.1-2}}, \quad (5.2)$$

где  $h_M$  – потери в местном сопротивлении (точнее было бы сказать, что это потери, обусловленные наличием местного сопротивления, т. к. эти потери возникают не только в местном сопротивлении, а и на некотором удалении от него);

$h_{\text{дл.1-2}}$  – потери на трение по длине трубопровода между сечениями 1–1 и 2–2 при течении стабилизированного потока.

Для определения  $h_{\text{дл.1-2}}$  необходимо создать контрольный участок, на котором затем определяется гидравлический уклон.

**Контрольный участок** – это участок трубопровода постоянного диаметра со стабилизированным потоком, не содержащий между начальным и конечным сечениями (к которым подключены манометры или пьезометры) местных сопротивлений. На рисунке 5.1 контрольный участок расположен между сечениями 2–2 и 3–3.

Гидравлический уклон

$$i = \frac{H_2 - H_3}{l_{2-3}}, \quad (5.3)$$

где  $H_2$ ,  $H_3$  – полные напоры в начале и в конце контрольного участка, м;

$l_{2-3}$  – длина контрольного участка, м.

Следовательно, гидравлический уклон  $i$  величина безразмерная, равная величине потерь полного напора на участке трубопровода длиной 1 м.

Тогда потери давления на трение по длине трубопровода между сечениями 1–1 и 2–2 при течении стабилизированного потока



$$h_{\text{дл.1-2}} = i l_{1-2}, \quad (5.4)$$

где  $l_{1-2}$  – расстояние между сечениями 1–1 и 2–2,  $l_{1-2} = l_{1-м} + l_{м-2}$ .

Таким образом, для экспериментального определения коэффициента местного сопротивления **необходимо**:

1) из формулы Вейсбаха (5.1) выразить  $\zeta_{м}$ :

$$\zeta_{м} = \frac{2g h_{м}}{v^2}; \quad (5.5)$$

2) экспериментально определить потери напора в местном сопротивлении  $h_{м}$  и среднюю скорость течения жидкости  $v$ , а затем вычислить  $\zeta_{м}$ .

Для нахождения  $h_{м}$  нужно определить полные напоры перед местным сопротивлением и после него  $H_{вх}$  и  $H_{вых}$ , а также гидравлический уклон  $i$  на контрольном участке.

Тогда

$$h_{м} = H_{вх} - H_{вых} - i l, \quad (5.6)$$

где  $l$  – расстояние между сечениями участка, включающего исследуемое местное сопротивление.

В случае, когда  $d_1 \neq d_2$  (решается, например, задача экспериментального определения  $\zeta_{м}$  для таких местных сопротивлений, как внезапное расширение или внезапное сужение), величина  $h_{\text{дл.1-2}}$  вычисляется из выражения

$$h_{\text{дл.1-2}} = i_1 l_{1-м} + i_2 l_{м-2}, \quad (5.7)$$

где  $i_1$  и  $i_2$  – гидравлические уклоны, определенные на контрольных участках с диаметрами  $d_1$  и  $d_2$ , т. е. в этом случае нужно создавать два контрольных участка;

$l_{1-м}$  – расстояние от сечения 1–1 до местного сопротивления (диаметр трубопровода  $d_1$ );

$l_{м-2}$  – расстояние от местного сопротивления до сечения 2–2 (диаметр трубопровода  $d_2$ ).

## 5.2 Проведение испытаний

Прежде, чем приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо изучить разд. 1 и 2.

**Объектом испытаний** в данной работе является стальной трубопровод (от сечения 1–1 до сечения 5–5), содержащий три гидравлические местные сопротивления: обратный клапан (без пружины), колено (поворот на 90 град)



и постоянный гидродроссель ДР1 (рисунок 5.2).

Размеры на схеме приведены в миллиметрах. Трубопровод содержит: клапан обратный КО (без пружины), колено (поворот на 90°) и постоянный гидродроссель ДР1 (диаметр 3 мм, толщина стенки 1,5 мм), контрольный участок (расположен между сечениями 3–3 и 4–4).

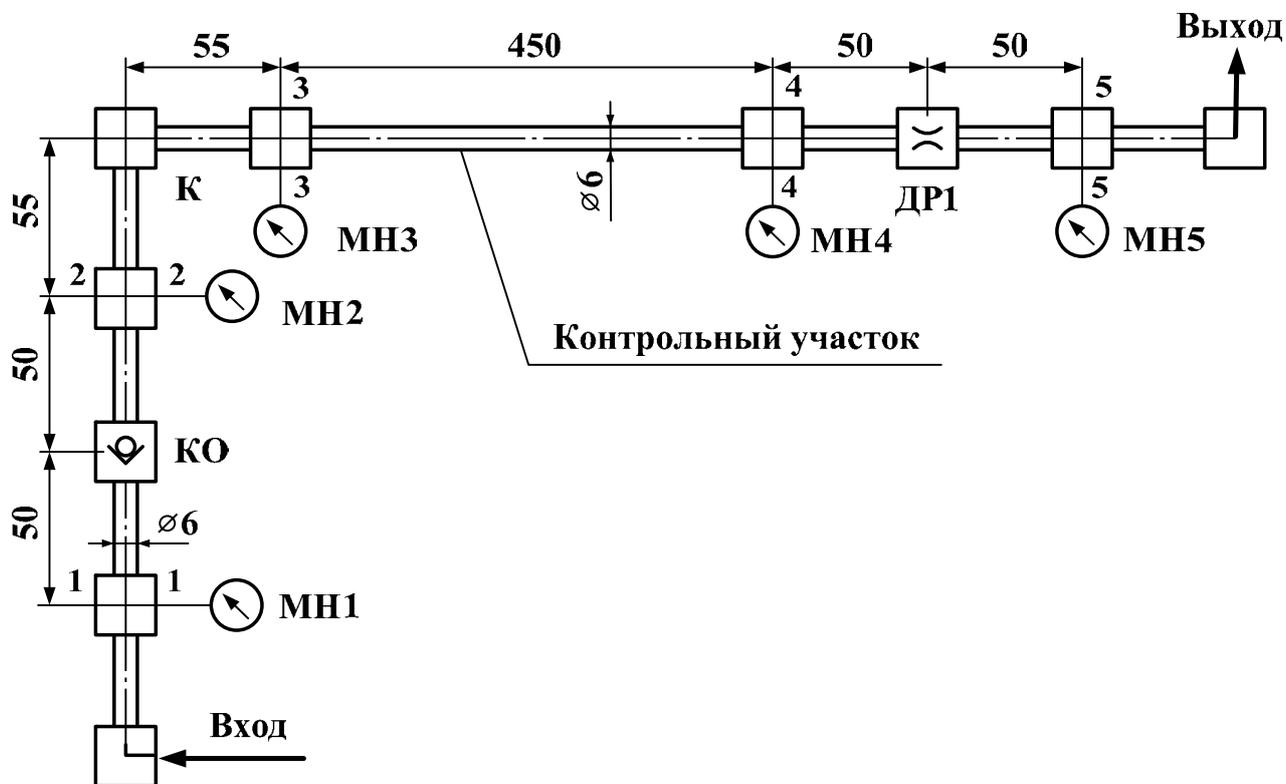


Рисунок 5.2 – Схема объекта исследований

**5.2.1 Подготовка установки к работе.** Перед включением стенда необходимо убедиться, что:

- маховик управления регулятора расхода РР полностью вывернут против часовой стрелки (указатель положения маховика установлен в позицию «1»);
- тумблеры управления гидрораспределителями Р1 и Р2 установлены в положение «Выкл.»;
- тумблер установки режима работы электронного секундомера установлен в положение «Ручн.», а тумблер включения питания секундомера установлен в нижнее положение.

**5.2.2 Проведение эксперимента.** Включить электрическое питание стенда («Сеть»), электродвигателя М (кнопка «Пуск»), питание электронного секундомера (тумблер установить в положение «Вкл.»). Дать возможность поработать стенду в течение 3...5 мин.

Включить тумблер Р1 в верхнее положение «Вкл. 1». При этом жидкость от насоса через распределитель Р1 направляется к исследуемому трубопроводу (установлен на средней панели стенда).

При различных настройках регулятора расхода РР необходимо провести четыре опыта. Первый опыт проводить при минимальном, а последний – при максимально возможном расходах (смотреть по расходомеру РА).

В каждом опыте необходимо измерять:

– давления  $p_{j1} - p_{j5}$  по манометрам МН1–МН5 (индекс  $j$  соответствует номеру опыта);

– время  $t_j$  прохождения через расходомер объема жидкости  $W_{жс}$ , с.

Объемом  $W_{жс}$  необходимо задаться, приняв его, например, равным во всех опытах  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  (5 л);

– температуру рабочей жидкости  $T_j$ , °С (по термометру).

Результаты измерений занести в таблицу 5.1.

После выполнения всех опытов необходимо отключить установку.

Таблица 5.1 – Результаты исследований

Но- мер опыта	Показания манометров МН1–МН5, МПа (цифровой индекс при $p$ соответствует номеру сече- ния и манометра)					Время про- хождения объема $W_{жс}$ через расхо- домер $t_j$ , с	Объем жид- кости $W_{жс}$ , проходящей через расхо- домер, м <sup>3</sup>	Темпера- тура рабочей жидкости $T_j$ , С°	Кинема- тическая вязкость $\nu_j$ , м <sup>2</sup> /с	Расход жидко- сти $Q_j$ , м <sup>3</sup> /с
	$p_{j1}$	$p_{j2}$	$p_{j3}$	$p_{j4}$	$p_{j5}$					
1						5 · 10 <sup>-3</sup>				
2										
3										
4										

### 5.3 Обработка результатов

Кинематическая вязкость  $\nu_j$  (см. таблицу 5.1) определяется при  $T_j$  по графику  $\nu = f(T)$ , который имеется в лаборатории (в качестве рабочей жидкости используется масло для гидрообъемных передач МГЕ-46 В).

Расход жидкости в трубопроводе (см. таблицу 5.1):

$$Q = \frac{W_{жс}}{t}$$

В таблице 5.2 приводятся результаты обработки данных эксперимента. Средняя скорость потока

$$v = Q_j / A_{mp},$$

где  $A_{mp}$  – площадь сечения трубопровода (внутренний диаметр трубопровода  $d = 6 \cdot 10^{-3}$  м (6 мм)), м<sup>2</sup>.



Таблица 5.2 – Результаты обработки экспериментальных данных

Номер опыта $j$	$j = 1$					$j = 2$					$j = 3$					$j = 4$				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Средняя скорость $v_i$ , м/с																				
Число Рейнольдса $Re_i$																				
Коэффициент Кориолиса $\alpha_i$																				
Пьезометрический напор $h_{nj,i}$ , м																				
Скоростной напор $h_{cj}$ , м																				
Полный напор $H_{j,i}$ , м																				
Гидравлический уклон $i_j$																				
Потери напора $h_{коj}$ на клапане обратном КО, м																				
Потери напора $h_{kj}$ на колене К, м																				
Потери напора $h_{dpj}$ на гидродросселе ДР1, м																				
Коэффициент местного сопротивления $\zeta_{коj}$ КО																				
Коэффициент местного сопротивления $\zeta_{kj}$ К																				
Коэффициент местного сопротивления $\zeta_{dpj}$ ДР1																				

Число Рейнольдса:

$$Re_j = \frac{v_j d}{\nu_j}$$

Коэффициент Кориолиса  $\alpha_j = 2$  при  $Re_j < 2320$  и  $\alpha_j = 1$  при  $Re_j > 2320$ .

Пьезометрический напор

$$h_{nj,i} = p_{j,i} / (\rho g),$$

где  $p_{j,i}$  – давление в  $j$ -м опыте и в  $i$ -м сечении, Па;

$\rho$  – плотность жидкости,  $\rho = 890 \text{ кг/м}^3$ .

Скоростной напор



$$h_{cj} = \alpha_j v_j^2 / (2g).$$

В пределах опыта скоростной напор  $h_{cj}$  – величина постоянная, а пьезометрические напоры  $h_{nj,i}$  изменяются как при переходе от одного опыта к другому, так и при изменении сечения.

Полный напор

$$H_{j,i} = h_{cj} + h_{пj,i}.$$

Гидравлический уклон (определяется на контрольном участке)

$$i_j = H_{j3} - H_{j4} / l_{3-4},$$

где  $l_{3-4}$  – длина контрольного участка (см. рисунок 5.2), м.

Потери напора на местных сопротивлениях (КО, К и ДР1) вычисляются по формуле (5.6) в соответствии с изложенной в подразделе 5.1 методикой.

Так, если нужно определить потери напора на клапане обратном КО, например, в первом опыте ( $j = 1$ ), то

$$h_{ко1} = H_{1,1} - H_{1,2} - i_1 l_{1-2},$$

где  $H_{1,1}$  – полный напор (первый индекс – номер опыта, второй индекс – номер сечения);

$H_{1,2}$  – полный напор в первом опыте в сечении 2–2;

$i_1$  – гидравлический уклон в первом опыте;

$l_{1-2}$  – расстояние между сечениями 1–1 и 2–2 (по схеме на рисунке 5.2  $l_{1-2} = 50 + 50 = 100$  мм = 0,1 м).

Аналогичный подход используется как при определении потерь напора на клапане обратном в других опытах, так и при определении потерь на других сопротивлениях. Нужно только при определении потерь использовать соответствующие напоры в сечениях  $H_{j,i}$ , гидравлические уклоны  $i_j$  и длины участков, на которых между двумя смежными сечениями установлено исследуемое местное сопротивление. После вычисления всех потерь напора на местных сопротивлениях по формуле (5.5) определяются для четырех опытов численные значения  $\zeta_{коj}$ ,  $\zeta_{kj}$  и  $\zeta_{дрj}$ .

После заполнения таблицы 5.2 нужно **построить графические зависимости**  $\zeta_{ко} = f_1(Re)$ ,  $\zeta_k = f_2(Re)$  и  $\zeta_{др} = f_3(Re)$ . Построение можно выполнить на одном рисунке. Полученные значения коэффициентов местных сопротивлений нужно сравнить со справочными данными [4].



### Контрольные вопросы

- 1 Дать определение местного сопротивления, назвать основные виды местных сопротивлений.
- 2 Объяснить причины потерь напора в местных сопротивлениях.
- 3 В чем заключается методика экспериментального определения  $\zeta_m$ ?
- 4 С какой целью определяются гидравлические уклоны?
- 5 Какие факторы влияют на величину  $\zeta_m$  при ламинарном и турбулентном режимах течения?
- 6 Назвать справочные значения  $\zeta_m$  для исследуемых местных сопротивлений.

## 6 Лабораторная работа № 4. Определение коэффициента гидравлического трения

### Цель работы:

- изучение способов определения коэффициента гидравлического трения;
- определение коэффициента гидравлического трения стального трубопровода;
- построение графических зависимостей коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса.

### 6.1 Краткие теоретические сведения

При движении жидкостей по трубам вследствие трения возникают силы гидравлических сопротивлений, на преодоление которых затрачивается часть энергии, переносимой жидкостью.

Наиболее общей формулой для определения потерь напора на трение по длине трубопровода как при ламинарном, так и турбулентном режимах движения является формула Вейсбаха–Дарси:

$$h_{\partial l} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad (6.1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения, или коэффициент Дарси;

$l, d$  – длина и диаметр участка трубы, на котором определяются потери напора  $h_{\partial l}$ ;

$v$  – средняя скорость течения жидкости.

Для определения  $h_{\partial l}$  в трубах произвольного поперечного сечения в формулу (6.1) вместо  $d$  подставляют гидравлический диаметр  $D$ .

Исследованиями установлено, что коэффициент гидравлического трения в общем случае зависит от числа Рейнольдса  $Re$  и относительной шероховатости стенок  $\Delta_9/d$ , где  $\Delta_9$  – абсолютная величина так называемой эквивалентной равномерно-зернистой шероховатости (физический смысл  $\Delta_9$  см. в [2, 3]).



Определение  $\lambda$  находится в тесной связи с воззрениями на структуру турбулентного потока, в соответствии с которыми считают, что турбулентный поток состоит из турбулентного ядра и приграничного ламинарного слоя, расположенного у стенок трубы. Толщина приграничного ламинарного слоя  $\delta_{nl} = 30d / (Re\sqrt{\lambda})$ . При  $\delta_{nl} > \Delta$  труба является гидравлически гладкой, где  $\Delta$  – абсолютная шероховатость стенок трубы.

При  $\delta_{nl} < \Delta$  (т. е. неровности стенки выступают за пределы ламинарного слоя) – труба является гидравлически шероховатой.

Таким образом, одна и та же труба в зависимости от режима течения жидкости может быть как гидравлически гладкой, так и гидравлически шероховатой.

В настоящее время существует несколько способов определения коэффициента гидравлического трения  $\lambda$ . Рассмотрим их.

**Первый способ.** В соответствии с этим способом  $\lambda$  определяется экспериментальным путем. Обозначим определяемый таким образом коэффициент гидравлического трения  $\lambda_{\text{э}}$ . Из уравнения (6.1)

$$\lambda_{\text{э}} = \frac{2h_{\text{дл}} d g}{lv^2}, \quad (6.2)$$

где  $h_{\text{дл}}$  и  $v$  определяются на основе экспериментальных данных. Для горизонтального трубопровода постоянного сечения

$$h_{\text{дл}} = h_{\text{нн}} - h_{\text{нк}}, \quad (6.3)$$

где  $h_{\text{нн}}$ ,  $h_{\text{нк}}$  – пьезометрические напоры соответственно в начале и в конце исследуемого трубопровода.

**Второй способ.** В соответствии с этим способом все возможные режимы течения жидкости разбиваются на пять зон сопротивления. Для каждой зоны рекомендована одна или несколько формул, на основе которых вычисляется значение  $\lambda$ . Для выбора зоны, а следовательно, и формулы для вычисления  $\lambda$  необходимо знать значения  $Re$ ,  $d$ ,  $\Delta_{\text{э}}$ . Определяемый ниже коэффициент гидравлического трения в соответствии со вторым способом обозначен  $\lambda_p$ .

Зоны, их границы и формулы, используемые для вычисления  $\lambda$ , следующие [4, 6].

**Зона 1** – вязкого сопротивления; движение ламинарное;  $Re < 2320$ .

$$\lambda = 64/Re. \quad (6.4)$$

**Зона 2** – турбулентного течения жидкости в переходной области;  $2320 < Re < 4000$ . Для вычисления коэффициента гидравлического трения в этой зоне используется формула Френкеля:

$$\lambda = 2,7/Re^{0,53}. \quad (6.5)$$



**Зона 3** – гидравлически гладких труб;  $4000 < Re < 20 \frac{d}{\Delta_9}$ .

Для вычисления  $\lambda$  в этой зоне пользуются формулой Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, \quad (6.6)$$

или формулой Конакова:

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,5)^2}. \quad (6.7)$$

**Зона 4** – доквадратичного сопротивления, переходная от зоны гидравлически гладких труб к зоне квадратичного сопротивления;  $20 \frac{d}{\Delta_9} < Re < 500 \frac{d}{\Delta_9}$ .

Расчет  $\lambda$  в этой зоне выполняют по формуле Альтшуля:

$$\lambda \approx 0,11 \left( \frac{\Delta_9}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}. \quad (6.8)$$

**Зона 5** – квадратичного сопротивления (автомодельности);  $Re > 500 \frac{d}{\Delta_9}$ .

Для расчета  $\lambda$  в этой зоне широко применяется формула Шифринсона:

$$\lambda = 011 \left( \frac{\Delta_9}{d} \right)^{0,25}. \quad (6.9)$$

Таким образом в первых трех зонах  $\lambda$  зависит только от числа Рейнольдса, т. е.  $\lambda = f(Re)$ , в четвертой зоне  $\lambda$  зависит от числа Рейнольдса и относительной шероховатости стенки трубопровода, т. е.  $\lambda = f(Re, \Delta_9/d)$ , а в пятой зоне  $\lambda$  зависит только от относительной шероховатости стенки трубопровода, т. е.  $\lambda = f(\Delta_9/d)$ .

Следует отметить, что пять зон гидравлического сопротивления – это максимальные числа упомянутых и приводимых в учебной и научной литературе зон. Чаще всего, при решении прикладных инженерных задач выделяется меньшее число зон (две или три). Так, например, при решении задач в области машиностроительной гидравлики часто выделяют две зоны. Первая соответствует ламинарному режиму течения ( $Re < 2320$ ), для которого  $\lambda$  вычисляют по формуле (6.4), а вторая – турбулентному режиму течения ( $Re > 2320$ ), для которого значения  $\lambda$  определяют по формуле Блазиуса (6.6). При подстановке в формулу Вейсбаха-Дарси  $\lambda = 64/Re$  получают формулу Пуазейля:



$$h_{\text{дл}} = \frac{32 \nu l}{g d^2} v. \quad (6.10)$$

**Третий способ.** В соответствии с этим способом при турбулентном течении жидкости ( $Re > 4000$ ) значение  $\lambda$  для стальных труб можно определить графически (например, по графикам Мурина или Никурадзе) [1, с. 74]. Для определения  $\lambda$  по графикам Мурина необходимо знать  $Re$  и  $d/\Delta_{\text{э}}$ , а по графикам Никурадзе –  $Re$  и  $d/\Delta_{\text{э}}$ .

Кроме описанных выше, существуют и другие способы определения коэффициента гидравлического трения. Интерес представляет способ, изложенный в [5], в соответствии с которым зависимость  $\lambda_p = f(Re, \Delta/d)$  во всем диапазоне чисел Рейнольдса аппроксимирована одним уравнением. Использование такого подхода позволяет упростить алгоритм решения задачи на ЭВМ, особенно при моделировании нестационарных процессов, для которых, как известно,  $v = f(t)$ , где  $t$  – время. Упрощение алгоритма достигается благодаря тому, что динамический расчет гидравлического привода осуществляется на основе использования одной системы дифференциальных уравнений независимо от изменяющегося режима течения жидкости.

## 6.2 Проведение испытаний

Прежде, чем приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо изучить разд. 1 и 2.

**Объектом испытаний** в данной работе является стальной трубопровод (участок **вг**, от сечения 8–8 до сечения 9–9), схема которого представлена на рисунке 6.1.

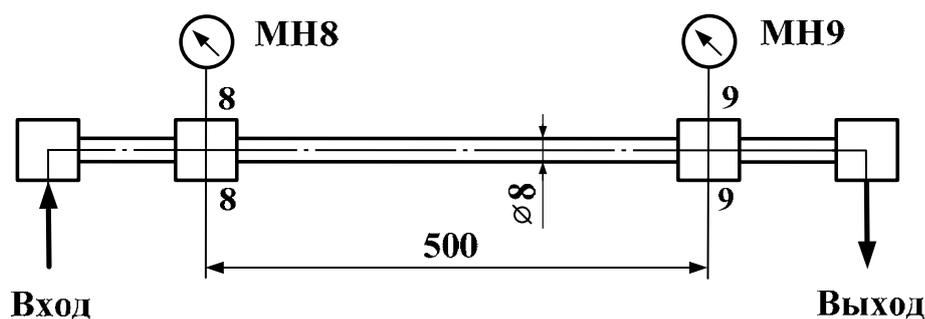


Рисунок 6.1 – Схема исследуемого трубопровода

Размеры на схеме приведены в миллиметрах. Внутренний диаметр трубопровода – 8 мм. К начальному 8–8 и конечному 9–9 сечениям исследуемого трубопровода подключены манометры МН8 и МН9. Эквивалентная шероховатость внутренней стенки трубопровода  $\Delta_{\text{э}} = 0,1$  мм [4].



**6.2.1 Подготовка установки к работе.** Перед включением установки необходимо убедиться, что:

- маховик управления регулятора расхода РР полностью повернут против часовой стрелки (указатель положения маховика установлен в позицию «1»);
- тумблеры управления гидрораспределителями установлены в положение «Выкл.»;
- тумблер установки режима работы электронного секундомера установлен в положение «Ручн.», а тумблер включения питания секундомера установлен в нижнее положение.

**6.2.2 Проведение эксперимента.** Включить электрическое питание стенда («Сеть»), электродвигателя М (кнопка «Пуск»), питание электронного секундомера (тумблер установить в положение «Вкл.»). Дать возможность поработать стенду в течение 3...5 мин.

Включить тумблер Р1 в нижнее положение «Вкл.2». При этом жидкость от насоса через распределитель Р1 направляется к исследуемому трубопроводу (установлен на нижней панели стенда).

При различных настройках регулятора расхода РР провести шесть опытов. Первый опыт проводить при минимальном, а шестой – при максимальном расходе (смотреть по расходомеру Р4).

В каждом опыте необходимо измерять:

- давления  $p_8$  и  $p_9$  (по манометрам МН8 и МН9), МПа;
- время  $t$  прохождения через расходомер объема жидкости, с.

Объемом  $W_{ж}$  необходимо задаться, приняв его, например, равным во всех опытах  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  (5 л);

- температуру рабочей жидкости  $T$ , °С (по термометру).

Результаты измерения занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты исследований

Номер опыта		1	2	3	4	5	6
Показания манометров, МПа	$p_8$						
	$p_9$						
Потери напора $h_{дл}$ , м							
Объем жидкости $W_{ж}$ , проходящей через счетчик, $\text{м}^3$		$5 \cdot 10^{-3}$					
Время прохождения объема $t$ , с							
Температура рабочей жидкости $T$ , °С							
Расход $Q = W_{ж} / t$ , $\text{м}^3/\text{с}$							
Средняя скорость $v$ , м/с							
Кинематическая вязкость $\nu$ , $\text{м}^2/\text{с}$							
Число Рейнольдса $Re$							
Коэффициент гидравлического трения	$\lambda_{э}$						
	$\lambda_p$						



После выполнения всех опытов необходимо маховик регулятора расхода РР повернуть до ограничения против часовой стрелки (указатель положения маховика в позиции «1»), тумблер управления гидрораспределителем Р1 установить в среднее положение, выключить электрическое питание секундомера, электродвигателя и стенда.

### 6.3 Обработка результатов

Потери напора на участке между сечениями 8–8 и 9–9 трубопровода (потери по длине)

$$h_{\text{дл}} = \frac{p_8 - p_9}{\rho g},$$

где  $\rho$  – плотность масла,  $\rho = 890 \text{ кг/м}^3$ .

Давления  $p_8$  и  $p_9$  необходимо подставлять в формулу в Паскалях.

Расход жидкости в трубопроводе

$$Q = \frac{W_{\text{жс}}}{t}.$$

Средняя скорость жидкости в трубопроводе

$$v = \frac{Q}{A_{\text{мп}}},$$

где  $A_{\text{мп}}$  – площадь сечения трубопровода (внутренний диаметр трубопровода  $d = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  (8 мм)).

Кинематическую вязкость определяют по графику  $\nu = f(T)$ , который имеется в лаборатории (масло МГЕ-46В).

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{v d}{\nu}.$$

Коэффициент гидравлического трения  $\lambda_9$ , определяемый экспериментальным путем, необходимо вычислять по формуле (6.2).

Для определения коэффициента гидравлического трения расчетным путем (обозначен  $\lambda_p$ ) необходимо для каждого опыта установить, в какой зоне гидравлического сопротивления происходит течение жидкости.

Для определения зоны гидравлического сопротивления необходимо использовать численное значение  $Re$  (из таблицы 6.1).



После установления зоны, в которой происходит течение жидкости, нужно воспользоваться формулой, рекомендуемой для вычисления  $\lambda$  в этой зоне. Так, например, если течение происходит в первой зоне ( $Re < 2320$ ), то нужно воспользоваться формулой (6.4), т. е.  $\lambda = 64/Re$ .

После выполнения всех расчетов **необходимо построить графические зависимости**  $\lambda_{\text{э}} = f_1(Re)$  и  $\lambda_p = f_2(Re)$  (лучше это сделать на одном рисунке) и проанализировать полученные результаты.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Устройство лабораторного стенда.
- 2 Как определять потери на трение по длине трубопровода?
- 3 Методика экспериментального определения коэффициента гидравлического трения.
- 4 Методика расчетного определения коэффициента гидравлического трения.
- 5 Какие факторы влияют на величину потерь на трение по длине трубопровода?
- 6 Что такое гидравлически гладкие и гидравлически шероховатые трубы?
- 7 Поясните физический смысл эквивалентной шероховатости труб  $\Delta_{\text{э}}$ .

## **7 Лабораторная работа № 5. Исследование нестационарных процессов истечения жидкости через гидродроссель**

### **Цель работы:**

- расчетные и экспериментальные исследования нестационарных процессов истечения жидкости через гидродроссель;
- анализ результатов исследований.

### **7.1 Краткие теоретические сведения**

В учебной литературе по гидравлике рассматриваются два случая истечения жидкости через малое отверстие в тонкой стенке: первый – при постоянном, а второй – при переменном напорах [2]. В обоих случаях истечение происходит из резервуара в окружающую среду (или в среду с противодействием). В первом случае истечения напор перед отверстием считают постоянной, а во втором случае – переменной величиной. Следует отметить, что рассматриваемые случаи истечения имеют ограниченное практическое применение.

Чаще всего, в машиностроительной гидравлике встречаются случаи истечения жидкости через гидродроссель. Последний представляет собой разновидность малого отверстия в тонкой стенке. **Гидродроссель** – это особое местное сопротивление, обладающее чрезвычайно высокими диссипативными свойствами. Устанавливаются гидродроссели во многие гидравлические системы (включая и системы автоматического регулирования) с целью достижения тре-



буемых инерционных свойств и обеспечения желаемых характеристик функционирования систем. Конструкции гидродросселей, а также требования, которые к ним предъявляются, подробно изложены в [2, 4]. Отметим только, что гидродроссели бывают регулируемые и нерегулируемые. Конструктивно нерегулируемые гидродроссели часто выполняют в виде пробки с наружной резьбой, в которой изготавливается осевое отверстие малого диаметра  $d_{др}$  ( $d_{др}$  – диаметр дросселя). Толщина стенки  $l$ , в которой изготавливают отверстие, должна быть связана с диаметром дросселя следующим образом:  $l \leq (1,5 \dots 2,0)d_{др}$ .

Коэффициент местного сопротивления гидродросселя можно определить из следующего выражения:

$$\zeta = \frac{d_k^4}{\mu^2 d_{др}^4},$$

где  $d_k$  – диаметр канала, в котором установлен дроссель;

$\mu$  – коэффициент расхода дросселя, для отверстия круглой формы  $\mu = 0,62 \dots 0,65$ .

Чаще всего, встречаются два случая истечения через гидродроссель. В первом случае жидкость от источника энергии через дроссель поступает в торцевую полость подпружиненного золотника или поршня, т. е. рассматривается процесс заполнения рабочей полости, в которой перемещается подпружиненный поршень или золотник. Во втором случае рассматривается процесс опорожнения полости через гидродроссель. При этом линия с установленным в нее дросселем подключается к сливу.

Рассматриваемые процессы относятся к нестационарным, т. к. и при заполнении и при опорожнении полости через гидродроссель изменяются во времени фазовые координаты – давления и расхода (скорости).

На рисунке 7.1 приведена расчетная схема процессов заполнения и опорожнения через гидродроссель ДР рабочей полости Б пружинного гидроаккумулятора.

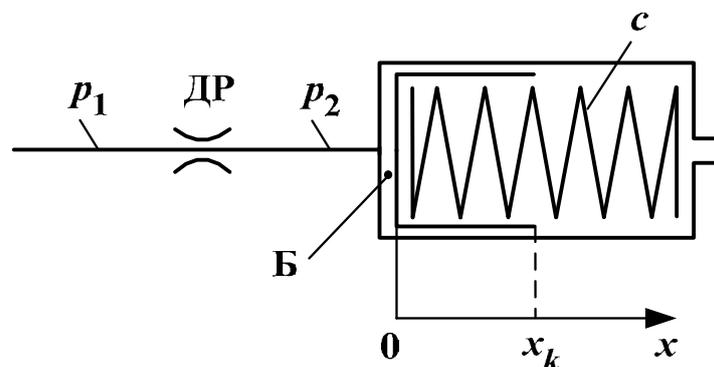


Рисунок 7.1 – Расчетная схема

При рассмотрении указанных процессов решается задача определения времени заполнения  $t_{зан}$  и времени опорожнения  $t_{он}$  полости Б пружинного аккумулятора.

На схеме (см. рисунок 7.1) приняты следующие обозначения:  $p_1$  и  $p_2$  – давления;  $c$  – жесткость пружины;  $x$  – координата поршня ( $x = x_k$  соответствует полному заполнению полости Б).

При математическом описании процессов заполнения и опорожнения полости Б принимались следующие допущения: силы трения и инерции, действующие на жидкость и поршень, равны нулю; потери энергии при течении жидкости учитываются только на гидродросселе ДР.

Для процессов заполнения и опорожнения при принятых допущениях были составлены две системы дифференциальных уравнений, в результате решения которых получены следующие выражения:

– процесс заполнения полости Б ( $p_1 = \text{const}$ )

$$t_{зан} = \frac{2A_n^2}{c \mu A_{др} \sqrt{\frac{2}{\rho}}} \left( \sqrt{p_1 - \frac{F_0}{A_n}} - \sqrt{p_1 - \frac{F_0 + c x_k}{A_n}} \right); \quad (7.1)$$

– процесс опорожнения полости Б ( $p_1 = 0$ )

$$t_{он} = \frac{2A_n^2}{c \mu A_{др} \sqrt{\frac{2}{\rho}}} \left( \sqrt{\frac{F_0 + c x_k}{A_n}} - \sqrt{\frac{F_0}{A_n}} \right), \quad (7.2)$$

где  $A_n$  – площадь поршня,  $A_n = \pi D_n^2 / 4$  ( $D_n$  – диаметр поршня);

$A_{др}$  – площадь проходного сечения дросселя;

$\rho$  – плотность рабочей жидкости;

$F_0$  – усилие преднатяга пружины (при  $x = 0$ );

$x_k$  – ход поршня.

Остальные обозначения величин, входящих в выражения (7.1) и (7.2), были приведены выше.

## 7.2 Проведение испытаний

Прежде, чем приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо изучить разд. 1 и 2.

**Объектом испытаний** в данной работе является подсистема стенда, представленная на рисунке 7.2.

Гидродроссель ДР2 установлен на участке **де**. Для измерения давления в сечении **е** используется электроконтактный манометр МН7, используемый



для управления электронным секундомером. Для подключения аккумулятора к напорной линии насоса (процесс заполнения) или к сливу жидкости в гидробак Б (процесс опорожнения) служит двухпозиционный гидрораспределитель P2. Устройство пружинного аккумулятора практически полностью соответствует схеме, представленной на рисунке 7.1.

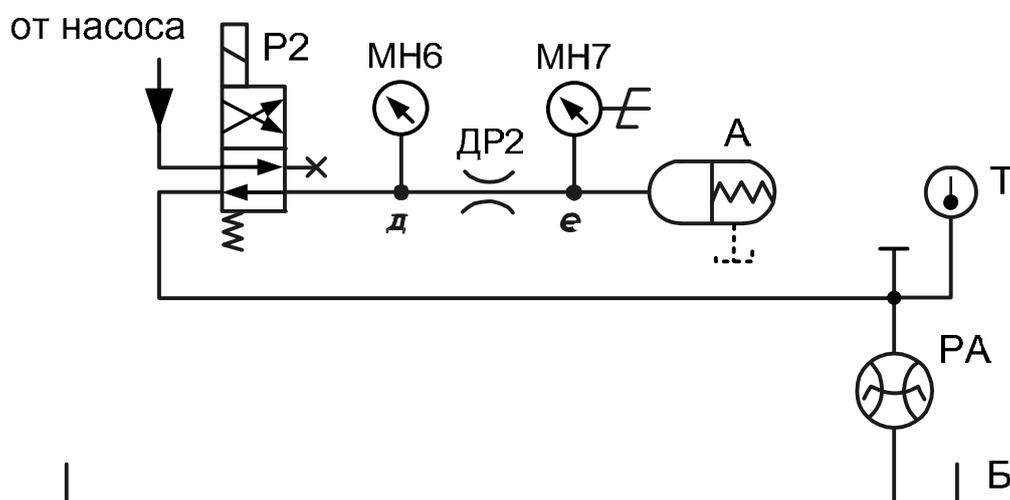
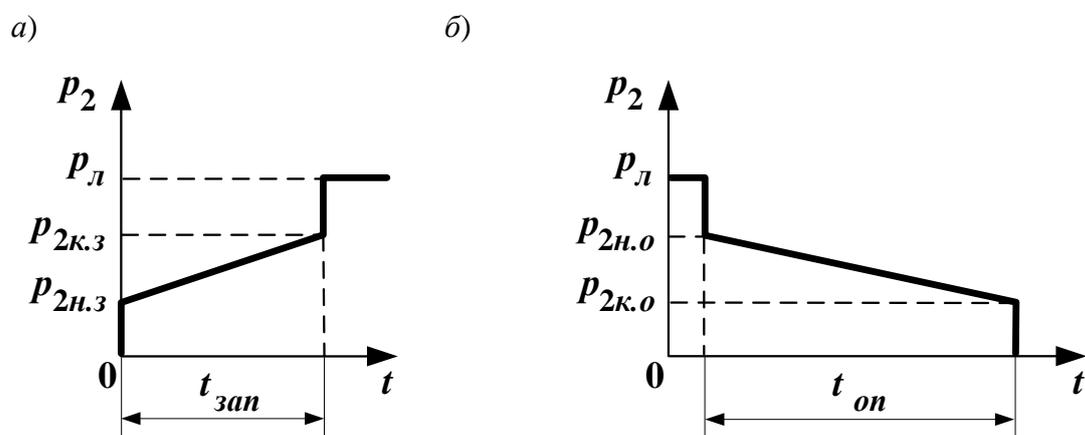


Рисунок 7.2 – Схема объекта испытаний

На рисунке 7.3 приведены графики изменения давления  $p_2$  в полости аккумулятора.



*a* – процесс заполнения; *б* – процесс опорожнения

Рисунок 7.3 – Характеристики процессов функционирования пружинного гидроаккумулятора

Процесс заполнения полости аккумулятора (см. рисунок 7.3, *a*) начинается при  $t = 0$  и достижении давлением величины  $p_{2н.з}$  ( $p_{2н.з} = F_0 / A_n$ ). При  $p_2 < p_{2н.з}$  включается электронный секундомер. Затем начинается процесс заполнения рабочей полости аккумулятора. При  $p_2 = p_{2к.з}$  ( $p_{2к.з} = (F_0 + c x_k) / A_n$ ) поршень касается ограничения хода ( $x = x_k$ )

и давление практически мгновенно возрастает до линейного давления в системе  $p_l$ . При  $p_2 > p_{2к.з}$  выключается электронный секундомер. На цифровом табло секундомера отображается величина  $t_{зан}$ .

Процесс опорожнения полости аккумулятора (см. рисунок 7.3, б) начинается после выключения распределителя Р2. При этом давление  $p_2$  резко понижается с  $p_l$  до  $p_{2н.о}$  ( $p_{2н.о} = (F_0 + c x_k) / A_n$ ), когда  $p_l > p_2 > p_{2н.о}$  – включается электронный секундомер. Процесс опорожнения происходит под действием усилия пружины, действующего на поршень аккумулятора. При достижении давлением значения  $p_{2к.о}$  ( $p_{2к.о} = F_0 / A_n$ ) поршень касается ограничения хода ( $x = 0$ ) и давление  $p_2$  резко падает. При  $p_2 < p_{2к.о}$  отключается электронный секундомер и на табло отображается время опорожнения полости аккумулятора  $t_{он}$ .

**7.2.1 Подготовка установки к работе.** Перед включением установки необходимо убедиться, что:

- тумблеры управления гидрораспределителями Р1 и Р2 установлены в положение «Выкл»;
- тумблер установки режима работы электронного секундомера установлен в положение «Авт», а тумблер включения питания секундомера установлен в нижнее положение.

**7.2.2 Проведение эксперимента.** Включить электрическое питание стенда («Сеть»), электродвигателя М (кнопка «Пуск»), питание электронного секундомера (тумблер установить в положение «Вкл»). Дать возможность поработать стенду в течение 3...5 мин. Включить тумблер управления секундомером в положение «Счет».

Таблица 7.1 – Результаты исследований процесса заполнения полости аккумулятора

Номер опыта	Давление на входе $p_1$ , МПа	Время заполнения полости $t_{зан}$ , с	Среднее значение времени $t_{зан.ср}$ , с	Расчетное значение $t_{зан.р}$ , с
1				
2				
3				
4				
5				

После того, как закончился процесс заполнения полости аккумулятора и зафиксировано время  $t_{зан}$ , необходимо сбросить (обнулить) показания табло секундомера и перейти к определению времени опорожнения полости аккумулятора. Для этого необходимо тумблер управления гидрораспределителем Р2 установить в положение «Выкл». При этом рабочая полость аккумулятора через дроссель ДР2 будет подключена к сливу. Результаты исследования процессов



заполнения и опорожнения необходимо записывать в таблицы 7.1 и 7.2 соответственно.

Таблица 7.2 – Результаты исследований процесса опорожнения полости аккумулятора

Номер опыта	Время опорожнения полости $t_{on}$ , с	Среднее значение времени $t_{on.cp}$ , с	Расчетное значение $t_{on.p}$ , с
1			
2			
3			
4			
5			

После считывания значения  $t_{on}$  (по секундомеру) показание табло секундомера обнуляется и может снова переходить к исследованию процесса заполнения полости.

После выполнения всех опытов необходимо тумблер управления гидрораспределителем P2 установить в положение «Выкл.», отключить электрическое питание секундомера, электродвигателя и стенда.

### 7.3 Обработка результатов

Среднее значение времени заполнения полости аккумулятора определяется как среднее арифметическое:

$$t_{зан.ср} = \left( \sum_{i=1}^n t_{зан.i} \right) / n,$$

где  $n$  – количество опытов ( $n = 5$ ).

Аналогично определяется и среднее значение времени опорожнения полости аккумулятора  $t_{он.ср}$ .

Для определения расчетным путем времени заполнения  $t_{зан.p}$  нужно воспользоваться формулой (7.1), а для определения времени опорожнения  $t_{он.p}$  – формулой (7.2).

При определении  $t_{зан.p}$  в формулу (7.1) нужно подставлять среднее значение  $p_1$  (определенное по результатам измерений в пяти опытах, см. второй столбец таблицы 7.1).

Остальные параметры, необходимые для вычисления  $t_{зан.p}$  и  $t_{он.p}$ , следующие:

- диаметр поршня аккумулятора  $D = 0,06$  м (60 мм);
- диаметр дросселя  $d_{др} = 1 \cdot 10^{-3}$  м (1 мм);
- коэффициент расхода дросселя  $\mu = 0,62$ ;



- усилие преднатяга пружины  $F_0 = 450 \text{ Н}$ ;
- жесткость пружины  $c = 8000 \text{ Н/м}$  (8 Н/мм);
- ход поршня  $x_k = 0,065 \text{ м}$  (65 мм);
- плотность масла  $\rho = 890 \text{ кг/м}^3$ .

### **Контрольные вопросы**

- 1 Устройство лабораторного стенда.
- 2 Назначение, устройство и характеристики гидродросселя.
- 3 Как определяется коэффициент местного сопротивления гидродросселя?
- 4 Поясните обоснованность допущений, принимаемых при моделировании процессов заполнения и опорожнения рабочей полости аккумулятора.
- 5 Методика экспериментального определения характеристик заполнения и опорожнения рабочей полости аккумулятора.
- 6 Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований.

### **Список литературы**

- 1 Гидравлика: учебник и практикум для академического бакалавриата / В. А. Кудинов и [др.]; под ред. В. А. Кудинова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Юрайт, 2018. – 386 с.
- 2 Гидравлика в машиностроении: учебник в 2 ч. / А. Г. Схиртладзе [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол: ГНТ, 2016. – Ч. 1. – 392 с.
- 3 Гидравлика, гидромашин и гидропневмопривод: учебное пособие для вузов / Под ред. С. П. Стесина. – 3-е изд., стер. – Москва: Академия, 2007. – 336 с.
- 4 **Медведев, В. Ф.** Гидравлика и гидравлические машины: учебное пособие / В. Ф. Медведев. – Минск: Вышэйшая школа, 1998. – 311 с.
- 5 Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Под общ. ред. Б. Б. Некрасова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск: Вышэйшая школа, 1985. – 382 с. : ил.
- 6 Гидравлика, гидромашин и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т. М. Башта [и др.]; отв. ред. Т. М. Башта. – 2-е изд., перераб. – Москва: Машиностроение, 1982. – 423 с. : ил.
- 7 **Метлюк, Н. Ф.** Динамика пневматических и гидравлических приводов автомобилей / Н. Ф. Метлюк, В. П. Автушко. – Москва: Машиностроение, 1980. – 231 с. : ил.
- 8 **Юшкин, В. В.** Гидравлика и гидравлические машины: учебное пособие / В. В. Юшкин. – Минск: Вышэйшая школа, 1974. – 272 с.

