

Лабораторная работа № 2

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.

Общие 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 2.1. В столбцах записаны величины – аналоги. Например, аналогом давления в электрических системах является напряжение U , а аналогом расхода – сила тока I . Размерности величин в таблице 2.1 приведены в СИ.

Таблица 2.1 – Основные величины систем различной физической природы и их аналоги

Гидравлические и пневматические системы		p – давление, Па	Q – расход (объемный), м ³ /с
Тип систем		Основная величина	
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	ω – угловая скорость, с ⁻¹

Произведение основных величин для всех типов систем, приведенных в каждой строке таблицы 2.1, представляет собой не что иное, как мощность (в ваттах), т. е.

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

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.

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

$$p = \frac{F}{S},$$

где F – сила сжатия, приходящаяся на поверхность площадью S .

Давление бывает абсолютным $p_{\text{абс}}$, избыточным $p_{\text{изб}}$ и вакуумметрическим $p_{\text{вак}}$ (рисунок 2.1).

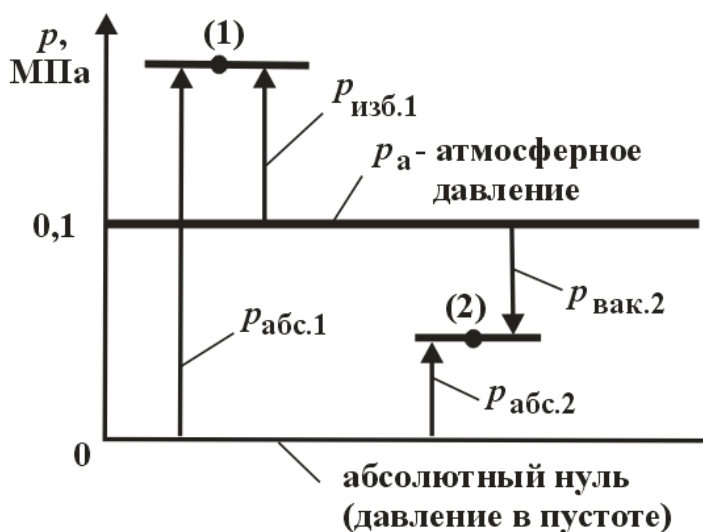


Рисунок 2.1 – Виды давлений

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

Избыточное давление $p_{\text{изб}}$ 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.

Примечание: при решении большинства инженерных задач атмосферное давление p_a можно считать постоянной величиной, равной 0,1 МПа (736 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:

$$p_{\text{изб}} = p_{\text{абс}} - p_a. \quad (2.2)$$

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

Вакуумметрическое давление

$$p_{\text{вак}} = p_a - p_{\text{абс}}. \quad (2.3)$$

Вакуумметрическое давление отсчитывается от атмосферного в сторону абсолютного нуля.

Предположим, что давление в системе соответствует точке 1 (см. рисунок 2.1). Это давление можно характеризовать абсолютным давлением – $p_{абс.1}$, а также избыточным давлением – $p_{изб.1}$.

Как видно из рисунка 2.1, давление $p_{абс.1}$ больше $p_{изб.1}$ на величину атмосферного давления, то есть 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 (2.3). Как видно из рисунка 2.1, 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 м². 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 – техническую атмосферу 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

$$h = \frac{p}{\gamma}, \quad (2.4)$$

где $\gamma = \rho \cdot g$ – удельный вес жидкости.

Как следует из (2.4), 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, то есть

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

Существует также такое понятие, как 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:

$$\Delta = \frac{K \cdot P}{100}, \quad (2.5)$$

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.

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

Различают объемный Q , м³/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:

$$Q_G = \gamma \cdot Q; \quad Q_M = \rho \cdot Q, \quad (2.6)$$

где ρ – 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 $W_{ж}$, которая поступает в мерный бак. Зная $W_{ж}$ и t , затем вычисляют объемный расход, который равен

$$Q = \frac{W_{ж}}{t}. \quad (2.7)$$

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.

Режимы течения жидкости

Историческая справка: Исследованиями ученых (Г. Хаген – 1869 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 достижения которой наступает турбулентный режим.

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

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

Для напорного движения в круглых трубах

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (2.8)$$

где v – средняя скорость движения потока жидкости, м/с;
 d – диаметр трубы, м;
 ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

Для потоков некруглого сечения в формулу (2.8) вместо d подставляют так называемый характерный размер:

$$L = 4 \cdot R,$$

где $R = \frac{S}{\chi}$ – гидравлический радиус;

S – площадь живого сечения потока;

χ – смоченный периметр.

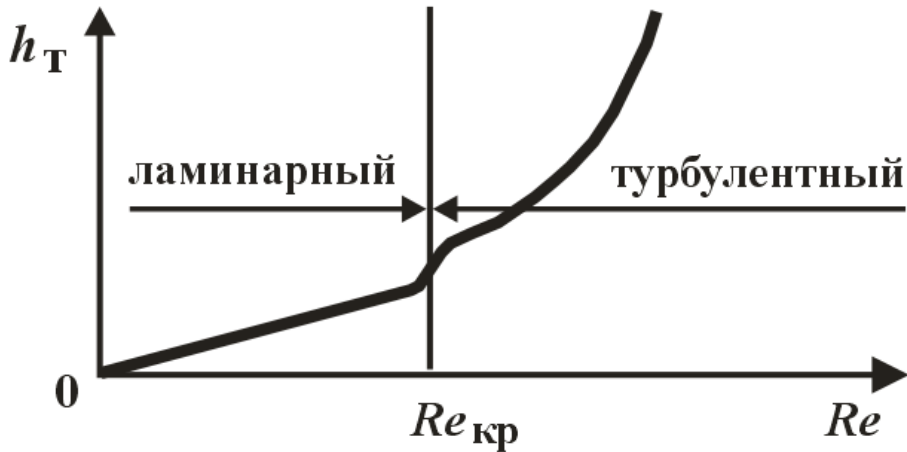


Рисунок 2.2 – Зависимость потерь напора (удельной энергии) на трение h_T от числа Рейнольдса Re

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.

Интересуются режимом движения из энергетических соображений. На рисунке 2.2 показана зависимость потерь напора (удельной энергии) на трение h_T от числа Рейнольдса.

Таким образом, как видно из рисунка 2.2, 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 (2.8).

Описание лабораторной установки

Схема гидравлическая принципиальная станда приведена на рисунке 2.3.

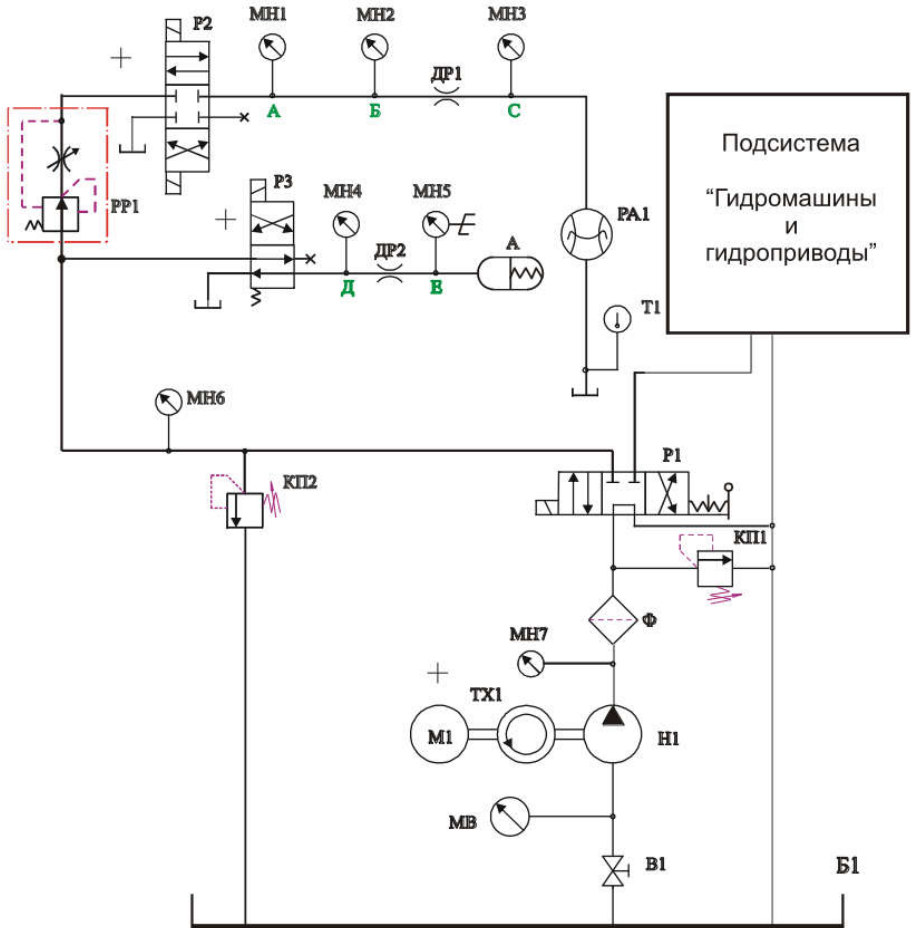


Рис. 2.3 – Схема гидравлическая принципиальная станда

В состав станда входят гидробак Б1, шестеренный насос Н1, фильтр Ф, предохранительный клапан КБ1, регулятор расхода РР1, два гидрораспределителя Р1 и Р2, пружинный аккумулятор А, два гидродросселя ДР1 и ДР2, трубопроводы. Привод насоса осуществляется от электродвигателя. Информационно-измерительная система станда включает 6 манометров (МН1 – МН6, манометр МН5 – электроконтактный с двумя управляемыми контактами), расходомер скоростного типа РА1, термометр Т1 и электронный секундомер.

Управление гидрораспределителями осуществляется тумблерами P1 и P2.

При установке тумблера в положение “РУЧН.” электронный секундомер используется для определения времени прохождения через расходомер PA1 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” секундомер не должен производить отсчет времени, то есть тумблер “Счет” необходимо переключить в нижнее положение.

Исследуемым в данной работе участком является участок **abc**.

Порядок выполнения работы

- включить рукоятку распределителя P1 в положение I;
- включить питание стенда;
- включить электродвигатель M1 (кнопка “Пуск”);
- включить распределитель P2 (тумблер P2 в положение “Вкл.”);
- дать возможность поработать стенду в течение 5...6 минут;
- произвести замеры времени прохождения заданного объема рабочей жидкости через трубопровод **а-б-с**. Время измерять с помощью электронного секундомера, а объем проходимой жидкости измерять с помощью расходомера (один поворот красной стрелки на расходомере соответствует прохождению через устройство одного литра жидкости). Опыты провести при различных расходах (расход изменяется с помощью регулятора расхода PP1, поворот маховика по часовой стрелке – сопровождается увеличением расхода). В каждом опыте необходимо также фиксировать давления p_a и p_b по манометрам MN1 и MN2 и температуру рабочей жидкости.

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

- время прохождения t , с, через расходомер объема жидкости $W_{ж}$. 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 , °C (по термометру);
- давления p_1 и p_2 , МПа (по манометрам MN1 и MN2).

Результаты измерений занести в таблицу 2.3.

После проведения всех опытов отключить питание секундомера, выключить электродвигатель и отключить питание стенда.

Обработка результатов

Расход Q и средняя скорость потока v определяется по формулам

$$Q = \frac{W_{жс}}{t} ; \quad v = \frac{Q}{S_{мп}}$$

где $S_{мп}$ – площадь сечения трубопровода, м²

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

Кинематическая вязкость ν берется из таблицы 2.2.

Число Рейнольдса определяется по формуле (2.8).

Мощности потока в сечениях а–а и б–б определяется по формуле

$$N = p \cdot Q$$

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.

Таблица 2.2 – Коэффициент кинематической вязкости масла при различных температурах

t °C	10	15	20	25	30	35
$\nu, м^2/с$	$400 \cdot 10^{-6}$	$250 \cdot 10^{-6}$	$160 \cdot 10^{-6}$	$120 \cdot 10^{-6}$	$90 \cdot 10^{-6}$	$70 \cdot 10^{-6}$

Таблица 2.3 – Результаты исследований

Номер опыта	1	2	3	4	5	6
Время t прохождения через расходомер объема жидкости, с						
Объем жидкости $W_{жс}$, м ³						
Температура рабочей жидкости T , °C						
Давление p_1 (МН1), МПа						
Давление p_2 (МН2), МПа						
Расход Q , м ³ /с						
Средняя скорость v , м/с						
Кинематическая вязкость ν , м ² /с						
Число Рейнольдса Re						
Режим течения						
Мощность потока N_1 , Вт						
Мощность потока N_2 , Вт						

Контрольные вопросы

- 1 Основные величины гидравлики.
- 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, необходимость и методика их определения.
- 5 Влияние режима течения на потери энергии на трение по длине трубопровода.
- 6 Определение мощности в гидравлических системах.