

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

**ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ И ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ
ПРИВОДЫ ОБОРУДОВАНИЯ**

Методические указания к лабораторным работам
для студентов специальности
1-55 01 03 «Компьютерная мехатроника»

Витебск
2022

УДК 621.22+62-82 (075.8)

Составители:

В. И. Ольшанский, А. А. Котов, С. М. Кузьменков

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 4 от 29.12.2021.

Гидравлические и пневматические приводы оборудования: методические указания к лабораторным работам / В. И. Ольшанский, А. А. Котов, С. М. Кузьменков. – Витебск : УО «ВГТУ», 2022. – 66 с.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по курсу «Гидравлические и пневматические приводы оборудования» студентами специальности 1-55 01 03 «Компьютерная мехатроника» дневной формы обучения.

УДК 621.22+62-82 (075.8)

© УО «ВГТУ», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Описание лабораторного стенда	5
Лабораторная работа 1. Определение вязкости жидкости	8
Лабораторная работа 2. Измерение давления	14
Лабораторная работа 3. Определение режима течения жидкости в трубопроводе	23
Лабораторная работа 4. Построение пьезометрической и напорной линий трубопровода	29
Лабораторная работа 5. Определение коэффициента сопротивления трения по длине при движении жидкости в трубопроводе	37
Лабораторная работа 6. Определение коэффициентов местных гидравлических сопротивлений	48
Лабораторная работа 7. Построение рабочих характеристик шестеренного насоса	56
Литература	65

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по курсу «Гидравлические и пневматические приводы оборудования» студентами специальности 1-55 01 03 «Компьютерная мехатроника» дневной формы обучения.

Основное назначение лабораторных работ – дать студентам материал, который позволит выработать навыки применения теоретических сведений для решения конкретных задач технического характера и тем самым освоить практику и методику расчетов гидравлических и пневматических приводов оборудования.

Методические указания включают в себя лабораторные работы по основным разделам машиностроительной гидравлики, а также устройству гидравлических и пневматических приводов оборудования. Каждая лабораторная работа содержит краткие сведения из теории, касающиеся материала раздела.

Методически лабораторные работы составлены так, что студенты могут выполнить сравнительный анализ теоретических значений основных параметров гидравлических и пневматических систем с практическими, реальными их значениями.

Выполнение лабораторных работ предполагает знание студентами основных теоретических положений курса «Гидравлические и пневматические приводы оборудования», соответствующей терминологии, уравнений и формул.

Для лучшего освоения студентами основ гидравлических и пневматических приводов оборудования, а также развития самостоятельного инженерного мышления рекомендуется после обработки экспериментальных данных и оформления отчета по лабораторной работе проанализировать полученные результаты и выяснить влияние на них различных факторов.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Большая часть лабораторных работ курса «Гидравлические и пневматические приводы оборудования» выполняется на лабораторном стенде НТЦ-11.38 «Гидравлика, гидромашины и гидроприводы».

Стенд содержит два электродвигателя, три шестеренных насоса, аксиально-поршневой гидромотор, два гидроцилиндра, шесть гидрораспределителей (из них пять с электромагнитным и один с ручным управлением) и другую направляющую и регулирующую аппаратуру. Информационно-измерительная система позволяет измерять: расходы (три расходомера интегрирующего типа); давления (четырнадцать манометров и один вакуумметр); температуру рабочей жидкости (два термометра); два электронных секундомера (имеют два режима работы: «ручн.» и «автом.», в автоматическом режиме включение и выключение секундомера осуществляется от конечных выключателей); скорости выходных звеньев (в поступательном и вращательном движении), а также частоту вращения основного насоса Н1; мощности (подводимую к гидроприводу и полезную – на выходных звеньях).

Конструктивно стенд выполнен в виде модуля, имеющего двухсторонний базис (с одной стороны, выполняются работы из раздела «Гидравлика», а с другой стороны – из раздела «Гидромашины и гидроприводы»). На боковой поверхности стенда (противоположной той, на которой установлены гидроцилиндры) расположены схема гидравлическая принципиальная стенда, выключатели электропитания стенда с индикаторами включения фаз, предохранители. На обоих базисах стенда приведены схемы гидравлические принципиальные соответствующих подсистем: «Гидравлика» и «Гидромашины и гидроприводы».

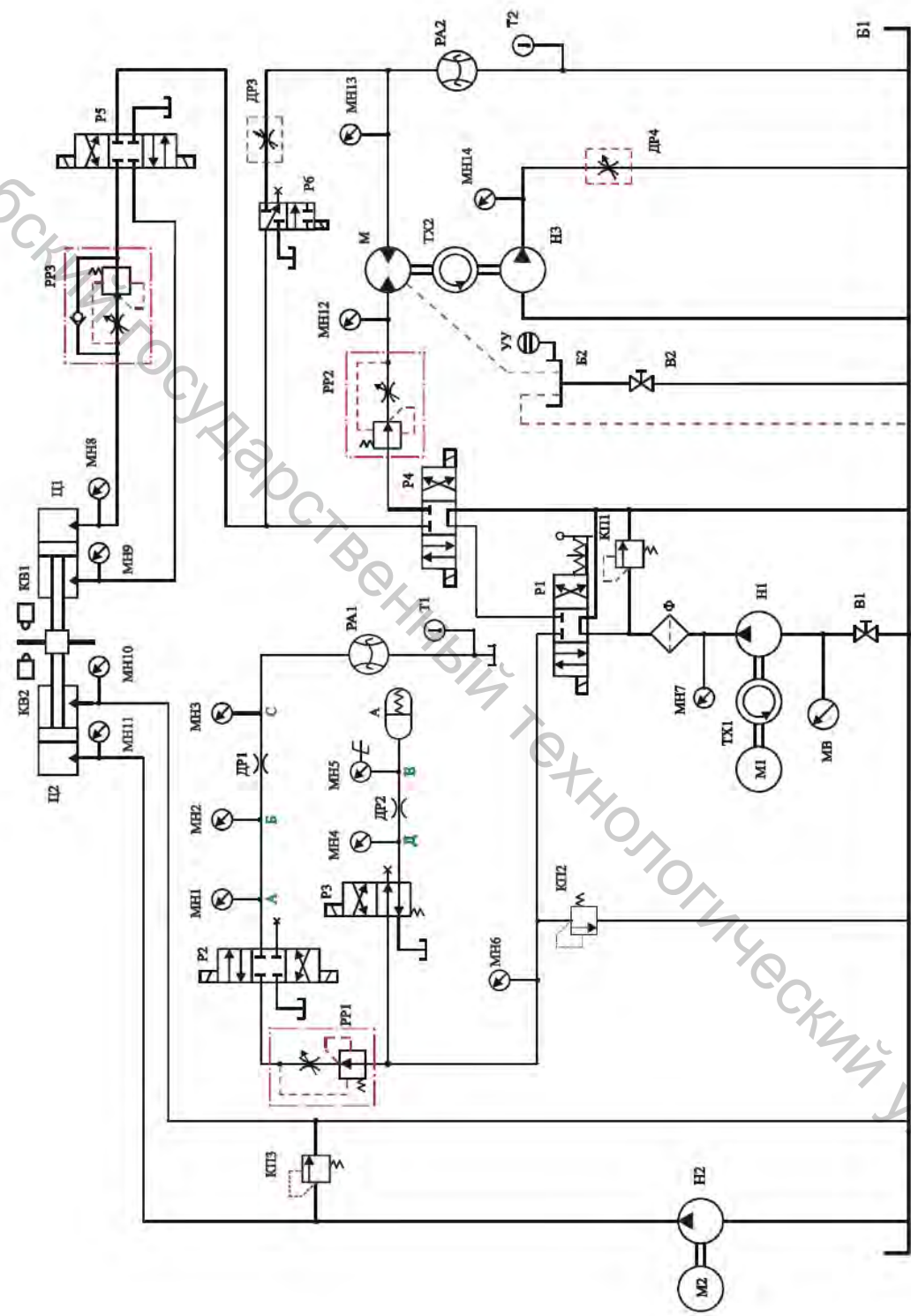
Распределение рабочей жидкости от основного насоса по базисам стенда осуществляется с помощью распределителя с ручным управлением Р1.

Максимальное давление в подсистеме «Гидромашины и гидроприводы» настраивается по манометру МН7 с помощью напорного гидроклапана КП1 (клапан КП1 установлен снизу на гидростанции на выходе фильтра Ф). Величина этого давления находится в пределах $6,0 \div 6,3$ МПа.

Давление в подсистеме «Гидравлика» настраивается по манометру МН6 с помощью гидроклапана КП2 (установлен рядом с распределителем с ручным управлением Р1). Величина этого давления $1,4$ МПа.

На стенде невозможна одновременная работа на обоих базисах. Конструкция стенда выполнена таким образом, что перед выполнением любой лабораторной работы не требуется проведение монтажных работ.

Напряжение питания стенда – 380 В, частота – 50 Гц, напряжение питания электромагнитов гидрораспределителей – 24 В (постоянный ток). Напряжение на конечных выключателях КВ1 и КВ2 – 12 В. Номинальная мощность стенда – $4,4$ кВт.



Принципиальная гидравлическая схема лабораторного стенда
НТЦ-11.38 «Гидравлика, гидромашины и гидроприводы»

Гидронасосы Н1 и Н3 – шестеренные типа НШ10-3. Гидронасос Н2 – шестеренный типа НШ6-3. Насос Н1 – основной, Н3 – используется для создания нагрузки на валу гидромотора М, насос Н2 – предназначен для создания давления в поршневой полости цилиндра Ц2.

Гидроцилиндр Ц1 (нижний) – это рабочий цилиндр. Цилиндр Ц2 (верхний) – используется в качестве нагружателя (для создания нагрузки на штоке цилиндра Ц1). Исследуемое рабочее движение – выдвигание штока цилиндра Ц1. Втягивание штока цилиндра Ц1 является подготовительной операцией и осуществляется под действием усилия, создаваемого гидромотором-нагружателем Ц2. На стенде используются гидроцилиндры типа ГЦ 63.200.16.000 (диаметр цилиндра – 63 мм, ход штока – 200 мм).

На стенде установлен гидромотор М (нерегулируемый, аксиально-поршневой, с наклонным диском) типа Г15-21Р (рабочий объем $V_{ом} = 11,2 \text{ см}^3$, $Q_{ном} = 10,8 \text{ л/мин}$, $p_{ном} = 6,3 \text{ МПа}$, $N_{ном} = 0,96 \text{ кВт}$, $M_{ном} = 9,6 \text{ Н·м}$, $z = 0,88$).

Во всасывающем трубопроводе основного насоса Н1 установлен ventиль В1. При выполнении всех лабораторных работ этот ventиль должен быть открыт (маховик полностью вывернут против часовой стрелки). Управление этим ventилем предусмотрено только при определении кавитационных характеристик насоса Н1.

Объектом исследования в лабораторных работах подсистемы «Гидравлика» является трубопровод а–б–с с установленным в нем дросселем ДР1. Конструктивные параметры этого трубопровода следующие: внутренний диаметр – 8 мм, диаметр отверстия дросселя ДР1 – 3 мм, длины: а–б = 450 мм, б–с = 100 мм.

На стенде установлены расходомеры интегрирующего типа (РА1 и РА2 – скоростные, третий расходомер представляет собой измерительный бачок Б2 с указателем уровня УУ). Слив рабочей жидкости из бака Б2 осуществляется через ventиль В2 (при вращении маховика по часовой стрелке ventиль закрывается). Для определения мгновенного значения расхода с помощью указанных расходомеров используются электронные секундомеры в режиме работы «ручн.».

Для питания всех насосов и слива рабочей жидкости используется один гидробак Б1, который одновременно является несущей системой стенда. Заправочная емкость гидробака Б1 – $65 \div 70 \text{ дм}^3$. Рекомендуемые рабочие жидкости: минеральные масла МГЕ-46В, МГ-30у, М-8В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ

Цель работы: опытное определение величины вязкости жидкости при помощи вискозиметра Энглера.

Теоретическое введение

Вязкостью называется свойство жидкости оказывать сопротивление относительному движению (сдвигу) ее частиц. Вязкость жидкости обуславливается наличием сил внутреннего трения, возникающих при движении реальной жидкости.

Гипотеза о внутреннем трении в жидкостях, впервые высказанная Ньютоном еще в 1687 году, согласно которой силы внутреннего трения, возникающие между соседними движущимися слоями жидкости, прямо пропорциональны скорости относительного движения этих слоев и площади поверхности соприкосновения, вдоль которой совершается относительное движение, в дальнейшем была подтверждена многочисленными исследованиями и стала, таким образом, законом внутреннего трения, который выражается уравнением

$$F = \pm \mu \cdot S \frac{du}{dn}, \quad (1.1)$$

где F – сила внутреннего трения, возникающая между слоями жидкости при их относительном движении; μ – коэффициент абсолютной вязкости, или динамический коэффициент вязкости; S – площадь соприкосновения трущихся слоев жидкости; du/dn – градиент скорости, представляющий собой величину изменения скорости на единицу толщины слоя жидкости.

В результате внутреннего трения в жидкостях возникают касательные напряжения. Касательным напряжением называется сила трения, приходящаяся на единицу площади соприкосновения слоев жидкости.

Из выражения (1.1) следует, что

$$\tau = \frac{P}{S} = \pm \mu \frac{du}{dn}. \quad (1.2)$$

Из формулы (1.2) видно, что динамический коэффициент вязкости μ численно равен касательному напряжению τ при градиенте скорости du/dn , равном единице; знак «+» или «-» относится к du/dn и зависит от направления отсчета.

В международной системе единиц (СИ) динамический коэффициент

вязкости измеряется в $H \cdot c / m^2$ ($Па \cdot c$).

В технической системе единиц (МКС) μ измеряется в $кГ \cdot c / m^2$. $1 кГ \cdot c / m^2 = 9,81 H \cdot c / m^2$.

В физической системе единиц (СГС) единицей измерения динамического коэффициента вязкости является пуаз ($П$). $1 П = 1 дин \cdot c / m^2 = 1 г / см \cdot c = 0,1 H \cdot c / m^2$.

Кроме динамического коэффициента вязкости μ в инженерной практике широко используется и другая характеристика вязкости – кинематический коэффициент вязкости ν , который представляет собой отношение динамического коэффициента вязкости μ к плотности жидкости ρ :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (1.3)$$

В системе СИ и технической системе единиц кинематический коэффициент вязкости измеряется в m^2 / c .

Единица измерения кинематического коэффициента вязкости в физической системе единиц (СГС) называется стокс ($Ст$). $1 Ст = 1 см^2 / c = 10^{-4} m^2 / c$.

Вязкость жидкости может быть выражена и так называемой условной вязкостью ВУ путем сравнения времени истечения одинаковых объемов исследуемой и какой-либо стандартной жидкости из специальных приборов. В отечественной практике принято измерять условную вязкость в градусах Энглера ($^{\circ}E$), в США – в секундах Сейболта ($^{\circ}S$), в Англии – в секундах Редвуда ($^{\circ}R$), во Франции – в градусах Барбье ($^{\circ}B$).

Величина вязкости зависит от температуры и давления. Для капельных жидкостей характерно уменьшение вязкости с повышением температуры. Для газов, напротив, повышение температуры ведет к увеличению вязкости. С увеличением давления вязкость как капельных жидкостей, так и газов растет. При давлениях порядка 1000–2000 МПа большинство капельных жидкостей затвердевает.

Опытное определение вязкости жидкостей производится при помощи специальных приборов, называемых вискозиметрами.

Первый вискозиметр был создан Ломоносовым в 1751 г. под названием «инструмент для исследования вязкости жидких материй по числу капель».

В настоящее время существует несколько различных типов вискозиметров, из которых наибольшее распространение получили следующие: капиллярные вискозиметры, основанные на определении времени протекания исследуемой жидкости по капиллярным трубкам (вискозиметры Воларовича, Пинкевича, Оствальда, Уббелодде и др.); вискозиметры для определения условной вязкости, основанные на сравнении времени истечения через отверстие насадка исследуемой и стандартной жидкостей (вискозиметр Энглера, Сейболта, Редвуда, Барбье и их разновидности); вискозиметры ротационного типа, основанные на измерении скорости вращения под

действием некоторой силы двух расположенных соосно цилиндров, зазор между которыми заполнен исследуемой жидкостью; вискозиметры, основанные на измерении интенсивности затухания крутильных колебаний помещенного в исследуемую жидкость маятника или сосуда с исследуемой жидкостью; вискозиметры, основанные на измерении скорости падения в исследуемой жидкости твердого тела, например, металлического шарика, или всплытия пузырька воздуха (рамочный вискозиметр).

Условная вязкость в градусах Энглера представляет собой отношение времени $T_{жс}$ истечения из вискозиметра Энглера некоторого объема исследуемой жидкости ко времени $T_в$ истечения из него того же объема дистиллированной воды при температуре 20 °С:

$$ВУ(^{\circ}E) = \frac{T_{жс}}{T_в}. \quad (1.4)$$

Описание экспериментальной установки

Вискозиметр Энглера (рис. 1.1) широко применяется для определения вязкости масел и некоторых других жидкостей, более вязких, чем вода.

Прибор состоит из двух концентрически расположенных резервуаров. Внутренний резервуар 5, закрепленный при помощи кронштейна 3 на стойке 2 основания 1, имеет коническое дно, в центре его припаян штуцер 9. В отверстие штуцера вставлена калиброванная трубка – насадка 10, через которую вытекает исследуемая жидкость. Отверстие насадка закрывается заостренным на конце стержнем 8. На внутренней поверхности резервуара 5 имеются три крючка 2, указывающие, до какого уровня необходимо наливать исследуемую жидкость. По этим же крючкам с помощью регулировочных винтов 12, вкручиваемых в основание 1, производится вертикальная установка прибора.

Гайкой на штуцере 9 внутреннего резервуара крепится наружный резервуар 6, играющий роль водяной ванны. Пространство между стенками резервуаров 5 и 6 заполняется водой, которая при необходимости может подогреваться или охлаждаться.

Во время проведения опыта внутренний резервуар закрывается крышкой 7, в центральное отверстие которой проходит запорный стержень 8. Кроме того, в крышке имеется боковое отверстие, в которое при необходимости может вставляться термометр, служащий для контроля температуры исследуемой жидкости.

Под отверстие насадка устанавливается сосуд, служащий для сбора вытекающей из прибора жидкости.

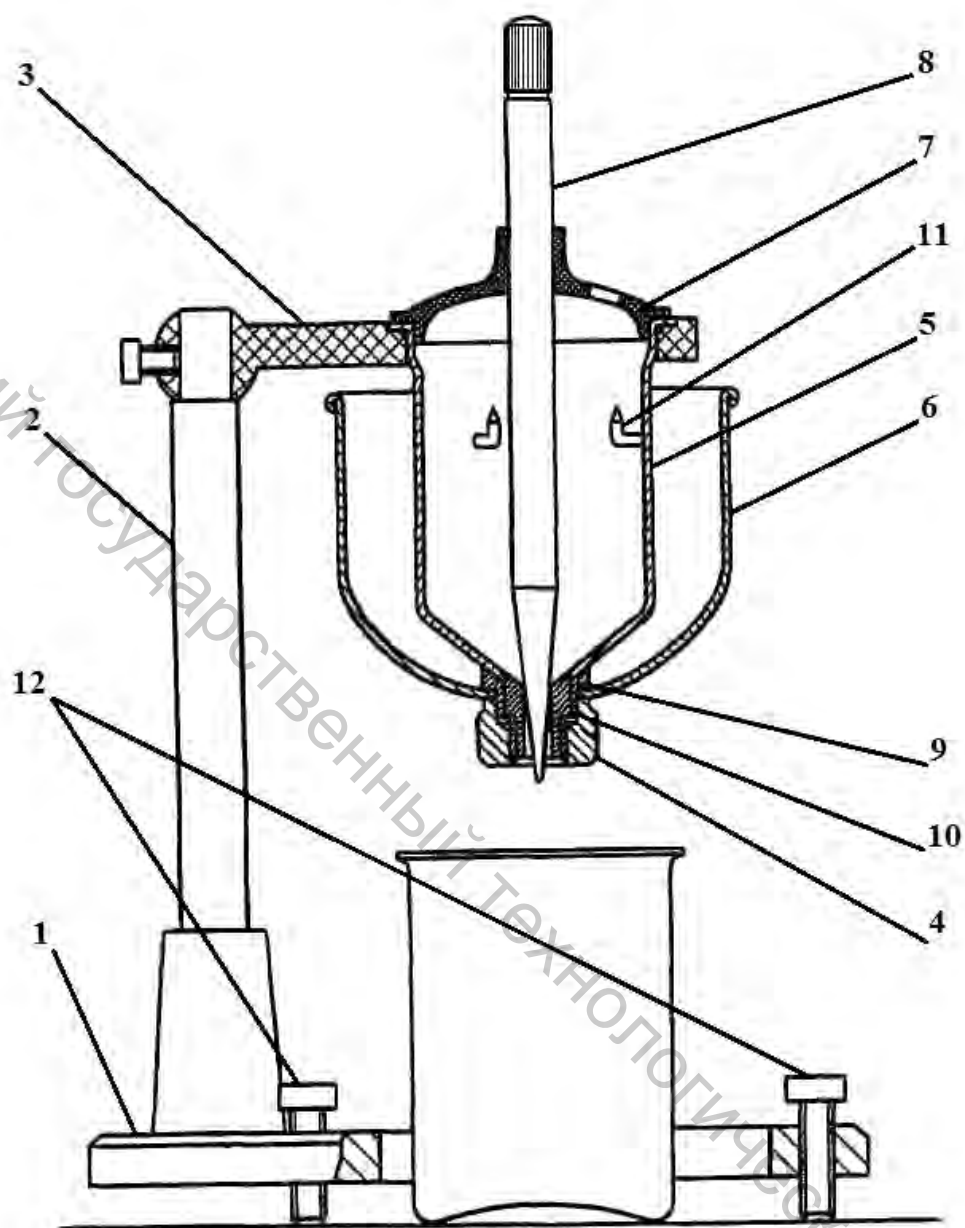


Рисунок 1.1 – Вискозиметр Энглера:

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| 1 – основание; | 7 – крышка; |
| 2 – стойка; | 8 – стержень; |
| 3 – кронштейн; | 9 – штуцер; |
| 4 – гайка; | 10 – насадок; |
| 5 – внутренний резервуар; | 11 – крючки; |
| 6 – наружный резервуар; | 12 – регулировочные винты |

Методика проведения опыта и обработки опытных данных

Перед началом проведения опыта снимают крышку 7 вискозиметра и убеждаются в том, что внутренняя поверхность резервуара 5 и насадка 10 чиста и насухо протерта. Затем в отверстие насадка 10 вставляют стержень 8 и во внутренний резервуар 5 наливают столько исследуемой жидкости, чтобы ее свободная поверхность незначительно прикрывала острия крючков 11; при этом объем жидкости составляет примерно 100 см^3 .

Резервуар с жидкостью закрывают крышкой 7, в боковое отверстие которой вставляют термометр. В наружный резервуар 6 наливают воду, которая либо подогревается, либо охлаждается до тех пор, пока температура исследуемой жидкости в резервуаре 5 не достигнет требуемого значения.

Под отверстие насадка прибора подставляют пустой сосуд, после чего, придерживая крышку вискозиметра, приподнимают стержень 8 и одновременно включают секундомер. Когда истечение жидкости из насадка прекратится, секундомер выключают. Полученное время в секундах и есть время истечения 100 см^3 исследуемой жидкости $T_{жс}$. Для исключения возможных ошибок определение $T_{жс}$ повторяют несколько (обычно 5–7) раз.

В такой же последовательности определяют водное число $T_в$, то есть время истечения 100 см^3 дистиллированной воды при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

По результатам измерений подсчитываются средние значения $T_{жс}$ и $T_в$, которые заносятся в таблицу.

По этим средним значениям по формуле (1.4) определяется условная вязкость исследуемой жидкости, выраженная в градусах Энглера.

Переход от условной вязкости в градусах Энглера к кинематическому коэффициенту вязкости производится по эмпирической формуле Уббелодде:

$$\nu = 0,0731 \cdot \text{ВУ}(\text{ }^\circ\text{E}) - \frac{0,0631}{\text{ВУ}(\text{ }^\circ\text{E})} \text{ (См)}. \quad (1.5)$$

Полученное значение кинематического коэффициента вязкости в Стоксах переводится в единицы системы СИ.

По зависимости (1.3) подсчитывается динамический коэффициент вязкости μ в пуазах, а затем и в единицах систем СИ и МКГСС.

Значение плотности исследуемой жидкости ρ измеряется с помощью ареометра или определяется по справочным таблицам.

Все результаты вычислений заносятся в соответствующие графы таблицы (по форме таблицы 1.1).

Полученные значения сопоставляются со справочными.

Таблица 1.1 – Результаты измерений и расчетов

Исследуемая жидкость				
Температура исследуемой жидкости		t	$^{\circ}C$	
Плотность исследуемой жидкости		ρ	$г/см^3$	
			$кг/м^3$	
Среднее время истечения 100 см^3 жидкости		$T_{ж}$	$с$	
		$T_{в}$	$с$	
Вязкость исследуемой жидкости	Условная	$ВУ$	$^{\circ}E$	
	Кинематическая	ν	$Ст$	
			$м^2/с$	
	Динамическая	μ	Π	
			$кГ\cdot c/м^2$	
$Н\cdot c/м^2$				
По справочнику				

Содержание отчета

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему вискозиметра Энглера.
3. Исходные данные для расчетов и расчетные формулы.
4. Таблицу результатов измерений и расчетов.

Контрольные вопросы

1. Что называется вязкостью жидкости?
2. Что такое динамический коэффициент вязкости, в каких единицах он измеряется?
3. Что такое кинематический коэффициент вязкости, в каких единицах он измеряется?
4. Что такое условная вязкость в градусах Энглера?
5. Каким образом вязкость жидкостей и газов зависит от температуры?
6. Каким образом вязкость жидкостей и газов зависит от давления?
7. Какие существуют основные типы вискозиметров?

Лабораторная работа 2

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Цель работы: изучение различных приборов для измерения давления и опытное определение величины давления жидкости в трубопроводе.

Теоретическое введение

Давление p характеризует интенсивность воздействия сил на поверхность какого-либо тела и представляет собой отношение силы P , равномерно распределенной по перпендикулярной к ней поверхности, к площади этой поверхности F :

$$p = \frac{P}{F}. \quad (2.1)$$

В международной системе единиц (СИ) давление измеряется в паскалях (Па). $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$.

В технической системе единиц (МКС) давление измеряется в кг/м^2 . $1 \text{ кг/м}^2 = 9,81 \text{ Па}$.

В физической системе единиц (СГС) давление измеряется в дин/см^2 . $1 \text{ дин/см}^2 = 0,1 \text{ Па}$.

Существуют также и различные внесистемные единицы для измерения давления, из которых наиболее часто используются бар и атмосфера (техническая и физическая).

$$1 \text{ бар} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0,1 \text{ МПа}.$$

Техническая атмосфера (ат) – давление воздуха на высоте 200 м над уровнем моря, в среднем равное 1 кг/см^2 , то есть $1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2 = 10000 \text{ кг/м}^2 = 98100 \text{ Па}$.

Физическая атмосфера (атм) – давление воздуха на уровне моря на географической широте 45° , соответствующее так называемым нормальным физическим условиям. $1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101325 \text{ Па}$.

В англоязычных странах (Великобритании, США и некоторых других) давление измеряется в psi (pound-force per square inch, лbf/in^2 – фунт силы на квадратный дюйм). $1 \text{ psi} = 6894,76 \text{ Па}$.

Различают абсолютное $p_{\text{абс.}}$, избыточное $p_{\text{изб.}}$ и вакуумметрическое $p_{\text{вак.}}$ давление.

Абсолютным называется такое давление, которое отсчитывается от абсолютного нуля давлений (абсолютного вакуума).

Давление в любой точке жидкости, находящейся в равновесии, определяется по основному уравнению гидростатики

$$p_{\text{абс.}} = p_0 + \gamma \cdot h, \quad (2.2)$$

где $p_{абс}$ – абсолютное (полное) гидростатическое давление; p_0 – давление на свободной поверхности жидкости; γ – удельный вес жидкости; h – глубина погружения рассматриваемой точки.

На практике величина давления обычно измеряется относительно атмосферного, или барометрического, давления $p_{ам.}$. Если абсолютное давление будет больше барометрического ($p_{абс.} > p_{ам.}$), то разность между абсолютным и барометрическим давлением называется манометрическим, или избыточным давлением:

$$P_m = P_{изб.} = P_{абс.} - P_{ам.} \quad (2.3)$$

Абсолютное и избыточное давления, выраженные в технических атмосферах, обозначаются соответственно $p_{ата}$ и $p_{ату}$.

Если абсолютное давление будет меньше барометрического ($p_{абс.} < p_{ам.}$), то разность между барометрическим и абсолютным давлением называется вакуумметрическим давлением (вакуумом):

$$P_{вак.} = P_{ам.} - P_{абс.} \quad (2.4)$$

Вакуум выражается в тех же единицах, что и абсолютное и избыточное давления, а также в долях или процентах атмосферы. Как следует из (2.4), величина вакуума может изменяться от нуля до $p_{ам.}$, то есть максимальным значением вакуума является одно атмосферное давление.

В открытых сосудах (с атмосферным давлением на свободной поверхности жидкости)

$$p_{изб.} = \gamma \cdot h, \quad (2.5)$$

то есть в этом случае избыточное гидростатическое давление внутри жидкости возникает только от веса столба жидкости, расположенного над рассматриваемой точкой.

Величина давления может быть выражена высотой h создающего его столба жидкости согласно выражению

$$h = \frac{P}{\gamma} = \frac{P}{\rho \cdot g}, \quad (2.6)$$

где ρ – плотность жидкости, $кг/м^3$, $g = 9,81 м/с^2$ – ускорение свободного падения. В качестве рабочей жидкости при этом чаще всего используют дистиллированную воду (с плотностью $\rho_{в.} = 1000 кг/м^3$) или ртуть (с плотностью $\rho_{рт.} = 13595 кг/м^3$) и давление выражают соответственно в миллиметрах водяного столба ($мм вод. ст.$) или ртутного столба ($мм рт. ст.$).

Для измерения давления применяются различные приборы: манометры –

для измерения избыточного давления, вакуумметры – для измерения вакуума, дифференциальные манометры – для измерения разности, или перепада, давлений. Все указанные приборы могут быть жидкостными, пружинными, поршневыми, электрическими и комбинированными. На практике наиболее широкое распространение получили жидкостные и пружинные приборы.

Простейшим прибором для измерения избыточного давления жидкостей является пьезометр (рис. 2.1), представляющий собой вертикально расположенную стеклянную трубку. Нижний конец этой трубки присоединяется к резервуару с жидкостью, давление которой необходимо измерить, верхний конец остается открытым и сообщается с атмосферой. Величина избыточного давления в резервуаре будет определяться по высоте h столба жидкости в пьезометре согласно формуле (2.5).

Для измерения давления газов к пьезометру необходимо присоединить емкость («чашку») с рабочей жидкостью, которая, в свою очередь, соединяется с резервуаром, давление газа в котором необходимо измерить. Поскольку площадь поперечного сечения емкости значительно больше, чем пьезометра, изменением уровня жидкости в ней можно пренебречь. Тогда величина избыточного давления в резервуаре будет определяться только по изменению высоты h столба жидкости в пьезометре. Такой прибор называется чашечным манометром (рис. 2.2).

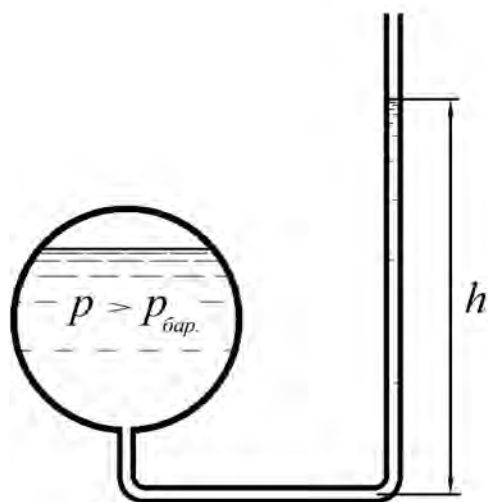


Рисунок 2.1 – Пьезометр

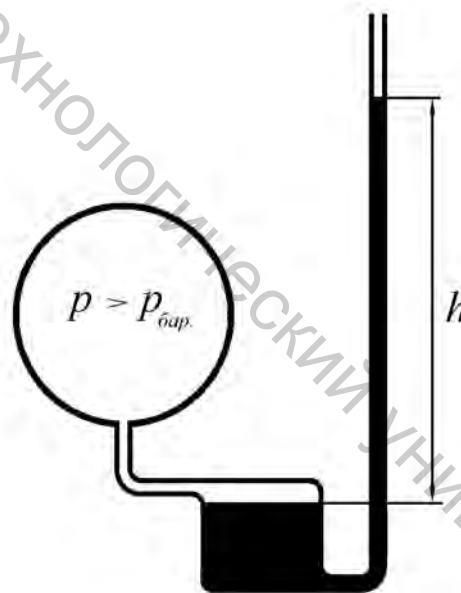


Рисунок 2.2 – Чашечный манометр

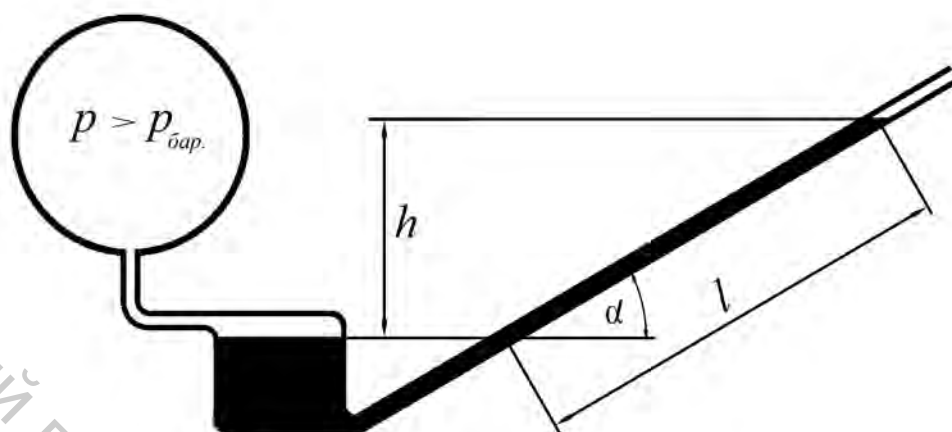


Рисунок 2.3 – Наклонный микроманометр

В тех случаях, когда измерение давления необходимо производить с большой точностью, используются наклонные микроманометры (рис. 2.3), которые являются разновидностью чашечных манометров. Пьезометрическая трубка такого манометра расположена не вертикально, а наклонно, под некоторым углом α к горизонтальной плоскости. Вместо высоты h в этом случае измеряется гораздо большая длина столба жидкости в трубке l , что позволяет существенно уменьшить относительную ошибку, возможную при отсчетах малых величин. Тогда

$$l = \frac{h}{\sin \alpha}, \quad (2.7)$$

а величина измеряемого давления

$$p = \rho \cdot g \cdot l \cdot \sin \alpha. \quad (2.8)$$

Существуют микроманометры с постоянным и переменным углом наклона измерительной трубки. Уменьшение угла наклона при этом способствует увеличению чувствительности прибора.

Простейший вакуумметр (рис. 2.4) фактически представляет собой перевернутый пьезометр. В этом случае верхний конец трубки пьезометра присоединяется к резервуару, давление в котором ниже атмосферного, нижний же ее конец опускается в сосуд с рабочей жидкостью. Величина разрежения (вакуума) в резервуаре будет определяться по высоте h подъема столба жидкости в трубке вакуумметра.

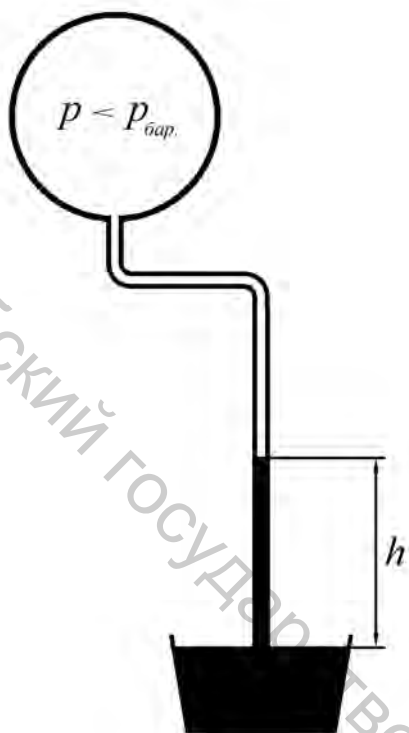


Рисунок 2.4 – Вакуумметр

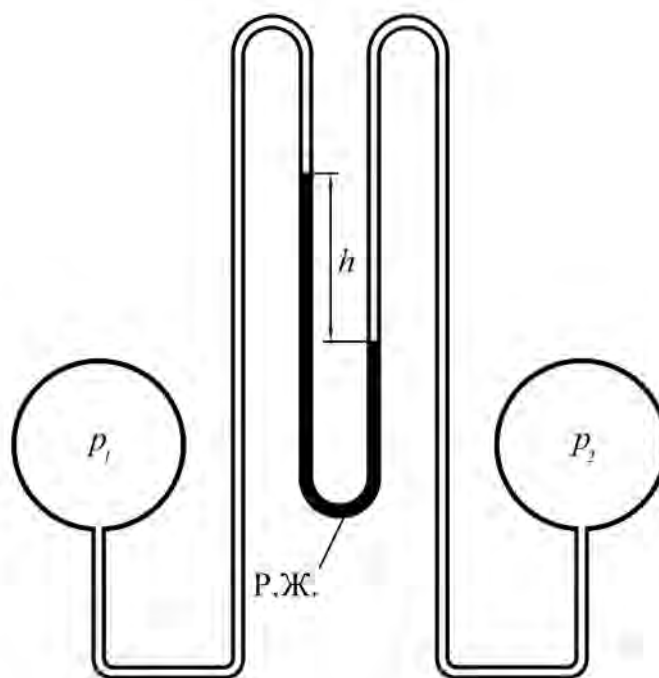


Рисунок 2.5 – Дифференциальный манометр

Для измерения разности, или перепада, давления используется дифференциальный манометр (рис. 2.5). Он представляет собой изогнутую в виде буквы U стеклянную трубку с налитой в нее рабочей жидкостью (Р.Ж.). При больших разностях давлений в качестве рабочей жидкости применяется ртуть, а для измерения небольших перепадов давлений возможно применение воды, спирта, масла и некоторых других жидкостей. Оба конца трубки манометра присоединяются к двум резервуарам с различными давлениями p_1 и p_2 , и по разности уровней рабочей жидкости в трубках дифференциального манометра может быть определен перепад этих давлений Δp

$$\Delta p = p_2 - p_1 = h \cdot (\gamma_{p.ж.} - \gamma), \quad (2.9)$$

где h – разность уровней в обеих трубках манометра; $\gamma_{p.ж.}$ – удельный вес рабочей жидкости; γ – удельный вес жидкости, в которой измеряется перепад давлений.

Жидкостные манометры являются простыми, надежными и достаточно точными приборами, но предназначены они для работы только в спокойных условиях, поскольку чувствительны к ударам, вибрации и резким колебаниям давления. Кроме того, жидкостные манометры пригодны для измерения только сравнительно небольших давлений, что ограничивается длиной трубки прибора.

Наиболее широкое применение в практике измерения давления получили так называемые трубчатые или пружинные манометры (рис. 2.6). Основной рабочей частью такого манометра является изготовленная из стали или латуни изогнутая трубка 1, имеющая овальное сечение. Один, открытый, конец этой трубки закреплен в основании манометра 2, которое при помощи штуцера 3 может присоединяться к сосуду, давление в котором необходимо измерить. Второй конец трубки, закрытый, через зубчато-рычажный передаточный механизм 4 связан со стрелкой 5. При увеличении давления трубка разгибается и стрелка поворачивается вокруг своей оси. Угол поворота стрелки практически линейно зависит от величины давления.

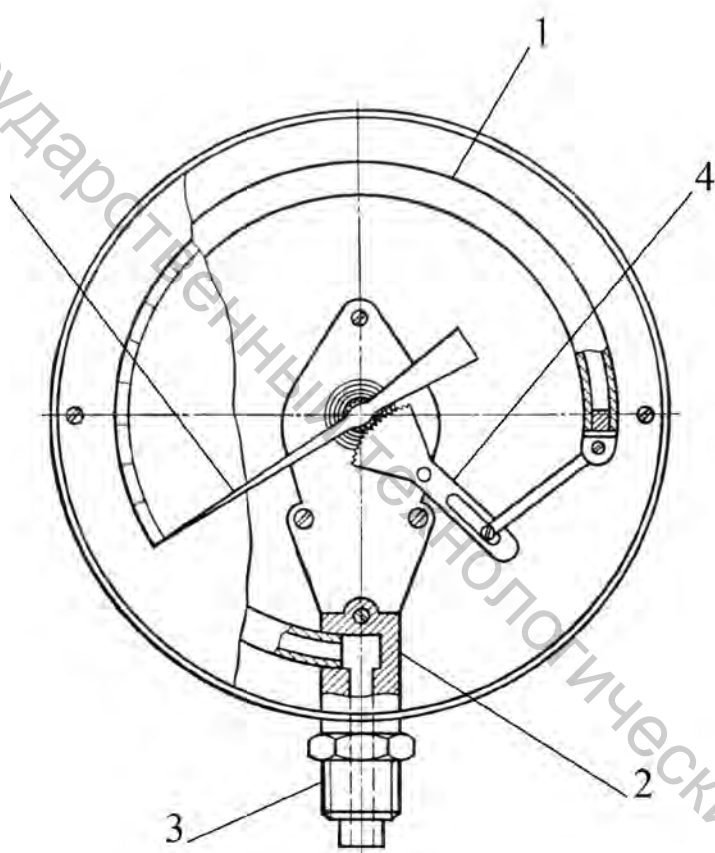


Рисунок 2.6 – Трубчатый манометр

Трубчатые манометры являются вторичными приборами и тарируются по первичным манометрам.

Точность трубчатого манометра ограничена наличием остаточных деформаций трубки, появляющихся во время работы прибора. Показания трубчатого манометра не очень стабильны, манометр следует не реже 1 раза в год тарировать с целью определения необходимых поправок.

Описание экспериментальной установки

Лабораторная работа выполняется с использованием подсистемы «Гидравлика» лабораторного стенда НТЦ-11.38 «Гидравлика, гидромашины и гидроприводы».

Используемая при выполнении работы часть экспериментальной установки (рис. 2.7) состоит из электродвигателя М1 1, приводящего во вращение насос Н1 2, который подает масло в трубопровод а–b–с 3. Расход масла может регулироваться при помощи регулятора расхода РР1 4. Величина избыточного давления в начале трубопровода измеряется манометром МН1 5.

Методика проведения опыта и обработки опытных данных

При проведении лабораторной работы рукоятка распределителя Р1 должна находиться в положении I (верхнее).

Для выполнения работы необходимо сначала подключить стенд к электросети и включить питание стенда, переведя рубильник «Сеть» в верхнее положение. Затем нажатием кнопки «Пуск» на панели М1 включается электродвигатель М1. После этого следует включить распределитель Р2, переведя тумблер Р2 в положение «вкл.». Распределитель Р3 должен быть выключен (тумблер Р3 должен находиться в положении «выкл.»).

Перед началом проведения измерений необходимо дать возможность стенду поработать в течение 5–6 минут.

Изменяя при помощи регулятора расхода РР1 величину расхода жидкости в трубопроводе (поворот маховика регулятора по часовой стрелке приводит к увеличению расхода), снимают показания манометра МН1. Измерения проводят при нескольких (5–10) значениях расхода.

После проведения всех опытов необходимо выключить электродвигатель и отключить питание стенда.

По измеренным данным определяется величина избыточного давления жидкости в начальной точке трубопровода $p_{изб}$ в Па.

Затем полученные значения переводятся из системы СИ в единицы других систем (кГ/м^2 , дин/см^2 , psi) и внесистемные единицы (бар , ат , атм) согласно соотношениям, приведенным в теоретическом введении настоящей работы. При определении давления в миллиметрах водяного столба и миллиметрах ртутного столба следует исходить из уравнения (2.6). Тогда

$$p \text{ (мм вод. ст.)} = \frac{p \text{ (Па)}}{\rho_{в.} \cdot g} \cdot 1000, \quad (2.10)$$

$$p \text{ (мм рт. ст.)} = \frac{p \text{ (Па)}}{\rho_{рт.} \cdot g} \cdot 1000. \quad (2.11)$$

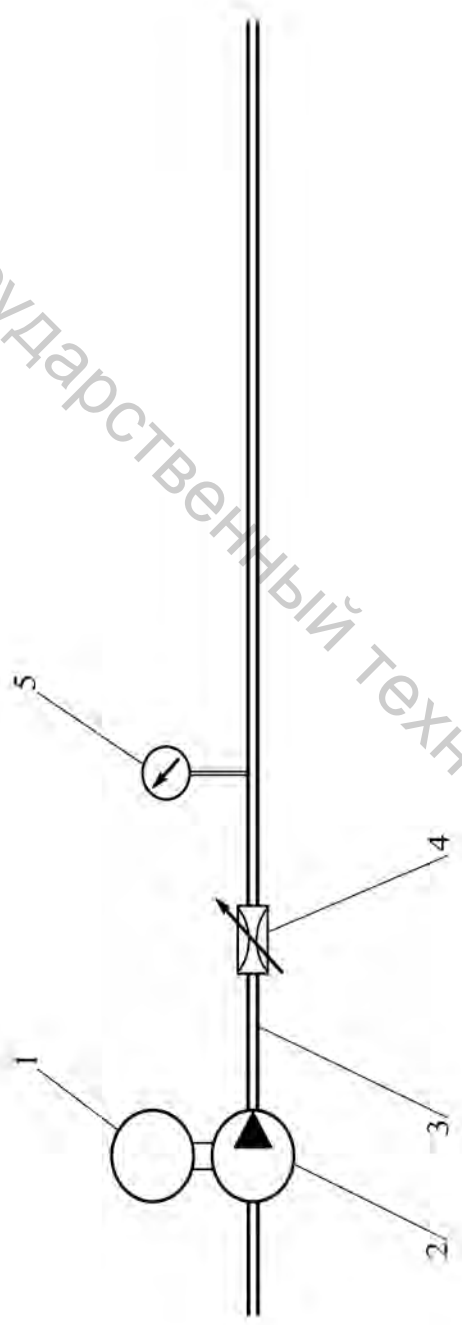


Рисунок 2.7 – Схема экспериментальной установки:

- 1 – электродвигатель М1;
- 2 – насос Н1;
- 3 – трубопровод;
- 4 – регулятор расхода РР1;
- 5 – манометр МН1

Все результаты измерений и расчетов заносятся в таблицу, составленную по форме таблицы 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты измерений и расчетов

№ опыта		1	2	3	4	5
Показания манометра, МПа						
Избыточное давление $p_{изб.}$	Па					
	кГ/м ²					
	дин/см ²					
	бар					
	ат					
	атм					
	мм вод. ст.					
	мм рт. ст.					
psi						

Содержание отчета

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему экспериментальной установки.
3. Исходные данные для расчетов и расчетные формулы.
4. Таблицу результатов измерений и расчетов.

Контрольные вопросы

1. Что называется давлением, в каких единицах оно измеряется?
2. Как выглядит основное уравнение гидростатики?
3. Что называется манометрическим и вакуумметрическим давлением?
4. Что такое техническая атмосфера?
5. Что такое физическая атмосфера?
6. Что представляют собой и как работают пьезометр и вакуумметр?
7. В чем состоит преимущество наклонного микроманометра?
8. Для чего предназначен дифференциальный манометр?
9. Как работает трубчатый манометр?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДЕ

Цель работы: определение по опытным данным значений чисел Рейнольдса и режимов течения жидкости в трубопроводе круглого сечения.

Теоретическое введение

В природе существуют два различных по своему характеру режима движения жидкости: ламинарный и турбулентный.

Ламинарный режим движения жидкости – это такой режим, при котором траектории движения частиц жидкости не пересекаются, движение жидкости носит упорядоченный, струйчатый характер и перемешивания жидкости не происходит.

Турбулентный режим – это такой режим, при котором траектории движения частиц жидкости пересекаются между собой, движение жидкости носит хаотичный, вихревой характер. При этом происходит интенсивное перемешивание жидкости, сопровождающееся пульсациями скорости и давления.

Ламинарный режим наблюдается преимущественно при движении вязких жидкостей, таких как смазочные масла, нефть, мазут, битум и тому подобное, а также при движении воды в трубках малого диаметра (капиллярах) и в порах грунта. В подавляющем большинстве случаев при движении воды и других сравнительно маловязких жидкостей (спирт, керосин, бензин) наблюдается турбулентный режим движения.

При увеличении скорости движения жидкости ламинарный режим в какой-то момент сменяется турбулентным, который при уменьшении скорости потока опять переходит в ламинарный. Скорость, при которой происходит смена режимов движения жидкости, называется критической скоростью $v_{кр.}$.

Необходимо отметить, что поток жидкости обладает определенной инертностью и процесс перехода одного режима движения жидкости в другой не является полностью обратимым: переход ламинарного режима в турбулентный всегда происходит при значительно больших скоростях, чем обратный переход турбулентного режима в ламинарный. Соответственно различают две критические скорости: верхнюю $v_{кр.в.}$ и нижнюю $v_{кр.н.}$. При верхней критической скорости ламинарный режим движения переходит (при увеличении скорости потока) в турбулентный, а при нижней критической скорости турбулентный режим движения переходит (при уменьшении скорости) в ламинарный. При этом всегда $v_{кр.в.} > v_{кр.н.}$.

Однако режим движения зависит не только от скорости, но также от вязкости жидкости и от геометрических размеров русла. Все эти величины входят в безразмерный комплекс, называемый числом Рейнольдса (Re),

который и является критерием, однозначно определяющим режим движения жидкости.

Для напорного движения жидкости в круглых трубах число Рейнольдса рассчитывается по формуле:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (3.1)$$

где v – средняя скорость движения потока жидкости; d – внутренний диаметр трубы; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости.

Для труб некруглого сечения и для открытых потоков при расчете числа Рейнольдса вместо диаметра d вводится так называемый гидравлический радиус R , представляющий собой отношение площади живого сечения потока ω к смоченному периметру χ :

$$R = \frac{\omega}{\chi}. \quad (3.2)$$

В соответствии с наличием двух критических скоростей различают и два критических значения числа Рейнольдса: нижнее критическое число Рейнольдса $Re_{кр.н.}$, определяемое при нижней критической скорости, и верхнее критическое число Рейнольдса $Re_{кр.в.}$, определяемое при верхней критической скорости. В результате тщательно поставленных экспериментов было установлено, что переход ламинарного режима движения жидкости в турбулентный происходит приблизительно при $Re_{кр.в.} = 10000$, а переход турбулентного режима движения жидкости в ламинарный – при $Re_{кр.н.} = 2320$.

Следует отметить, что при движении жидкости в трубах в отдельных случаях путем устранения источников возмущения потока удается задержать переход от ламинарного движения к турбулентному до значений числа Рейнольдса, достигающих 100000–150000. Но при больших значениях Re ламинарный режим является крайне неустойчивым и достаточно небольшого возмущения, чтобы движение перешло в турбулентное.

Таким образом, всегда можно считать, что при значениях $Re < 2320$ движение жидкости будет ламинарным, а при значениях $Re > 10000$ – турбулентным.

В интервале значений Re от 2320 до 10000 может иметь место как ламинарный, так и турбулентный режим движения, в зависимости от того, происходит увеличение или уменьшение скорости течения потока жидкости. Поскольку в этом случае определить режим движения только по значению числа Рейнольдса невозможно, такое движение иногда называют неопределенным.

Выявление характера режима движения жидкостей и газов имеет большое значение во многих областях инженерной практики (гидротехника,

теплотехника и т. д.). Так, при разных режимах движения имеют место различные зависимости между потерями напора и средними скоростями движения.

Описание экспериментальной установки

Лабораторная работа выполняется с использованием подсистемы «Гидравлика» лабораторного стенда НТЦ-11.38 «Гидравлика, гидромашины и гидроприводы».

Используемая при выполнении работы часть экспериментальной установки (рис. 3.1) состоит из электродвигателя М1 1, приводящего во вращение насос Н1 2, который подает рабочую жидкость в трубопровод а–b–с 3 внутренним диаметром $d = 8 \text{ мм} = 0,008 \text{ м}$. Расход жидкости может регулироваться при помощи регулятора расхода РР1 4. Измерение расхода осуществляется расходомером РА1 5.

Методика проведения опыта и обработки опытных данных

При проведении лабораторной работы рукоятка распределителя Р1 должна находиться в положении I (верхнее).

Для выполнения работы необходимо сначала подключить стенд к электросети и включить питание стенда, переведя рубильник «Сеть» в верхнее положение. Затем нажатием кнопки «Пуск» на панели М1 включается электродвигатель М1. После этого следует включить распределитель Р2, переведя тумблер Р2 в положение «вкл.». Распределитель Р3 должен быть выключен (тумблер Р3 должен находиться в положении «выкл.»).

Перед началом проведения измерений необходимо дать возможность стенду поработать в течение 5–6 минут.

Затем включается электронный секундомер, переведя тумблер в положение «вкл.». Тумблер переключения режимов работы секундомера должен находиться в положении «ручн.».

Величина расхода жидкости в трубопроводе изменяется при помощи регулятора расхода РР1 (поворот маховика регулятора по часовой стрелке приводит к увеличению расхода). Установив некоторое значение расхода, осуществляют замеры времени T прохождения заданного объема рабочей жидкости V через трубопровод а–b–с. Время измеряется с помощью электронного секундомера, а объем проходимой жидкости определяется с помощью расходомера РА1 (один оборот крайней левой стрелки на расходомере соответствует прохождению через устройство $0,001 \text{ м}^3$ жидкости). Измерения проводят при нескольких (5–10) значениях расхода. После каждого измерения показания секундомера обнуляются нажатием кнопки «Сброс».

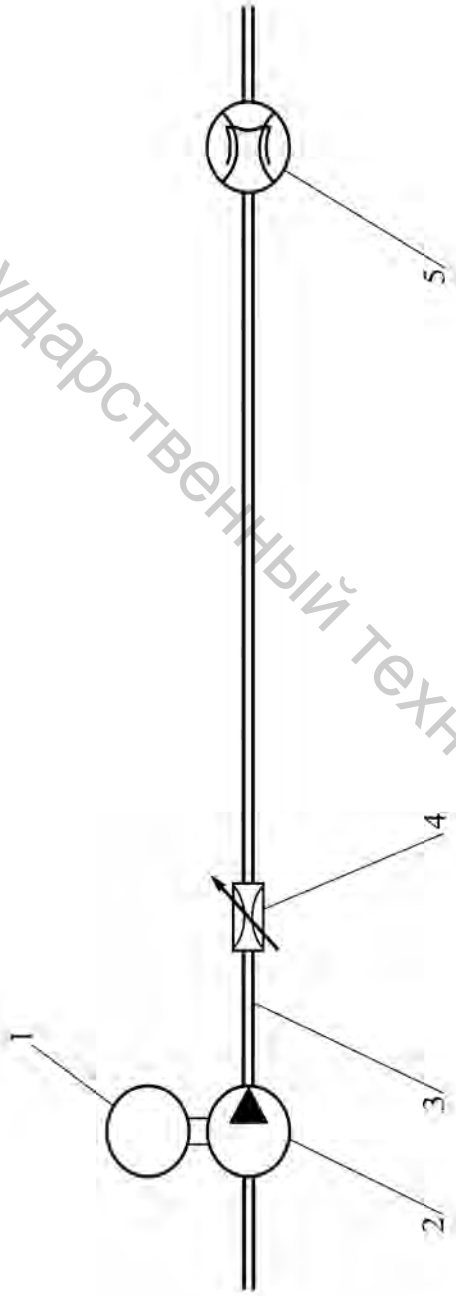


Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки:

- 1 – электродвигатель М1;
- 2 – насос Н1;
- 3 – трубопровод;
- 4 – регулятор расхода РР1;
- 5 – расходомер РА1

В каждом опыте следует также фиксировать температуру рабочей жидкости.

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

Расход жидкости

$$Q = \frac{V}{T} . \quad (3.3)$$

Площадь поперечного сечения трубопровода определяется по формуле

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4} , \quad (3.4)$$

где d – внутренний диаметр трубы установки.

Затем по найденному расходу жидкости в трубе Q и площади ее поперечного сечения рассчитывается средняя скорость

$$v = \frac{Q}{\omega} . \quad (3.5)$$

По формуле (3.1) для каждого опыта соответственно найденным значениям скорости потока подсчитывается величина числа Рейнольдса Re .

Сравнивая полученные значения Re с $Re_{кр.в.}$ и $Re_{кр.н.}$, определяют соответствующий каждому опыту режим движения жидкости в трубе.

Все измеренные значения и результаты вычислений заносят в таблицу, составленную по форме таблицы 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты измерений и расчетов

№ опыта	Объем жидкости	Время истечения	Расход жидкости	Средняя скорость	Число Рейнольдса	Режим движения жидкости
	V	T	Q	v	Re	
	$м^3$	$с$	$м^3/с$	$м/с$	–	
1						
2						
3						
4						
...						

Содержание отчета

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему экспериментальной установки.
3. Исходные данные для расчетов и расчетные формулы.
4. Таблицу результатов измерений и расчетов.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют режимы движения жидкости?
2. Что является однозначной характеристикой режима движения?
3. Что называется нижней и верхней критической скоростью, нижним и верхним критическим числом Рейнольдса?
4. При каких значениях числа Рейнольдса движение будет ламинарным, а при каких – турбулентным?
5. В чем состоит особенность движения жидкостей повышенной вязкости и жидкостей, движущихся по капиллярам?

ПОСТРОЕНИЕ ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКОЙ И НАПОРНОЙ ЛИНИЙ ТРУБОПРОВОДА

Цель работы: опытное определение составляющих уравнения Бернулли, а также построение пьезометрической и напорной линий трубопровода.

Теоретическое введение

Пьезометрическая и напорная линии представляют собой графики изменения по длине потока соответственно пьезометрического и гидродинамического напоров, входящих в состав уравнения Бернулли.

Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости при установившемся движении имеет следующий вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_n. \quad (4.1)$$

Это уравнение широко применяется при исследовании различных теоретических вопросов гидравлики и при решении практических задач, связанных с движением жидкости.

Для лучшего понимания сущности уравнения Бернулли и приобретения навыков его практического применения выясним гидравлический, а также геометрический и физический, или энергетический, смысл слагаемых, входящих в это уравнение.

Каждое из слагаемых уравнения Бернулли имеет линейную размерность и в гидравлическом смысле представляет собой некоторую высоту или напор.

Первое слагаемое уравнения, z , определяет высоту положения центра тяжести живого сечения потока над произвольно выбранной горизонтальной плоскостью сравнения 0–0 (рис. 4.1) и называется геометрической высотой или геометрическим напором.

Второе слагаемое уравнения, p/γ , представляет собой высоту такого столба жидкости, который произвел бы давление, равное действительно существующему в данной точке живого сечения потока гидродинамическому давлению. Эта величина, определяемая непосредственно по показанию пьезометра, называется пьезометрической высотой.

Третье слагаемое уравнения, $\alpha v^2/2g$, характеризует собой высоту, при падении с которой в безвоздушном пространстве частица жидкости приобрела бы в конце пути скорость, равную действительной скорости потока в данной точке живого сечения. Такую высоту в гидравлике принято называть скоростной высотой или скоростным напором. Здесь v – средняя скорость потока в рассматриваемом живом сечении; α – безразмерный коэффициент

кинетической энергии (коэффициент Кориолиса), учитывающий неравномерность распределения скорости по живому сечению потока. В действительности этот коэффициент всегда больше единицы, однако во многих случаях (например, при расчете труб и каналов) для упрощения допустимо принимать $\alpha = 1$.

Наконец, слагаемое h_n выражает собой суммарную потерю напора при движении жидкости на всем участке между рассматриваемыми сечениями потока.

Геометрический смысл уравнения Бернулли легко уяснить при рассмотрении движения жидкости в трубе, изображенной на схеме, приведенной на рисунке 4.1. На этой схеме участок потока выделен двумя сечениями, 1–1 и 2–2, между которыми произвольно взято промежуточное сечение X–X (в общем случае таких сечений может быть несколько). Центры тяжести рассматриваемых сечений расположены от плоскости сравнения 0–0 на расстоянии, равном соответственно z_1 , z_2 и z_X .

Отложим вертикально вверх от центра тяжести сечения 1–1 пьезометрическую высоту p_1 / γ и сделаем то же для сечений X–X и 2–2.

Кривая 2–2, соединяющая вершины вертикальных отрезков, изображающих суммы геометрических и пьезометрических высот $z + p / \gamma$, называется пьезометрической линией; падение ее на единицу длины – пьезометрическим уклоном I_n . Поскольку пьезометрическая линия может понижаться (при увеличении скорости вдоль потока) или повышаться (при уменьшении скорости), пьезометрический уклон может быть либо положительным, либо отрицательным.

Затем, также вертикально вверх, отложим для всех трех рассматриваемых сечений скоростную высоту $\alpha v^2 / 2g$. Кривая Н–Н, соединяющая верхние концы сумм всех трех указанных вертикальных отрезков, называется напорной линией, а сумма трех высот называется гидродинамическим напором:

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g} = H. \quad (4.2)$$

Для идеальной жидкости H является постоянной величиной и, следовательно, напорная линия будет параллельна плоскости сравнения 0–0, то есть будет горизонтальна. При движении же реальной жидкости гидродинамический напор вдоль потока всегда уменьшается, так как часть напора h_n затрачивается на преодоление сопротивлений движению. Таким образом, кривая Н–Н будет являться нисходящей линией. Падение ее на единицу длины называется гидравлическим уклоном I .

При равномерном движении, когда средняя скорость на рассматриваемом участке во всех сечениях одинакова, напорная и пьезометрическая линии представляют собой взаимно параллельные прямые. В этом случае $I = I_n$.

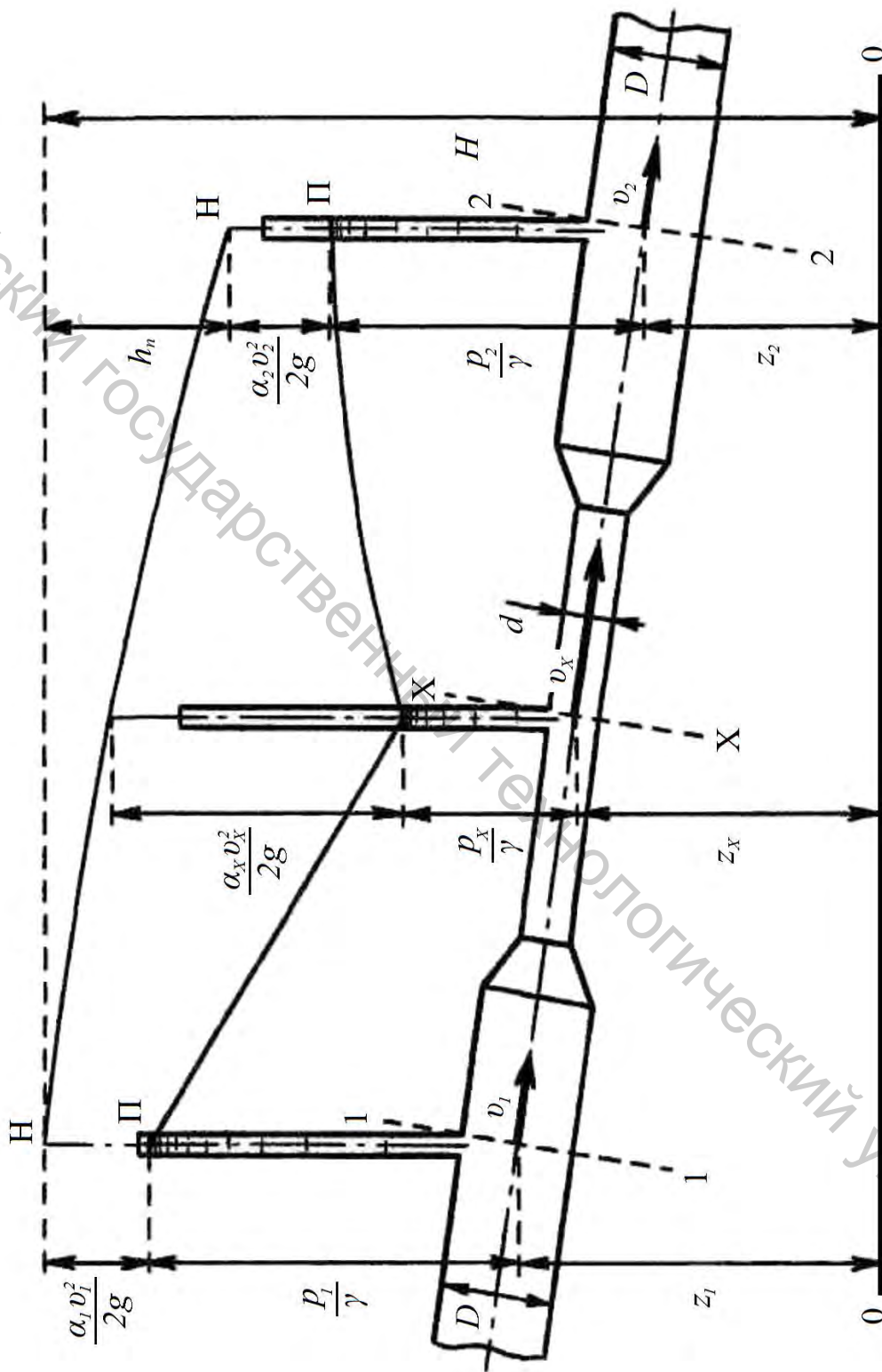


Рисунок 4.1 – Схема построения пьезометрической и напорной линий трубопровода переменного сечения

Физический смысл уравнения Бернулли заключается в том, что каждый из членов этого уравнения представляет собой тот или иной вид удельной энергии: геометрическая высота характеризует удельную потенциальную энергию положения, пьезометрическая высота – удельную потенциальную энергию давления, а скоростная высота – удельную кинетическую энергию потока жидкости.

Сумма всех трех составляющих характеризует собой полную удельную энергию жидкости E в рассматриваемом сечении потока:

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g} = E. \quad (4.3)$$

Тогда уравнение (4.1) может быть записано в следующем виде:

$$E_1 = E_2 + h_n. \quad (4.4)$$

Из выражения (4.4) можно сделать вывод, что уменьшение полной удельной энергии потока жидкости на участке между сечениями 1–1 и 2–2 обуславливается наличием гидравлических сопротивлений. На преодоление этих сопротивлений и затрачивается часть удельной энергии.

С энергетической точки зрения кривую Н–Н (рис. 4.1) следует называть линией полной удельной энергии, а кривую 2–2 – линией удельной потенциальной энергии.

Уравнение Бернулли является частным выражением всеобщего закона сохранения энергии в природе применительно к движению жидкости.

Описание экспериментальной установки

Лабораторная работа выполняется с использованием подсистемы «Гидравлика» лабораторного стенда НТЦ-11.38 «Гидравлика, гидромашины и гидроприводы».

Используемая при выполнении работы часть экспериментальной установки (рис. 4.2) состоит из электродвигателя М1 1, приводящего во вращение насос Н1 2, который подает рабочую жидкость в трубопровод а–б–с 3 внутренним диаметром $d = 8 \text{ мм} = 0,008 \text{ м}$. Длина участка а–б $l_{a-b} = 450 \text{ мм}$, участка б–с $l_{b-c} = 100 \text{ мм}$. Между точками б и с трубопровода находится дроссель ДР1 5 с отверстием диаметром 3 мм.

Расход жидкости может регулироваться при помощи регулятора расхода РР1 4. Для измерения давления жидкости в точках а, б и с трубопровода установлены соответственно манометры МН1 6, МН2 7 и МН3 8.

Измерение расхода жидкости в трубопроводе осуществляется расходомером РА1 5.

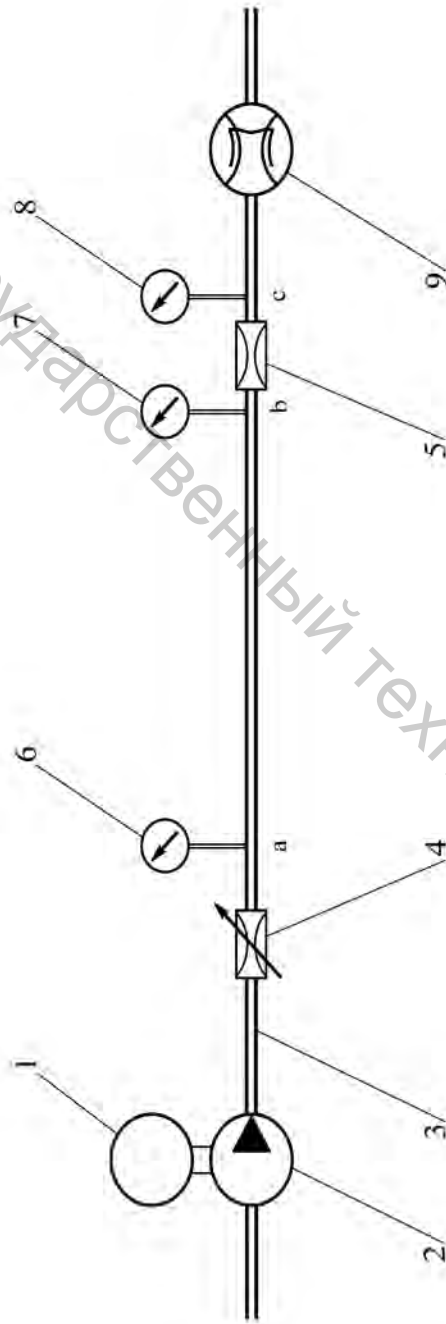


Рисунок 4.2 – Схема экспериментальной установки:

- | | |
|----------------------------|--------------------|
| 1 – электродвигатель М1; | 6 – манометр МН1; |
| 2 – насос Н1; | 7 – манометр МН2; |
| 3 – трубопровод; | 8 – манометр МН3; |
| 4 – регулятор расхода РР1; | 9 – расходомер РА1 |
| 5 – дроссель ДР1; | |

Методика проведения опыта и обработки опытных данных

При проведении лабораторной работы рукоятка распределителя P1 должна находиться в положении I (верхнее).

Для выполнения работы необходимо сначала подключить стенд к электросети и включить питание стенда, переведя рубильник «Сеть» в верхнее положение. Затем нажатием кнопки «Пуск» на панели M1 включается электродвигатель M1. После этого следует включить распределитель P2, переведя тумблер P2 в положение «вкл.». Распределитель P3 должен быть выключен (тумблер P3 должен находиться в положении «выкл.»).

Перед началом проведения измерений необходимо дать возможность стенду поработать в течение 5–6 минут.

Затем включается электронный секундомер, переведя тумблер в положение «вкл.». Тумблер переключения режимов работы секундомера должен находиться в положении «ручн.».

Величина расхода жидкости в трубопроводе изменяется при помощи регулятора расхода PP1 (поворот маховика регулятора по часовой стрелке приводит к увеличению расхода). Установив некоторое значение расхода, осуществляют замеры времени T прохождения заданного объема рабочей жидкости V через трубопровод a–b–c. Время измеряется с помощью электронного секундомера, а объем проходимой жидкости определяется с помощью расходомера PA1 (один оборот крайней левой стрелки на расходомере соответствует прохождению через устройство $0,001 \text{ м}^3$ жидкости).

Также определяется величина давления жидкости в точках a, b и c трубопровода по показаниям манометров MN1, MN2 и MN3.

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

По формуле

$$Q = \frac{V}{T} \quad (4.5)$$

рассчитывается расход жидкости в трубопроводе.

Определяются площади живых сечений трубопровода, в которых установлены манометры:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (4.6)$$

где d – внутренний диаметр трубопровода, м.

Затем подсчитываются средние скорости течения жидкости во всех рассматриваемых сечениях трубопровода по формуле

$$v = \frac{Q}{\omega}. \quad (4.7)$$

Значения удельной потенциальной энергии

$$E_n = z + \frac{P}{\gamma} \quad (4.8)$$

определяются по показаниям манометров. Поскольку ось трубопровода расположена горизонтально, плоскость, в которой она лежит, можно принять за плоскость сравнения. Тогда для всех сечений трубопровода геометрическая высота $z = 0$. Удельный вес жидкости

$$\gamma = \rho \cdot g, \quad (4.9)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3 , $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Вычисляется удельная кинетическая энергия потока

$$E_k = \frac{v^2}{2g}. \quad (4.10)$$

Полная удельная энергия потока в сечениях подсчитывается как сумма удельной потенциальной и удельной кинетической энергий

$$E = E_n + E_k. \quad (4.11)$$

Потери энергии на участках между рассматриваемыми сечениями (относительно сечения 1) определяются по разности полных удельных энергий в этих сечениях

$$h_n = E_1 - E_i. \quad (4.12)$$

Все результаты вычислений заносятся в таблицу (по форме табл. 4.1).

На миллиметровой бумаге вычерчивают схему трубопровода. На эту схему наносят в определенном масштабе найденные по показаниям манометров пьезометрические высоты и проводят пьезометрическую линию. Затем по вычисленным значениям удельной кинетической энергии откладывают скоростные высоты и проводят напорную линию.

Таблица 4.1 – Результаты измерений и расчетов

Объем жидкости $V, м^3$			
Время истечения $T, с$			
Расход жидкости $Q, м^3/с$			
№ сечения	1	2	3
Площадь живого сечения трубопровода $\omega, м^2$			
Скорость потока жидкости $v, м/с$			
Удельная потенциальная энергия $E_n, м$			
Удельная кинетическая энергия $E_k, м$			
Полная удельная энергия $E, м$			
Потери энергии (напора) $h_n, м$			

Содержание отчета

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему экспериментальной установки.
3. Исходные данные для расчетов и расчетные формулы.
4. Таблицу результатов измерений и расчетов.
5. Схему трубопровода с нанесенными пьезометрической и напорной линиями.

Контрольные вопросы

1. Записать уравнение Бернулли для потока жидкости.
2. Сформулировать гидравлический смысл уравнения Бернулли.
3. Сформулировать геометрический смысл уравнения Бернулли.
4. Сформулировать энергетический смысл уравнения Бернулли.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРЕНИЯ ПО ДЛИНЕ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДЕ

Цель работы: изучение методики экспериментального определения коэффициента сопротивления трения по длине (коэффициента Дарси) при движении жидкости по трубопроводу и сравнение полученных результатов со значениями, вычисленными по некоторым эмпирическим формулам.

Теоретическое введение

При движении реальных жидкостей возникают силы трения, оказывающие сопротивление движению. На преодоление этих сил затрачивается часть механической энергии, которой обладает движущаяся жидкость.

Если выделить двумя сечениями некоторый участок потока, то энергия $h_{\text{дл.}}$, затраченная на преодоление сопротивлений по длине между ними, может быть определена как разность полных удельных энергий в этих сечениях, то есть

$$h_{\text{дл.}} = E_1 - E_2 = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} + \frac{p_1 - p_2}{\gamma} + (z_1 - z_2). \quad (5.1)$$

Для горизонтальной трубы постоянного сечения это выражение принимает следующий вид

$$h_{\text{дл.}} = \frac{p_1 - p_2}{\gamma}. \quad (5.2)$$

Из выражения (5.2) следует, что можно экспериментально определять потери напора (энергии) по длине потока только по показаниям пьезометров (манометров), установленных в конечных сечениях этого потока.

Для вычисления потерь энергии по длине при движении жидкости по трубам используют Формулу Дарси-Вейсбаха:

$$h_{\text{дл.}} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (5.3)$$

где λ – коэффициент сопротивления трения по длине, или коэффициент Дарси (безразмерный); d – внутренний диаметр трубы; L – длина участка трубы; v – средняя скорость движения жидкости; g – ускорение свободного падения.

Формула Дарси-Вейсбаха может быть приведена к общему виду формул для определения потерь напора:

$$h_{\text{дл.}} = \xi_{\text{дл.}} \frac{v^2}{2g}, \quad (5.4)$$

где

$$\xi_{\text{дл.}} = \lambda \frac{L}{d}$$

называется коэффициентом потерь по длине.

Из формулы (5.3) следует, что для определения величины потери напора по длине необходимо знать значение коэффициента λ .

Для определения коэффициента Дарси предложен ряд формул, учитывающих зависимость его от различных факторов: размеров поперечного сечения труб, шероховатости их стенок и величины числа Рейнольдса.

Этот вопрос находится в тесной связи с современными воззрениями на структуру турбулентного потока, согласно которым турбулентные потоки состоят из пограничного слоя и турбулентного ядра. Пограничный слой расположен непосредственно у стенок труб, каналов и т. д. и состоит из тонкого слоя жидкости с ламинарным движением, называемого ламинарной пленкой, и переходного слоя.

Толщина ламинарной пленки может быть определена выражением

$$\delta_{\text{пл.}} = \frac{30d}{Re\sqrt{\lambda}}. \quad (5.5)$$

Таким образом, видно, что толщина ламинарной пленки зависит от числа Рейнольдса, а, следовательно, и от средней скорости движения жидкости. Чем меньше средняя скорость потока жидкости, тем толще ламинарная пленка, и наоборот, с увеличением скорости движения жидкости толщина ламинарной пленки уменьшается, достигая в некоторых случаях долей миллиметра.

Если через Δ обозначить абсолютную шероховатость, которая представляет собой высоту выступов шероховатости, то в зависимости от соотношения толщины ламинарной пленки и абсолютной шероховатости различают стенки гидравлически гладкие, когда толщина ламинарной пленки превышает величину абсолютной шероховатости ($\delta_{\text{пл.}} > \Delta$), и гидравлически шероховатые, когда толщина ламинарной пленки оказывается меньше величины абсолютной шероховатости ($\delta_{\text{пл.}} < \Delta$).

Деление поверхностей на гидравлически гладкие и гидравлически шероховатые является условным, поскольку одна и та же стенка (трубы, канала и так далее) в зависимости от скорости протекания жидкости может быть либо гидравлически гладкой, либо гидравлически шероховатой.

В результате экспериментальных работ Никурадзе и Зегжды по изучению гидравлических сопротивлений в трубах и лотках с искусственной шероховатостью было установлено существование пяти зон сопротивлений, каждая из которых характеризуется своими закономерностями.

Первая зона – зона вязкого сопротивления (первая автомодельная зона). Она охватывает случаи ламинарного режима движения жидкости. Верхней границей этой зоны является значение $Re \approx 2000$. В этой зоне $h_{дл.} = kv$ (здесь и далее k – коэффициент пропорциональности). Коэффициент сопротивления трения по длине не зависит от шероховатости стенок, а зависит только от числа Рейнольдса и для труб круглого сечения определяется по закону Пуазейля

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (5.6)$$

Вторая зона – переходная между ламинарным и турбулентным течениями жидкости (примерно в пределах значений Re от 2000 до 4000). Движение жидкости носит в основном ламинарный характер, но возможно возникновение отдельных завихрений в осевой области потока. Коэффициент сопротивления при этом быстро возрастает с увеличением числа Рейнольдса, но вместе с тем он по-прежнему не зависит от шероховатости стенок. Для вычисления коэффициента Дарси в этой зоне можно использовать формулу Френкеля

$$\lambda = \frac{2,7}{Re^{0,53}}. \quad (5.7)$$

Особого практического значения вторая зона не имеет.

Все последующие зоны охватывают случаи турбулентного движения жидкости, но с различной степенью турбулентности потока.

Третья зона – зона гладкостенного сопротивления. Здесь в осевой части потока уже сформировалось турбулентное ядро, но ламинарная пленка все еще полностью покрывает выступы шероховатости ($\delta_{нл.} > \Delta$). В этой зоне $h_{дл.} = kv^{1,75}$.

Коэффициент λ , как и в двух предыдущих зонах, является функцией только числа Рейнольдса и может определяться по различным формулам. При $Re < 10^5$ для труб круглого сечения рекомендуется использовать формулу Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}. \quad (5.8)$$

При $Re > 10^5$ более точной является формула Конакова

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,52)^2}. \quad (5.9)$$

Значения λ , практически совпадающие с (5.9), дает формула Филоненко

$$\lambda = \left(\frac{0,55}{\lg \left(\frac{Re}{8} \right)} \right)^2. \quad (5.10)$$

При $2,3 \cdot 10^3 < Re < 8 \cdot 10^5$ можно также применять формулу ВТИ (Всесоюзного теплотехнического института)

$$\lambda = \frac{1,01}{(\lg Re)^{2,5}}. \quad (5.11)$$

Верхней границей третьей зоны является значение $Re = 27 \cdot (d/\Delta)^{8/7}$.

Четвертая зона – зона до квадратичного сопротивления. Здесь, в отличие от предыдущих зон, выступы шероховатости начинают обнажаться и выходить за пределы ламинарной пленки. В этой зоне $h_{дл.} = kv^{1,75 \div 2}$ коэффициент λ является функцией не только числа Рейнольдса, но также и относительной шероховатости (относительная шероховатость – d/Δ ; обратная ей величина Δ/d – относительная гладкость).

Коэффициент сопротивления трения по длине в этой зоне также может определяться по различным формулам. Так, например, для старых стальных и чугунных труб круглого сечения λ можно определять по формуле Шевелева (ВОДГЕО)

$$\lambda = \left(\frac{1,5 \cdot 10^{-6}}{d^{0,3}} + \frac{1}{Re} \right)^{0,3}. \quad (5.12)$$

Формула (5.12) применима при $(v/v) < 9,2 \cdot 10^5$.

В интервале значений $2300 < Re < 218 \cdot (d/\Delta)$ можно воспользоваться формулой Альтшуля

$$\lambda = 0,1 \cdot \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{100}{Re} \right)^{0,25}. \quad (5.13)$$

Пятая зона – зона квадратичного сопротивления (вторая автомодельная зона). Здесь ламинарная пленка практически полностью разрушается, выступы шероховатости обнажаются и омываются турбулентным ядром. В этой зоне

$h_{\text{дл.}} = kv^2$. Коэффициент λ уже практически не зависит от числа Рейнольдса, а является функцией только шероховатости стенок, то есть $\lambda = f(\Delta/d)$.

Нижней границей пятой зоны, согласно исследованиям Альтшуля и Лятхера, является значение $Re = 560/(\Delta/d)$.

Эта зона имеет наибольшее практическое значение.

Для шероховатых труб в зоне квадратичного сопротивления формула для определения коэффициента сопротивления трения по длине имеет вид

$$\lambda = \frac{1}{\left(a \lg \frac{AR}{\Delta}\right)^2}. \quad (5.14)$$

Числовые значения постоянных a и A в этой формуле должны определяться экспериментальным путем. Согласно опытам Никурадзе, для искусственной равнозернистой шероховатости $a = 2$ и $A = 14,8$.

В связи с отсутствием разработанных шкал числовых значений A и Δ , входящих в формулу (5.14), для всех категорий шероховатости русел особое значение при расчете труб и каналов в зоне квадратичного сопротивления приобретают формулы академика Павловского и профессора Агроскина для нахождения скоростного множителя C (коэффициента Шези), связанного с коэффициентом Дарси зависимостью

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}. \quad (5.15)$$

Так, формула Павловского имеет следующий вид:

$$C = \frac{1}{n} R^y, \quad (5.16)$$

где n – коэффициент шероховатости, зависящий от материала труб и от их состояния; R – гидравлический радиус; y – показатель степени, зависящий от n и R . Для нахождения y Павловским предложена формула

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,10), \quad (5.17)$$

или для приближенных расчетов

$$y = 1,5\sqrt{n} \text{ при } R < 1 \text{ м;}$$

$$y = 1,3\sqrt{n} \text{ при } R > 1 \text{ м.}$$

Формула Агроскина, исключая необходимость определения значения y , имеет вид:

$$C = \frac{1}{n} + 4 \cdot \sqrt{2g} \cdot \lg R, \quad (5.18)$$

где n и R те же, что и в формуле (5.16).

Описание экспериментальной установки

Лабораторная работа выполняется с использованием подсистемы «Гидравлика» лабораторного стенда НТЦ-11.38 «Гидравлика, гидромашины и гидроприводы».

Используемая при выполнении работы часть экспериментальной установки (рис. 5.1) состоит из электродвигателя М1 1, приводящего во вращение насос Н1 2, который подает рабочую жидкость в трубопровод а–b–с 3 внутренним диаметром $d = 8 \text{ мм} = 0,008 \text{ м}$. Длина участка а–b $L = 450 \text{ мм}$.

Расход жидкости может регулироваться при помощи регулятора расхода РР1 4. Для измерения давления жидкости в точках а и b трубопровода установлены соответственно манометры МН1 5 и МН2 6.

Измерение расхода жидкости в трубопроводе осуществляется расходомером РА1 7.

Методика проведения опыта и обработки опытных данных

При проведении лабораторной работы рукоятка распределителя Р1 должна находиться в положении I (верхнее).

Для выполнения работы необходимо сначала подключить стенд к электросети и включить питание стенда, переведя рубильник «Сеть» в верхнее положение. Затем нажатием кнопки «Пуск» на панели М1 включается электродвигатель М1. После этого следует включить распределитель Р2, переведя тумблер Р2 в положение «вкл.». Распределитель Р3 должен быть выключен (тумблер Р3 должен находиться в положении «выкл.»).

Перед началом проведения измерений необходимо дать возможность стенду поработать в течение 5–6 минут.

Затем включается электронный секундомер, переведя тумблер в положение «вкл.». Тумблер переключения режимов работы секундомера должен находиться в положении «ручн.».

Величина расхода жидкости в трубопроводе изменяется при помощи регулятора расхода РР1 (поворот маховика регулятора по часовой стрелке приводит к увеличению расхода).

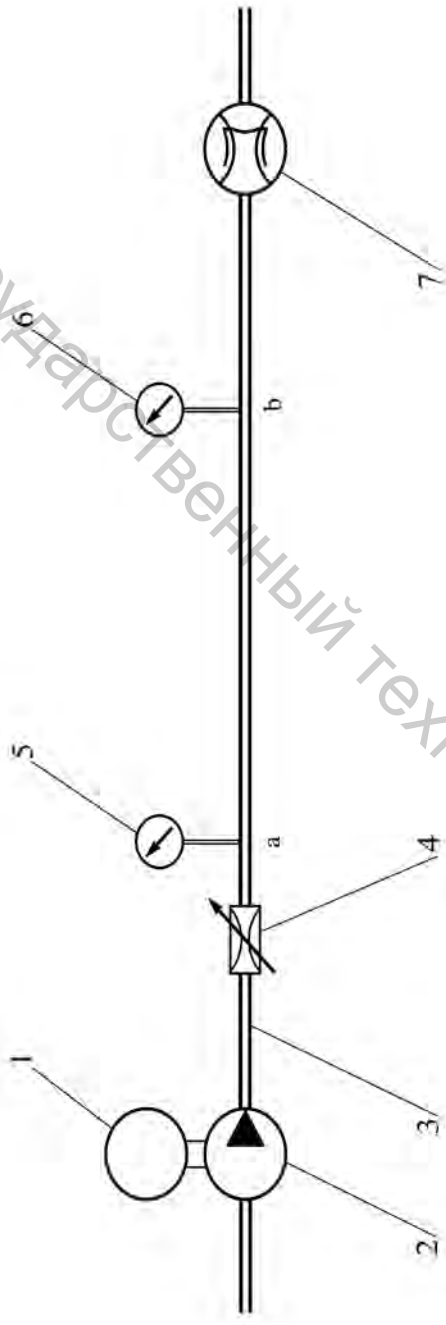


Рисунок 5.1 – Схема экспериментальной установки:

- 1 – электродвигатель М1;
- 2 – насос Н1;
- 3 – трубопровод;
- 4 – регулятор расхода РР1;
- 5 – манометр МН1;
- 6 – манометр МН2;
- 7 – расходомер РА1

Установив некоторое значение расхода, осуществляют замеры времени T прохождения заданного объема рабочей жидкости V через трубопровод а–b–с. Время измеряется с помощью электронного секундомера, а объем проходимой жидкости определяется с помощью расходомера РА1 (один оборот крайней левой стрелки на расходомере соответствует прохождению через устройство $0,001 \text{ м}^3$ жидкости). Измерения проводят при нескольких (3–5) значениях расхода. После каждого измерения показания секундомера обнуляются нажатием кнопки «Сброс».

Также определяется величина давления жидкости в точках а и b трубопровода по показаниям манометров МН1 и МН2.

В каждом опыте следует фиксировать температуру рабочей жидкости.

После выполнения всех опытов отключить питание электронного секундомера, электродвигателя и стенда.

По измеренным значениям объема жидкости V и времени истечения T рассчитывается расход масла в трубопроводе Q :

$$Q = \frac{V}{T}. \quad (5.19)$$

Площадь поперечного сечения трубопровода определяется по формуле

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (5.20)$$

где d – внутренний диаметр трубы установки, м.

Затем рассчитывается средняя скорость движения воды в трубопроводе

$$v = \frac{Q}{\omega} \quad (5.21)$$

и соответствующее этой скорости значение числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}. \quad (5.22)$$

По разности показаний манометров МН1 и МН2 находится величина потери напора по длине трубопровода

$$h_{\text{дл.}} = \frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma}. \quad (5.23)$$

Удельный вес жидкости γ определяется по формуле

$$\gamma = \rho \cdot g, \quad (5.24)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3 , $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

В соответствии с формулой Дарси-Вейсбаха подсчитывается опытное значение коэффициента сопротивления трения по длине

$$\lambda_{on} = h_{dl} \cdot \frac{d}{L} \cdot \frac{2 \cdot g}{v^2}. \quad (5.25)$$

Все результаты измерений и вычисленные значения заносятся в таблицу, составленную по форме таблицы 5.1.

В зависимости от полученных значений числа Рейнольдса по некоторым из эмпирических формул, приведенных в начале работы, подсчитываются теоретические величины коэффициента Дарси λ_i .

При использовании формулы Альтшуля следует принимать абсолютную шероховатость $\Delta = 0,0000015 \text{ м}$. При расчете коэффициента Шези по формулам Павловского и Агроскина принимать коэффициент шероховатости $n = 0,011$. Величина коэффициента Дарси в этом случае находится из соотношения (5.15)

$$\lambda = \frac{8 \cdot g}{C^2}. \quad (5.26)$$

Сравнивая вычисленные по эмпирическим формулам коэффициенты λ_i с найденными опытным путем значениями λ_{on} , можно определить относительную погрешность вычислений

$$\varepsilon_i = \frac{|\lambda_{on} - \lambda_i|}{\lambda_{on}} \cdot 100\%. \quad (5.27)$$

Полученные результаты заносятся в таблицу, составленную по форме таблицы 5.2.

Содержание отчета

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему экспериментальной установки.
3. Исходные данные для расчетов и расчетные формулы.
4. Таблицы результатов измерений и расчетов.

Контрольные вопросы

1. На что затрачивается энергия при движении реальных жидкостей?
2. Что называется абсолютной шероховатостью?
3. Какие поверхности считаются гидравлически гладкими и гидравлически шероховатыми?
4. Перечислить и охарактеризовать существующие зоны сопротивления.

Таблица 5.1 – Опытные значения

№ опыта			1	2	3
Температура жидкости	t	$^{\circ}\text{C}$			
Кинематический коэффициент вязкости жидкости	ν	$\text{м}^2/\text{с}$			
Объём жидкости	V	м^3			
Время истечения	T	с			
Расход жидкости	Q	$\text{м}^3/\text{с}$			
Средняя скорость	v	$\text{м}/\text{с}$			
Число Рейнольдса	Re	–			
Давление жидкости	p_1	Па			
	p_2	Па			
Пьезометрические напоры	p_1/γ	м			
	p_2/γ	м			
Потеря напора	$h_{\text{дл.}}$	м			
Коэффициент сопротивления трения по длине	$\lambda_{\text{оп.}}$	–			

Таблица 5.2 – Значения, рассчитанные по формулам

№ опыта		1	2	3
Пуазейля	λ_1			
	$\varepsilon_1, \%$			
Френкеля	λ_2			
	$\varepsilon_2, \%$			
Блазиуса	λ_3			
	$\varepsilon_3, \%$			
Конакова	λ_4			
	$\varepsilon_4, \%$			
Филоненко	λ_5			
	$\varepsilon_5, \%$			
ВТИ	λ_6			
	$\varepsilon_6, \%$			
Шевелева	λ_7			
	$\varepsilon_7, \%$			
Альтшуля	λ_8			
	$\varepsilon_8, \%$			
Павловского	C_9			
	λ_9			
	$\varepsilon_9, \%$			
Агроскина	C_{10}			
	λ_{10}			
	$\varepsilon_{10}, \%$			

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Цель работы: изучение видов местных гидравлических сопротивлений и причин потерь энергии в них, опытное определение коэффициента местного гидравлического сопротивления гидродросселя.

Теоретическое введение

Местные сопротивления представляют собой изменения конфигурации трубопровода, к которым относятся различного рода фасонные части и арматура: сужения и расширения, тройники, колена, краны, вентили, задвижки и так далее, необходимость установки которых связана с условиями сооружения и эксплуатации трубопровода.

При движении жидкости по трубопроводу с местными сопротивлениями происходит перераспределение скоростей, а также изменение вектора скорости потока либо по величине (сужения и расширения), либо по направлению (колена), либо одновременно по величине и по направлению (тройники). В некоторых случаях (диафрагмы, задвижки) наблюдается только перераспределение скоростей. Особенностью всех местных сопротивлений является наличие вихревых зон.

На преодоление местных сопротивлений затрачивается некоторая часть механической энергии (напора) потока, которая называется местной потерей энергии (напора). При расчетах ее принято выражать в долях удельной кинетической энергии (скоростного напора).

В тех случаях, когда скорость потока перед местным сопротивлением и после него различна, потеря напора может быть выражена через скоростной напор или перед местным сопротивлением, или после него (например, при внезапном сужении или расширении). Тогда формула для подсчета местных потерь напора будет иметь общий вид:

$$h_{\text{мест.}} = \zeta'_{\text{мест.}} \cdot \frac{v_1^2}{2g} = \zeta_{\text{мест.}} \cdot \frac{v_2^2}{2g}, \quad (6.1)$$

где $\zeta'_{\text{мест.}}$ и $\zeta_{\text{мест.}}$ – безразмерные коэффициенты местного сопротивления; v_1 – средняя скорость движения жидкости в сечении потока перед местным сопротивлением; v_2 – средняя скорость движения жидкости в сечении потока за местным сопротивлением.

На практике, как правило, для расчетов принимается скорость потока за местным сопротивлением.

Величина $\zeta_{\text{мест.}}$ зависит от вида местного сопротивления, от числа

Рейнольдса и в некоторой мере от шероховатости стенок, а для различного рода запорных устройств – также и от степени их открытия. Ввиду большой сложности явлений, происходящих в жидкости, протекающей через местное сопротивление, только в отдельных случаях коэффициент местного сопротивления может быть найден теоретически. В преобладающем большинстве случаев $\zeta_{мест.}$ определяется опытным путем, применительно к тому или иному скоростному напору.

Исследования, проведенные Френкелем, Альтшулем, Каревым и другими учеными, показали, что наибольшая зависимость коэффициента местного сопротивления от числа Рейнольдса наблюдается при ламинарном режиме движения жидкости. Например, при весьма малых значениях Re (менее 10) коэффициент $\zeta_{мест.}$ обратно пропорционален числу Рейнольдса

$$\zeta_{мест.} = \frac{A}{Re}. \quad (6.2)$$

При больших значениях Re в области ламинарного движения жидкости коэффициент местного сопротивления обратно пропорционален числу Рейнольдса в некоторой степени

$$\zeta_{мест.} = \frac{B}{Re^n}. \quad (6.3)$$

Здесь A и B – коэффициенты, зависящие от вида местного сопротивления и определяемые опытным путем.

Показатель степени n , по Товстолесу, может быть принят равным 0,285.

Однако следует иметь в виду, что вопрос о местных сопротивлениях при ламинарном режиме исследован недостаточно. Вследствие этого приведенные выше формулы требуют проверки и дальнейшего уточнения.

В турбулентном потоке жидкости влияние числа Рейнольдса на коэффициент местного сопротивления крайне незначительно. При практических расчетах в области турбулентного режима $\zeta_{мест.}$ считают зависящим только от вида и конструктивного исполнения местного сопротивления.

Одним из видов специальных местных сопротивлений являются гидравлические дроссели. Дроссель предназначен для снижения давления (энергии) в потоке проходящей через него рабочей жидкости.

Основной характеристикой дросселя является зависимость расхода от перепада давлений в подводимом и отводимом потоках: $Q = f(\Delta p)$. По характеру приведенной функции дроссели делятся на линейные и нелинейные.

В линейных дросселях, или дросселях вязкостного сопротивления, потери давления определяются в основном трением жидкости в канале. В дросселях такого типа устанавливается ламинарный режим течения рабочей жидкости и

перепад давления практически прямо пропорционален скорости течения.

В нелинейных дросселях потери давления связаны с отрывом потока и вихреобразованием. Частным случаем нелинейного дросселя является квадратичный дроссель, потери давления в котором прямо пропорциональны квадрату скорости (расхода). Потери на трение в квадратичных дросселях практически отсутствуют, благодаря чему расход через дроссель не зависит от вязкости жидкости, и, следовательно, характеристика дросселя остается стабильной в широком диапазоне эксплуатационных температур. Это преимущество квадратичных дросселей определило их широкое использование в гидравлических системах.

Расход рабочей жидкости через такой дроссель определяется формулой

$$Q = \mu \omega_0 \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta p}{\gamma}}, \quad (6.4)$$

где ω_0 – площадь проходного сечения дросселя; μ – коэффициент расхода, величина которого постоянна для каждого типа дросселя.

Коэффициент расхода μ и коэффициент местного сопротивления $\zeta_{мест.}$ связаны между собой соотношением

$$\mu = \varepsilon \sqrt{\frac{1}{\alpha + \zeta_{мест.}}}, \quad (6.5)$$

где ε – коэффициент сжатия (для цилиндрического трубопровода $\varepsilon = 1$); α – коэффициент Кориолиса.

Описание экспериментальной установки

Лабораторная работа выполняется с использованием подсистемы «Гидравлика» лабораторного стенда НТЦ-11.38 «Гидравлика, гидромашины и гидроприводы».

Используемая при выполнении работы часть экспериментальной установки (рис. 6.1) состоит из электродвигателя М1 1, приводящего во вращение насос Н1 2, который подает рабочую жидкость в трубопровод а–b–с 3 внутренним диаметром $d = 8 \text{ мм} = 0,008 \text{ м}$. Между точками b и с трубопровода находится дроссель ДР1 5 с отверстием диаметром $d_0 = 3 \text{ мм} = 0,003 \text{ м}$.

Расход жидкости может регулироваться при помощи регулятора расхода РР1 4. Для измерения давления жидкости в точках b и с трубопровода установлены соответственно манометры МН2 6, МН3 7.

Измерение расхода жидкости в трубопроводе осуществляется расходомером РА1 8.

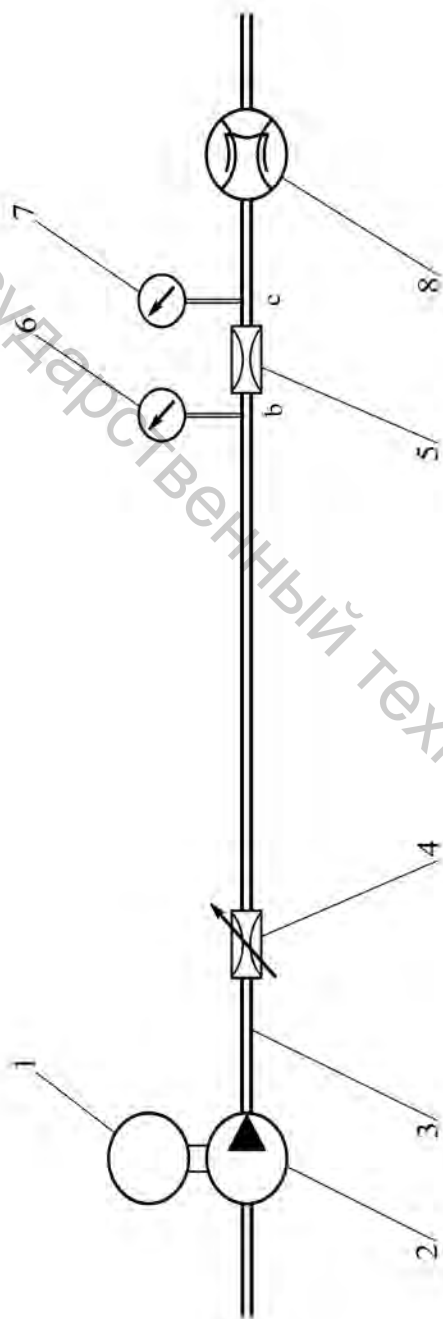


Рисунок 6.1 – Схема экспериментальной установки:

- | | |
|----------------------------|--------------------|
| 1 – электродвигатель М1; | 5 – дроссель ДР1; |
| 2 – насос Н1; | 6 – манометр МН2; |
| 3 – трубопровод; | 7 – манометр МН3; |
| 4 – регулятор расхода РР1; | 8 – расходомер РА1 |

Методика проведения опыта и обработки опытных данных

При проведении лабораторной работы рукоятка распределителя P1 должна находиться в положении I (верхнее).

Для выполнения работы необходимо сначала подключить стенд к электросети и включить питание стенда, переведя рубильник «Сеть» в верхнее положение. Затем нажатием кнопки «Пуск» на панели M1 включается электродвигатель M1. После этого следует включить распределитель P2, переведя тумблер P2 в положение «вкл.». Распределитель P3 должен быть выключен (тумблер P3 должен находиться в положении «выкл.»).

Перед началом проведения измерений необходимо дать возможность стенду поработать в течение 5–6 минут.

Затем включается электронный секундомер, переведя тумблер в положение «вкл.». Тумблер переключения режимов работы секундомера должен находиться в положении «ручн.».

Величина расхода жидкости в трубопроводе изменяется при помощи регулятора расхода PP1 (поворот маховика регулятора по часовой стрелке приводит к увеличению расхода). Установив некоторое значение расхода, осуществляют замеры времени T прохождения заданного объема рабочей жидкости V через трубопровод а–b–с. Время измеряется с помощью электронного секундомера, а объем проходимой жидкости определяется с помощью расходомера PA1 (один оборот крайней левой стрелки на расходомере соответствует прохождению через устройство $0,001 \text{ м}^3$ жидкости). Измерения проводят при нескольких (3–5) значениях расхода. После каждого измерения показания секундомера обнуляются нажатием кнопки «Сброс».

Также определяется величина давления жидкости перед дросселем ДР1 и после него – в точках b и c трубопровода по показаниям манометров МН2 и МН3.

В каждом опыте следует фиксировать температуру рабочей жидкости.

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

Подставляя в формулу

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4} \quad (6.6)$$

значения d и d_0 , определяют площади поперечного сечения трубопровода и отверстия дросселя.

Далее рассчитывается расход жидкости в трубопроводе

$$Q = \frac{V}{T}, \quad (6.7)$$

а затем вычисляются средние скорости движения масла в обоих сечениях

$$v = \frac{Q}{\omega}. \quad (6.8)$$

Поскольку в данном случае ось трубопровода находится в плоскости сравнения ($z = 0$), то значения удельной потенциальной энергии в сечениях определяются непосредственно по показаниям манометров

$$E_n = \frac{P}{\gamma}. \quad (6.9)$$

Удельный вес жидкости γ определяется по формуле

$$\gamma = \rho \cdot g, \quad (6.10)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3 , $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Удельная кинетическая энергия потока в сечениях рассчитывается по формуле

$$E_k = \frac{v^2}{2g}. \quad (6.11)$$

Полная удельная энергия потока

$$E = E_n + E_k. \quad (6.12)$$

По разности полных удельных энергий в сечениях находят потери напора в местном сопротивлении

$$h_{\text{мест.}} = E_1 - E_2. \quad (6.13)$$

В соответствии с формулой (6.1) подсчитываются опытные значения коэффициента местного сопротивления

$$\zeta_{\text{мест.}} = h_{\text{мест.}} \cdot \frac{2g}{v_2^2}. \quad (6.14)$$

Найденные значения $\zeta_{\text{мест.}}$ сопоставляются со справочными данными.

Из формулы (6.4) находятся значения коэффициента расхода гидравлического дросселя

$$\mu = \frac{Q}{\omega_0} \sqrt{\frac{\gamma}{2g \cdot \Delta p}}, \quad (6.15)$$

где Δp – разность давлений в трубопроводе перед дросселем и после него.

Все результаты измерений и расчетов заносятся в таблицу, составленную по форме таблицы 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты измерений и расчетов

№ опыта			1	2	3
Объём жидкости	V	$м^3$			
Время истечения	T	$с$			
Расход жидкости	Q	$м^3/с$			
Средняя скорость потока	v_1	$м/с$			
	v_2	$м/с$			
Давление жидкости	p_1	$Па$			
	p_2	$Па$			
Удельная кинетическая энергия	$E_{к1}$	$м$			
	$E_{к2}$	$м$			
Удельная потенциальная энергия	E_{n1}	$м$			
	E_{n2}	$м$			
Полная удельная энергия	E_1	$м$			
	E_2	$м$			
Потеря напора	$h_{мест.}$	$м$			
Коэффициент местного сопротивления	$\zeta_{мест.}$	-			
Коэффициент расхода	μ	-			

Содержание отчета

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему экспериментальной установки.
3. Исходные данные для расчетов и расчетные формулы.
4. Таблицу результатов измерений и расчетов.

Контрольные вопросы

1. Что называется местным сопротивлением?
2. Что происходит при движении жидкости по трубопроводу с местными сопротивлениями?
3. Как связаны местные потери напора и коэффициент местного сопротивления?
4. Как зависит коэффициент местного сопротивления от режима движения жидкости?

ПОСТРОЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА

Цель работы: построение на основании экспериментальных данных рабочих характеристик шестеренного насоса при постоянном числе оборотов приводного вала.

Теоретическое введение

Гидравлическими машинами называются механизмы, в которых осуществляется преобразование механической энергии в энергию движущейся жидкости или наоборот. По принципу действия гидравлические машины делятся на два класса: динамические и объемные. В динамических гидромашинах преобразование энергии происходит при изменении количества движения жидкости. В объемных гидромашинах энергия преобразуется в результате периодического изменения объема рабочих камер, герметично отделенных друг от друга.

Насос – это гидравлическая машина, которая предназначена для создания потока рабочей жидкости путем преобразования механической энергии привода в энергию движущейся жидкости. В роторных насосах подвижные элементы, образующие рабочие камеры, совершают вращательное или возвратно-поступательное движения. Роторные гидромашины имеют три основных рабочих элемента: ротор, статор и замыкатель (вытеснитель). Ротор насоса вращается синхронно с валом приводящего его во вращение двигателя. Замыкатели совершают строго циклическое движение, период которого пропорционален частоте вращения ротора. Рабочий цикл в насосах состоит из процессов всасывания и вытеснения (нагнетания). Разделение рабочих процессов осуществляется посредством распределения рабочей жидкости.

Одним из видов объемных насосов являются шестеренные насосы. Шестеренный насос представляет собой роторный насос с рабочим органом в виде двух шестерен. Существуют шестеренные насосы с внешним и внутренним зацеплением. Насосы с внутренним зацеплением более компактны, но из-за сложности изготовления применяются редко.

На рисунке 7.1 показана конструктивная схема наиболее распространенного шестеренного насоса с внешним зацеплением. Ведущая 1 и ведомая 2 шестерни размещены в расточках корпуса 3, который имеет полости всасывания 4 и нагнетания 5. Рабочая камера образуется ротором – ведущей шестерней с валом, статором – корпусом с боковыми крышками и замыкателем – ведомой шестерней с осью.

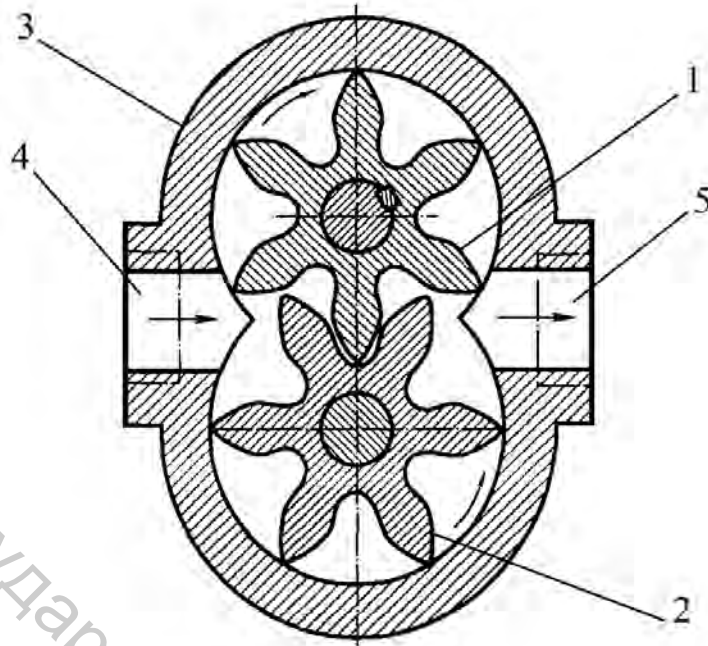


Рисунок 7.1 – Шестеренный насос:

- 1 – ведущая шестерня;
- 2 – ведомая шестерня;
- 3 – корпус;
- 4 – полость всасывания;
- 5 – полость нагнетания

Принцип работы насоса заключается в следующем. При вращении приводного вала вращается ведущая шестерня и находящаяся с ней в зацеплении ведомая шестерня. При этом в области всасывания, где зубья шестерен выходят из зацепления, создается разрежение и в пространство между зубьями шестерни засасывается жидкость. Этот объем жидкости в результате вращения шестерни вдоль поверхности статора переносится в область нагнетания, где зубья шестерен входят в зацепление. В области нагнетания жидкость вытесняется из пространства между зубьями шестерен, и при этом создается необходимый напор жидкости в нагнетательном патрубке насоса.

Рабочими характеристиками насоса называются графические изображения зависимостей развиваемого напора H , потребляемой мощности N и полного коэффициента полезного действия насоса η от его производительности Q при постоянном числе оборотов n .

Пример общего вида рабочих характеристик шестеренного насоса приведен на рисунке 7.2.

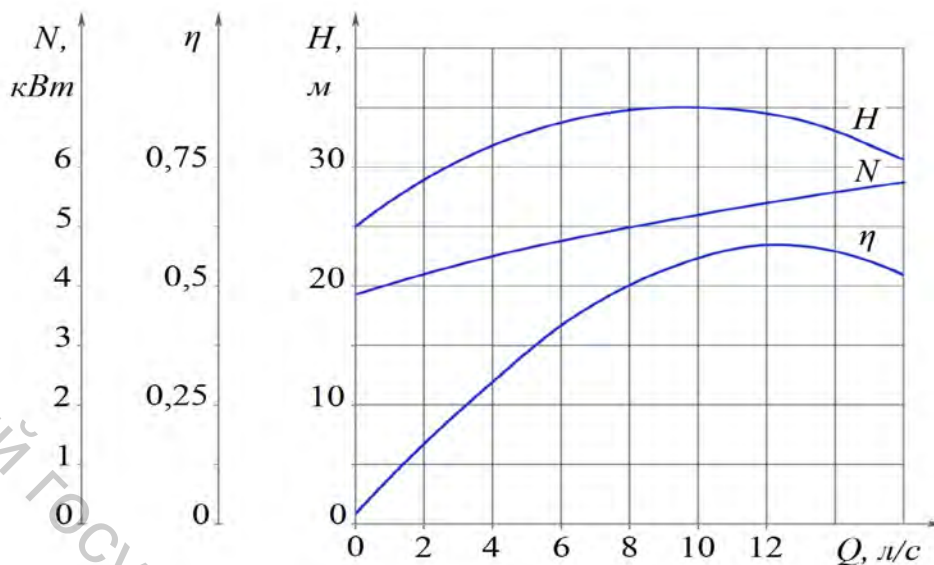


Рисунок 7.2 – Рабочие характеристики насоса

Производительностью (подачей) насоса Q называется количество жидкости (объемное или массовое), подаваемое им в единицу времени. Производительность обычно измеряется в $м^3/с$ (реже – в $л/с$).

Под напором H следует понимать удельную энергию E , приобретенную единицей веса жидкости, прошедшей через насос, и израсходованную на преодоление статической (геометрической) высоты подъема жидкости $H_{ст}$ и сопротивлений движению жидкости (по длине и местным) во всасывающем и нагнетательном трубопроводах.

Напор измеряется высотой столба перекачиваемой жидкости. Величина его определяется выражением

$$H = E_{нз} - E_{вс} = h_{ман.} - h_{вак.} + z_0 + \frac{v_{нз}^2 - v_{вс}^2}{2g}, \quad (7.1)$$

где $E_{нз}$ и $E_{вс}$ – удельная энергия соответственно в начале нагнетательной линии, где подключен манометр и в конце всасывающей линии, где подключен вакуумметр; $h_{вак.}$ – показания вакуумметра, присоединенного к всасывающему патрубку насоса, выраженное высотой столба перекачиваемой жидкости, $м$; $h_{ман.}$ – показания манометра, присоединенного к нагнетательному патрубку насоса, также выраженное высотой столба перекачиваемой жидкости, $м$; z_0 – вертикальное расстояние между точками подключения манометра и вакуумметра, $м$; $v_{нз}$ и $v_{вс}$ – средняя скорость потока жидкости в начале нагнетательной и в конце всасывающей линий.

Если диаметры всасывающего и нагнетательного патрубков одинаковы ($d_{вс} = d_{нз}$) или скоростные напоры во всасывающем и нагнетательном

трубопроводах малы по сравнению с напором H , развиваемым насосом, то последним слагаемым в уравнении (7.1) можно пренебречь. Также можно пренебречь и величиной z_0 , если это расстояние незначительно, а давление в нагнетательном трубопроводе велико. Тогда уравнение (7.1) примет вид

$$H = h_{ман.} - h_{вак.}, \quad (7.2)$$

то есть величина напора может быть определена только по показаниям манометра и вакуумметра.

Полезной мощностью N_n называется приращение энергии, получаемое в насосе всем потоком жидкости за единицу времени (1 с)

$$N_n = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{1000} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000} \text{ (кВт)}, \quad (7.3)$$

где Q – производительность насоса, $м^3/с$; H – напор, создаваемый насосом, $м$; γ – удельный вес жидкости, $Н/м^3$; ρ – плотность жидкости, $кг/м^3$; g – ускорение свободного падения ($g = 9,81 м/с^2$).

Потребляемой мощностью насоса N является мощность на его валу, то есть та мощность, которая сообщается насосу его приводом. Часть этой мощности затрачивается на создание полезной (гидравлической) мощности N_n , а другая – на преодоление механического трения в подшипниках и сальниках, а также трения между шестернями и корпусом насоса.

Мощность на валу (потребляемая насосом мощность) в случае привода от электродвигателя может быть определена по формуле

$$N = N_{эл.} \cdot \eta_{дв.} \cdot \eta_{пер.}, \quad (7.4)$$

где $N_{эл.}$ – электрическая мощность, потребляемая электродвигателем из сети и измеряемая при помощи ваттметра; $\eta_{дв.}$ – коэффициент полезного действия электродвигателя, как правило, $\eta_{дв.} = 0,96 \div 0,98$; $\eta_{пер.}$ – коэффициент полезного действия передачи, при непосредственном соединении насоса с электродвигателем $\eta_{пер.} = 1$.

Полный коэффициент полезного действия насоса η представляет собой отношение полезной мощности N_n к потребляемой мощности N , то есть

$$\eta = \frac{N_n}{N}. \quad (7.5)$$

Рабочие характеристики насоса, полученные для определенного числа оборотов n , могут быть пересчитаны на любое другое число оборотов n_1 по формулам подобия:

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{n}{n_1};$$

$$\frac{H}{H_1} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^2; \quad (7.6)$$

$$\frac{N}{N_1} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^3.$$

Приведенные зависимости с достаточной степенью точности совпадают с опытными данными только при нормальных режимах работы насоса (в области оптимальных значений его КПД).

Описание экспериментальной установки

Лабораторная работа выполняется с использованием подсистемы «Гидромашины и гидроприводы» лабораторного стенда НТЦ-11.38 «Гидравлика, гидромашины и гидроприводы».

Используемая при выполнении работы часть экспериментальной установки (рис. 7.3) состоит из электродвигателя М1 6, приводящего во вращение насос Н1 8, который через всасывающий трубопровод 2 забирает рабочую жидкость из масляного бака Б1 1. На всасывающем трубопроводе установлены вентиль В1 3 и мановакуумметр МВ 4. Мощность, потребляемая электродвигателем, измеряется ваттметром РВ 5, частота вращения вала насоса – тахометром ТХ1 7.

Расход жидкости может регулироваться при помощи регулируемого дросселя ДР1 11. Измерения давления жидкости в напорной части трубопровода осуществляется манометром МН7 9, после которого установлен фильтр 10.

Измерение расхода жидкости в трубопроводе осуществляется расходомером РА1 12.

Методика проведения опыта и обработки опытных данных

При проведении лабораторной работы рукоятка распределителя Р1 должна находиться в положении II (нижнее). Вентиль В1 всасывающего трубопровода, установленный снизу на баке слева, должен быть полностью открыт. Перед включением установки маховик управления регулируемым дросселем ДР3 должен быть повернут до упора по часовой стрелке (максимальное проходное сечение дросселя).

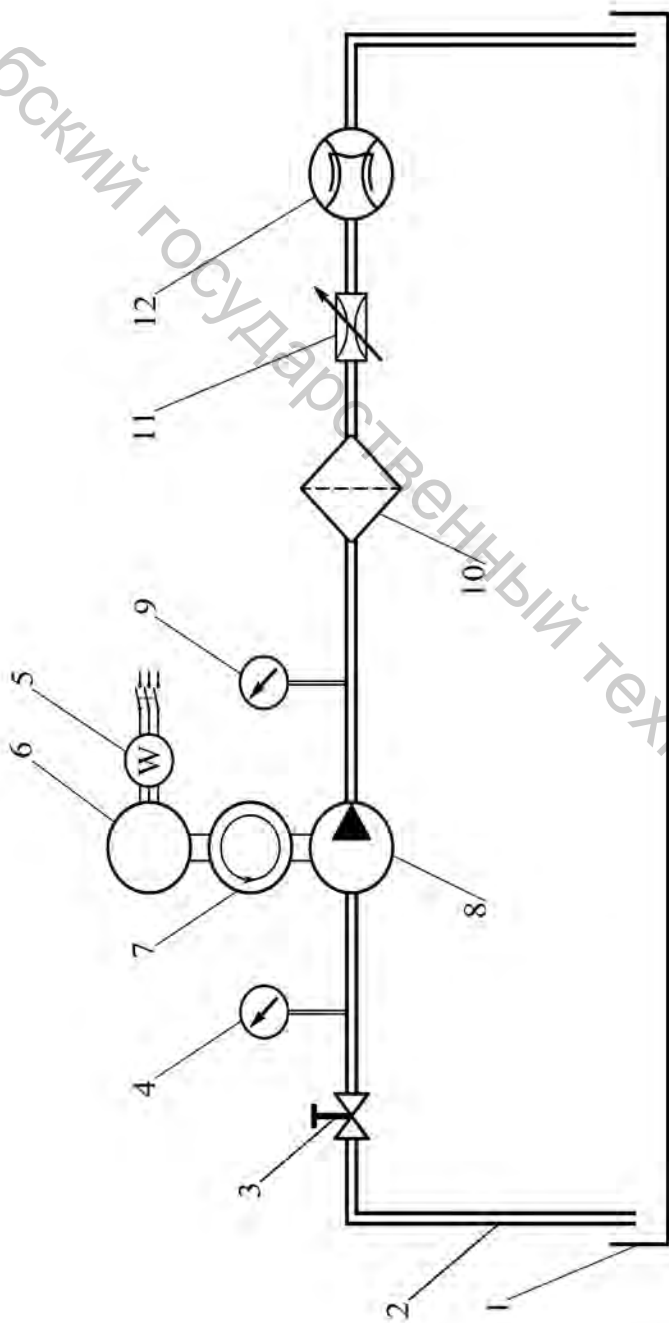


Рисунок 7.3 – Схема экспериментальной установки:

- | | |
|------------------------------|---------------------------------|
| 1 – масляный бак Б1; | 7 – тахометр ТХ1; |
| 2 – всасывающий трубопровод; | 8 – насос Н1; |
| 3 – вентиль В1; | 9 – манометр МН7; |
| 4 – мановакуумметр МВ; | 10 – фильтр; |
| 5 – ваттметр РВ; | 11 – регулируемый дроссель ДР3; |
| 6 – электродвигатель М1; | 12 – расходомер РА2 |

Для выполнения работы необходимо сначала подключить стенд к электросети и включить питание стенда, переведя рубильник «Сеть» в верхнее положение. Затем нажатием кнопки «Пуск» на панели М1 включается электродвигатель М1. После этого следует включить распределители Р4 и Р6, переведя тумблер Р4 в положение «вкл.1», а тумблер Р6 в положение «вкл.». Распределитель Р5 должен быть выключен (тумблер Р5 должен находиться в положении «выкл.»).

Перед началом проведения измерений необходимо дать возможность стенду поработать в течение 5–6 минут.

Затем включается электронный секундомер, переведя тумблер SA5 в положение «вкл.». Тумблер переключения режимов работы секундомера должен находиться в положении «ручн.».

Величина расхода жидкости в трубопроводе изменяется при помощи регулируемого дросселя ДРЗ (поворот маховика дросселя по часовой стрелке приводит к увеличению расхода). Установив некоторое значение расхода, осуществляют замеры времени T прохождения заданного объема рабочей жидкости V через насос. Время измеряется с помощью электронного секундомера, а объем проходимой жидкости определяется с помощью расходомера РА2 (один оборот крайней левой стрелки на расходомере соответствует прохождению через устройство $0,001 \text{ м}^3$ жидкости). Измерения проводят при нескольких (7–10) значениях расхода. После каждого измерения показания секундомера обнуляются нажатием кнопки «Сброс».

Также определяется величина давления жидкости p_1 перед насосом Н1 и p_2 после него по показаниям мановакуумметра МВ и манометра МН7.

Частота вращения n вала насоса определяется по табло $n_{Н1}$ тахометра, для включения которого тумблер SA1 следует перевести в положение «вкл. изм. скорости». Для определения частоты вращения в $об/с$ необходимо показания частотомера $n_{Н1}$ делить на 2.

Мощность $N_{эл.}$, подводимая к электродвигателю М1, измеряется по ваттметру РW(М1). Одно деление шкалы ваттметра соответствует 200 Вт .

В каждом опыте следует фиксировать температуру рабочей жидкости.

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

Все результаты измерений заносятся в таблицу, составленную по форме таблицы 7.1.

По измеренным значениям объема жидкости V и времени истечения T рассчитывается расход жидкости (производительность насоса) Q :

$$Q = \frac{V}{T}. \quad (7.7)$$

Напор H , создаваемый насосом, определяется по показаниям манометра и мановакуумметра

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g}. \quad (7.8)$$

Полезная мощность насоса N_n рассчитывается согласно формуле (7.3), которая с учетом (7.8) принимает вид

$$N_n = (p_2 - p_1) \cdot Q \quad (7.9)$$

Потребляемая насосом мощность N определяется по формуле (7.4), а полный коэффициент полезного действия насоса η – по формуле (7.5).

Все результаты вычислений также заносятся в таблицу.

По полученным результатам, строго выдерживая масштаб, на миллиметровой бумаге строят рабочие характеристики шестеренного насоса, соответствующие измеренной частоте вращения вала n .

Таблица 7.1 – Результаты измерений и расчетов

№ опыта			1	2	3
Частота вращения вала насоса	n	об/с			
Объём жидкости	V	$м^3$			
Время истечения	T	с			
Производительность насоса	Q	$м^3/с$			
Давление жидкости	p_1	Па			
	p_2	Па			
Напор, развиваемый насосом	H	м			
Полезная мощность насоса	N_n	Вт			
Электрическая мощность привода	$N_{эл.}$	Вт			
Потребляемая насосом мощность	N	Вт			
Полный КПД насоса	η	–			

Содержание отчета

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему экспериментальной установки.
3. Исходные данные для расчетов и расчетные формулы.
4. Таблицу результатов измерений и расчетов.
5. Построенные характеристики насоса.

Контрольные вопросы

1. Что называется насосом?
2. Что называется рабочими характеристиками насоса?
3. Что называется производительностью насоса?
4. Что называется развиваемым насосом напором?
5. Что называется полезной мощностью насоса?
6. Что называется потребляемой мощностью насоса?
7. Что представляет собой полный КПД насоса?

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивановский, Ю. К. Основы теории гидропривода: учебное пособие / Ю. К. Ивановский, К. П. Моргунов. – Санкт-Петербург: Лань, 2018. – 200 с.
2. Пневматические системы и устройства технологического оборудования: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», «Автоматизация технологических процессов и производств» / А. Г. Схиртладзе [и др.]. – Старый Оскол: ТНТ, 2019. – 127 с.
3. Артемьева, Т. В. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод: учебное пособие для ВУЗов / Т. В. Артемьева [и др.]. – Москва: Академия, 2008. – 336 с.
4. Калекин, А. А. Гидравлика и гидравлические машины: учебное пособие для студентов / А. А. Калекин. – Москва: Мир, 2005. – 512 с.
5. Ольшанский, В. И. Расчет гидравлических и пневматических систем: учебное пособие / В. И. Ольшанский. – Витебск: УО «ВГТУ», 2001. – 77 с.
6. Герц, Е. В. Расчет пневмоприводов. Справочное пособие / Е. В. Герц, Г. В. Крейнин. – Москва: Машиностроение, 1975. – 272 с.
7. Медведев, В. Ф. Гидравлика и гидравлические машины: учебное пособие / В. Ф. Медведев. – Минск: Вышэйшая школа, 1998. – 311 с.
8. Вильнер, Я. М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я. М. Вильнер, Я. Т. Ковалев, Б. Б. Некрасов, под ред. Б. Б. Некрасова. – Минск: Вышэйшая школа, 1976. – 416 с.
9. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т. М. Башта [и др.]. – 2-е изд., перераб. – Москва: Машиностроение, 1982. – 423 с.

Учебное издание

Гидравлические и пневматические приводы оборудования

Методические указания к лабораторным работам

Составители:

Ольшанский Валерий Иосифович

Котов Алексей Анатольевич

Кузьменков Сергей Михайлович

Редактор *Т.А. Осипова*

Корректор *Т.А. Осипова*

Компьютерная верстка *А.А. Котов*

Подписано к печати 06.01.2022. Формат 60x90 $\frac{1}{16}$. Усл. печ. листов 4,1.
Уч.-изд. листов 5,2. Тираж 40 экз. Заказ № 16.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.