

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

Кафедра "Энергоустановки морских судов и сооружений"

С.Е. Тверская, К.Ю. Федоровский

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В СЭУ И КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Учебно-методическое пособие
по проведению лабораторного практикума
для студентов специальности 26.05.06 «Эксплуатация
судовых энергетических установок»



Севастополь
СевГУ
2026

УДК 629.5.03:621.317(076.5)

ББК 39.46-5*я73

Т266

Р е ц е н з е н т :

А.Ю. Гаршин - канд. техн. наук, доцент кафедры ЭМСС

Тверская С.Е.

Т266 Измерение параметров рабочих процессов в СЭУ и контрольно-измерительные приборы: учебно-методическое пособие по проведению лабораторного практикума для студентов специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» / С. Е. Тверская, К. Ю. Федоровский ; Севастопольский государственный университет", Морской институт, кафедра "Энергоустановки морских судов и сооружений". – 2-е изд., испр. и доп. – Севастополь: СевГУ, 2026. – 48 с. – Текст : электронный.

Целью учебно-методического пособия является закрепление студентами теоретических знаний по дисциплине «Измерение параметров рабочих процессов в СЭУ и контрольно-измерительные приборы», ознакомление с измерительной аппаратурой и получение практических навыков по проведению измерения параметров рабочих процессов в СЭУ.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения Севастопольского государственного университета, Морского института, специальности 26.05.06 – Эксплуатация судовых энергетических установок, специализации – Эксплуатация главной судовой двигательной установки.

УДК 629.5.03:621.317(076.5)

ББК 39.46-5* я73

Рассмотрено и рекомендовано к изданию на заседании кафедры «Энергоустановки морских судов и сооружений» Морского института Севастопольского государственного университета, протокол № 5 от 28 января 2026 г.

В авторской редакции

Изд. № 4/2026. Объем 3 п.л. Усл. печ. л. 2,79. Уч. изд. л. 2,94.

Издательский центр ФГАОУВО «Севастопольский государственный университет»

© Тверская С.Е., Федоровский К.Ю., 2026

© ФГАОУВО «Севастопольский
государственный университет», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. Лабораторная работа № 1. Термоэлектрические термометры.	
Поверка термопар	6
1.1.Цель работы.....	6
1.2.Теоретический раздел.....	6
1.2.1. Термо-э.д.с. термопары.....	6
1.2.2. Стандартные термопары.....	8
1.2.3. Компенсационные и соединительные провода.....	8
1.2.4. Измерение термл-э.д.с.....	9
1.2.5. Поверка термопар.....	10
1.3.Описание лабораторной установки.....	11
1.4.Порядок выполнения опытов.....	12
1.5 Обработка опытных данных.....	12
1.6.Контрольные вопросы.....	13
2. Лабораторная работа № 2. Поверка измерительного комплекта ДМ с ВМД	15
2.1.Цель работы.....	15
2.2.Теоретический раздел.....	15
2.3.Описание лабораторной установки.....	19
2.4.Порядок выполнения опытов.....	20
2.5 Обработка опытных данных.....	21
2.6.Контрольные вопросы.....	22
3. Лабораторная работа № 3. Приборы для измерения расхода.	
Тарировка расходомера переменного перепада давления.....	23
3.1.Цель работы.....	23
3.2.Теоретический раздел.....	23
3.2.1. Объемный метод измерения расхода.....	23
3.2.2. Тахометрические расходомеры и счетчики количества.....	24
3.2.3. Расходомеры переменного перепада давления.....	25
3.2.4. Расходомеры постоянного перепада давления. Ротаметры	28
3.2.5. Поверка расходомера.....	29
3.3.Описание лабораторной установки.....	29
3.4.Порядок выполнения опытов.....	30
3.5 Обработка опытных данных.....	31
3.6.Контрольные вопросы.....	32

4. Лабораторная работа № 4. Тестирование преобразователя	
давления.....	33
4.1.Цель работы.....	33
4.2.Теоретический раздел.....	33
4.3.Описание лабораторной установки.....	40
4.4.Порядок выполнения опытов.....	41
4.5 Обработка опытных данных.....	42
4.6.Контрольные вопросы.....	43
5. Содержание отчета о выполнении работы.....	44
ЛИТЕРАТУРА.....	45
ПРИЛОЖЕНИЕ А	
Градуировочные таблицы $E(t, 0)$ термоэлектрических	
термометров при температуре свободных концов $0\text{ }^{\circ}\text{C}$	46
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	
Допустимые отклонения ($\pm$) термо-э.д.с. $E^{\text{доп}}$ стандартных	
термопар.....	47
ПРИЛОЖЕНИЕ В	
Предельные температуры применения стандартных термопар.....	47
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	
Форма титульного листа отчета о выполнении лабораторной	
работы.....	48

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы по дисциплине «Измерение параметров рабочих процессов в СЭУ и контрольно-измерительные приборы» имеют цель привить студентам практические навыки, связанные с эксплуатацией контрольно-измерительных приборов (КИП) в элементах судовых энергетических установок (СЭУ) и их систем.

На выполнение одной работы отводится четыре академических часа. В течение этого времени студент знакомится с лабораторной установкой, получает допуск к проведению эксперимента, снимает показания приборов, производит обработку опытных данных, оформляет отчет и защищает полученные результаты.

При выполнении лабораторной работы следует строго придерживаться правил техники безопасности. Включение любой установки производится только с разрешения преподавателя.

Для получения допуска к проведению лабораторной работы необходимо:

- иметь подготовленный отчет к выполняемой работе, включающий ее название, цель, краткие теоретические сведения, схему лабораторной установки и измерительную таблицу;
- знать теоретические основы по теме выполняемой работы;
- знать порядок проведения опыта.

Во время защиты лабораторной работы преподаватель проверяет правильность полученных студентом результатов, его теоретические знания и умение применять их на практике.

Контрольные вопросы, приведенные в конце каждого раздела, должны являться основой при подготовке к защите лабораторных работ.

Оформление отчетов и подготовка к их защите студентами осуществляется в отведенное для самостоятельной работы время.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ. ПОВЕРКА ТЕРМОПАР

1.1. Цель работы

Цель работы – закрепление студентами теоретических знаний и получение практических навыков в изучении термоэлектрических термометров и проведении поверки термопар.

1.2. Теоретический раздел

Термоэлектрический термометр состоит из термопары, соединительных проводов и электроизмерительных приборов.

1.2.1. Термо-э.д.с. термопары

Термопара – это цепь из двух соединенных между собой разнородных проводников А и В, называемых термоэлектродами (рисунок 1.1). Места соединения термоэлектродов называются концами (спаями) [4].

Конец термопары, помещаемый в объект измерения температуры t , называется рабочим или «горячим» спаем, свободные или «холодные» концы термопары, имеющие постоянную температуру t_0 , соединены с измерительным прибором (милливольтметром, потенциометром и др.). Термопарой осуществляется преобразование тепловой энергии в электрическую.

Действие термопары основано на эффекте Зеебека. На горячем конце электроны имеют более высокую энергию и скорость, чем на холодном. Поэтому электроны перемещаются к холодному концу и накапливаются там. В результате возникает разность потенциалов, представляющая собой термо-э.д.с. термопары.

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0),$$

где $e_{AB}(t)$ и $e_{AB}(t_0)$ – разность потенциалов в спаях при температурах t и t_0 .

Если $t_0 = const$, то развиваемая термопарой термо-э.д.с. будет определяться только температурой рабочего спая t :

$$E_{AB}(t, t_0) = f(t).$$

Зависимость $f(t)$ устанавливается экспериментальным путем.

Измерение температуры сводится к определению термо-э.д.с. термопары.

Для подключения вторичного прибора цепь термопары разрывается в свободном конце или в одном из термоэлектродов (рисунок 1.1) [5]. Термо-э.д.с. термопары не изменяется от введения в ее цепь третьего проводника С (рисунок 1.2), если концы этого проводника имеют одинаковые температуры. В противном случае возникает паразитная термо-э.д.с. термопар, состоящих из этого проводника и термоэлектродов.

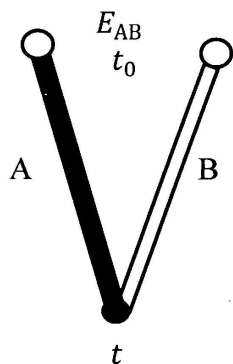


Рисунок 1.1 – Схема термопар

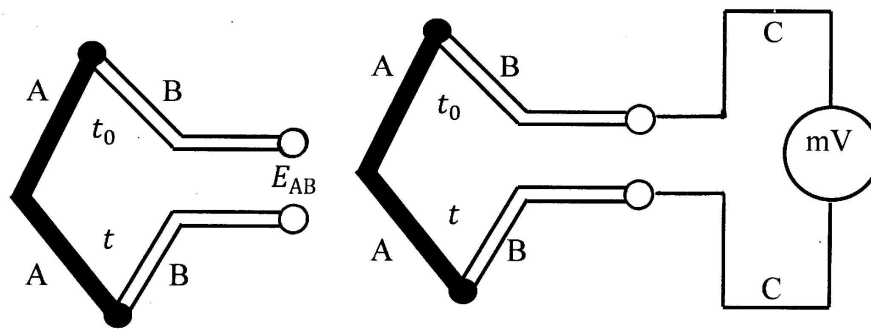


Рисунок 1.2 – Подключение к термопаре третьего проводника

Зависимость развиваемой термопарой термо-э.д.с. от температуры рабочего спая t при температуре свободных концов $t_0 = 0$ называется номинальной статической характеристикой (НСХ) или градуировочной характеристикой, то есть

$$E(t, 0) = f(t).$$

НСХ задается в виде градуировочных таблиц [2].

Если $t_0 \neq 0$ °С, то вводится поправка:

$$E(t, 0) = E(t, t_0) \pm E(t_0, 0),$$

где $E(t, t_0)$ – измеренная термо-э.д.с.;

$E(t_0, 0)$ – поправка на температуру свободного спая.

Знак плюс относится к случаю, когда $t_0 > 0$ °С, и знак минус – когда $t_0 < 0$ °С.

Значение поправки $E(t_0, 0)$ определяется по градуировочной таблице для температуры свободных концов t_0 .

Для исключения влияния температуры окружающей среды на величину термо-э.д.с. при технических измерениях применяют компенсационные устройства или термостаты, выполняющие автоматическое компенсированное изменение температуры свободных концов термопары.

1.2.2. Стандартные термопары

В настоящее время допускается применение технических термопар пяти типов: платинородий-платиновая (ТПП); платинородий-платинородиевая (ТПР); хромель-алюмелевая (ТХА); хромель-копелевая (ТХК); и из сплавов НК-СА (ТНС). Для каждой из этих термопар установлены стандартные градуировочные таблицы (см. приложение А). Предельные температуры, допускаемые при использовании указанных термопар, представлены в приложении В.

Недостаток термопар типа ТПП и ТПР – их повышенная стоимость и небольшая термо-э.д.с. Однако, ни одна из существующих термопар не обладает такой стабильностью и воспроизводимостью свойств, как ТПП.

Термопары ТХА и ТХК являются наиболее универсальными и распространенными в технике. ТХК имеют максимальную развиваемую термо-э.д.с.

Характерной особенностью термопары ТНС является то, что она не требует введения поправки на температуру свободных концов (при $t < 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $E(t_0, 0) \approx 0$).

В особых случаях промышленной и лабораторной практики применяют нестандартные термопары (медь-константановые, вольфрамений-вольфрамениевые и др.). Все нестандартные термопары проходят индивидуальную градуировку.

Рабочий конец (спай) термопары образуется путем сварки или пайки.

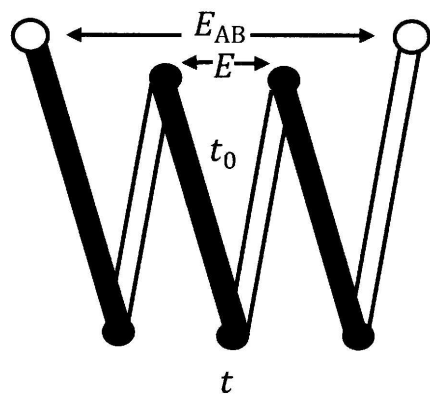


Рисунок 1.3 – Термобатарея

В тех случаях, когда требуется измерить небольшую разность температур или получить большую термо-э.д.с., применяют термобатареи (рисунок 1.3):

$$E_B = n \cdot E(t, t_0),$$

где n – число включенных в термобатарею термопар.

Применение термобатареи уменьшает погрешность измерения.

1.2.3. Компенсационные и соединительные провода

В технике изолированные керамической трубкой провода термопары 7 (рисунок 1.4) размещают в чехле 6 для защиты от механи-

ческих повреждений и агрессивных сред. Свободные концы термопары располагают в головке 1 термоэлектрического термометра. Температура головки 1 может меняться в зависимости от условий теплообмена; измерять ее трудно.

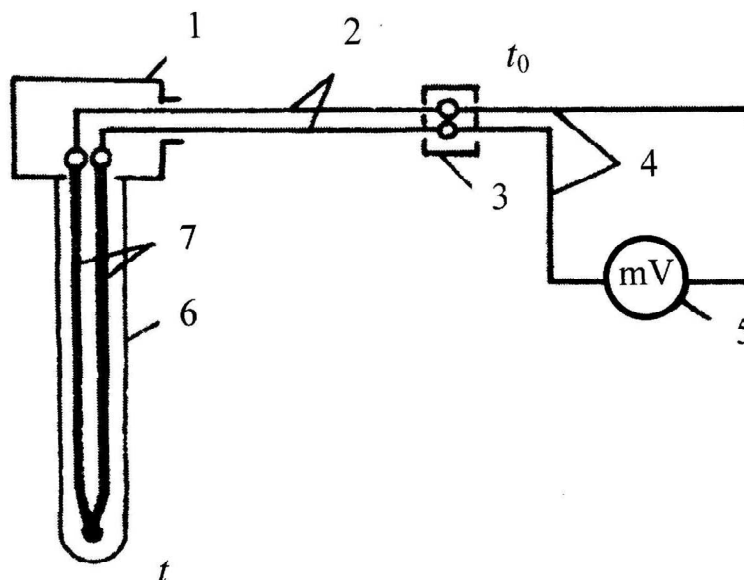


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема подключения электроизмерительного прибора к термопаре

Для вывода свободных концов термопары 7 в зону постоянной и известной температуры применяют компенсационные провода 2. Для термопар из недорогих материалов компенсационные провода изготавливаются чаще всего из материалов термоэлектродов. Они как бы продолжают термоэлектроды в иной (более тонкой и дешевой) изоляции. Компенсационные провода термопар из драгоценных материалов в целях удешевления выполняют из специальных материалов. Поддержание постоянной температуры свободных концов производится при помощи термостата 3. Вторичный измерительный прибор 5 присоединяется к термопаре с помощью соединительных проводов 4.

В современных вторичных измерительных приборах осуществлено автоматическое введение поправок на температуру свободных концов с помощью неуравновешенного измерительного моста.

1.2.4. Измерение термо-э.д.с.

Измерение термо-э.д.с. производится двумя способами: прямым – с помощью милливольтметров и компенсационным – с помощью потенциометров.

Компенсационный метод основан на уравнивании измеряемой термо-э.д.с. известной разностью потенциалов. В этом случае ток

в цепи термопары отсутствует, поэтому колебания сопротивления термопары, компенсационных и соединительных проводов не влияют на точность измерения.

К одному вторичному прибору можно присоединять несколько термопар, строгим правилом является применение двухпроводных схем. В этом случае замыкание на корпус отдельных термопар не сказывается на работе остальных. На рисунке 1.5 представлена монтажная схема с общим свободным концом, расположенным в термостате.

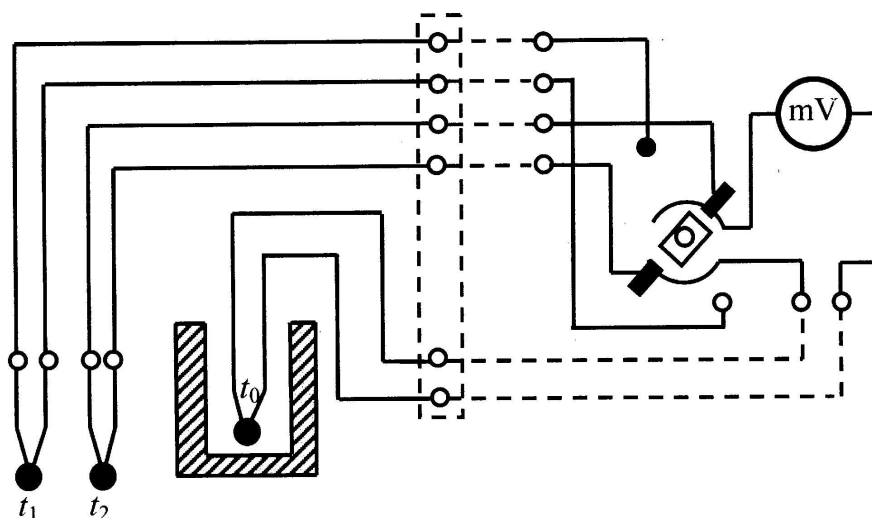


Рисунок 1.5 – Монтажная схема подключения термопар к электроизмерительному прибору

1.2.5. Поверка термопар

Поверка стандартных термопар имеет целью установить соответствие термо-э.д.с., развиваемой термопарой, стандартным градуировочным характеристикам по действующим ГОСТам (см. приложение А) [2]. Термопары могут быть допущены к употреблению, если отклонения термо-э.д.с. от стандартных значений будут не больше предельно допустимых (см. приложение Б).

Отклонения термо-э.д.с. от стандартных могут возникать в результате:

- не строго выдержанного химического состава материалов (сплавов) термоэлектродов;
- негомогенности (неоднородности) термоэлектродной проволоки;
- различных местных инородных включений (загрязнений).

У термопар, находившихся в эксплуатации, может произойти некоторое изменение термоэлектрических свойств в результате длительной их работы при предельно допустимой температуре (см. при-

ложение В). В случае отклонения термо-э.д.с, более допустимого и отсутствия или невозможности замены термопары на другую, ее тарируют. При дальнейшей эксплуатации пользуются уже новой уточненной градуировкой.

Температуру свободных концов термопар рекомендуется поддерживать равной $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Допускается поверка термопар при температуре свободных концов и не равной $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. В этом случае они термостабилизируются, а их температура измеряется с погрешностью не более $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом температура постоянно контролируется.

Поверка термопар производится не менее чем в четырех температурных точках, равномерно расположенных в интервале температур градуировки.

Поверка термопар производится при постепенном (медленном) повышении или понижении температуры. Вблизи намеченной для поверки температурной точки скорость изменения температуры не должна превышать $\pm 0,4\text{ град./мин.}$

1.3. Описание лабораторной установки

Для выполнения поверки термопары в работе используется установка, изображенная на рисунке 1.6.

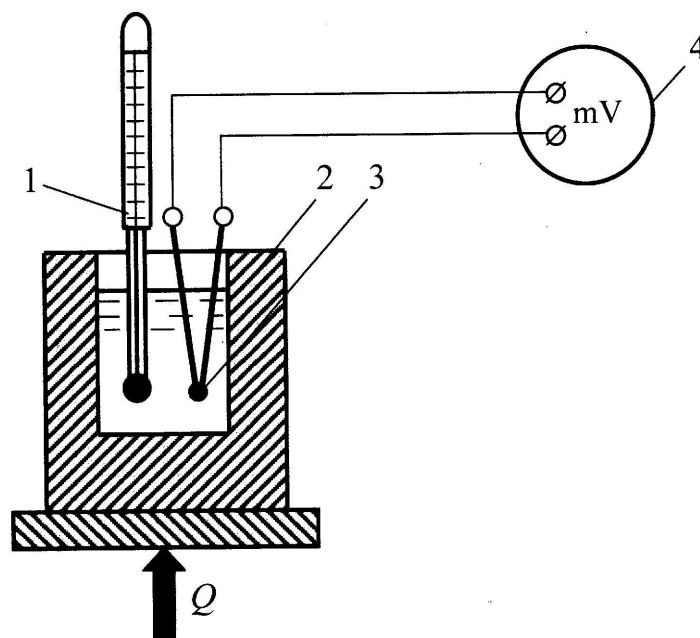


Рисунок 1.6 – Схема установки:

- 1 – термометр; 2 – цилиндр; 3 – рабочий конец поверяемой термопары;
4 – милливольтметр

В толстостенном металлическом цилиндре 2 выполнено углубление, заполненное жидкостью, в котором размещается рабочий конец

поверяемой термопары 3 и термометр 1. Цилиндр 2 размещается на электроподогревателе. Свободные концы термопары присоединены с помощью соединительных проводов к милливольтметру 4.

При проверке определяются значения э.д.с. термопары, замеренные милливольтметром 4, и соответствующие значения температуры по термометру 1.

1.4. Порядок выполнения работы

Проверка термопары на установке (рисунок 1.6) выполняется следующим образом.

С разрешения преподавателя включается электроподогрев цилиндра 2 с расположенными в нем термопарой 3 и термометром 1. По термометру 1 производится определение температуры рабочего конца термопары 3, а соответствующая термо-э.д.с. милливольтметром 4. Через каждые 10°C или 20°C (задается преподавателем) производится замер термо-э.д.с. $E(t, t_0)$ термопары. Данные заносятся в таблицу 1.1.

По достижении максимальной температуры, указанной преподавателем, электроподогрев выключается. При охлаждении производятся аналогичные замеры в тех же температурных точках, что и при подогреве. Выполняется соответствующая запись в таблице 1.1.

1.5. Обработка опытных данных

1. В результате проведения экспериментальной части работы в таблице 1.1 заполнены столбцы значений температур t и измеренные соответствующие им значения термо-э.д.с. $E(t, t_0)$ термопары.

2. Если температура свободных концов термопары $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$, то $E^{\text{оп}}(t, 0) = E(t, t_0)$.

3. Если $t_0 > 0^{\circ}\text{C}$, то вводится поправка $E(t_0, 0)$. Значение поправки равно табличному значению термо-э.д.с. (см. Приложение А) для температуры свободных концов t_0 .

При этом, если температура свободных концов находится в диапазоне представленных в приложении А значений, то величина поправки определяется по интерполяционной зависимости:

$$E(t_0, 0) = E(t_0, 0)_{\text{м}} + \frac{E(t_0, 0)_{\text{б}} - E(t_0, 0)_{\text{м}}}{t_{\text{б}} - t_{\text{м}}} \cdot (t_0 - t_{\text{м}}),$$

где $t_{\text{м}}, t_{\text{б}}$ – меньшее и большее значение температур из соответствующего диапазона,

$E(t_0, 0)_{\text{м}}, E(t_0, 0)_{\text{б}}$ – меньшее и большее значение термо-э.д.с. из соответствующего диапазона;

4. Определяется опытное значение термо-э.д.с. термопары для температуры рабочего спая t при температуре свободных концов $t_0 = 0$ по зависимости:

$$E^{\text{оп}}(t, 0) = E(t, t_0) + E(t_0, 0),$$

где $E(t, t_0)$ – измеренная термо-э.д.с.;

$E(t_0, 0)$ – поправка на температуру свободного спая.

5. Из приложения А находятся соответствующие стандартные значения $E^{\text{ст}}(t, 0)$, которые переносятся в таблицу 1.1.

6. Определяется абсолютная погрешность:

$$\Delta = E^{\text{оп}}(t, 0) - E^{\text{ст}}(t, 0).$$

7. Производится сопоставление абсолютной погрешности с допустимым отклонением $E^{\text{доп}}$ (см. приложение Б).

8. Делается вывод о соответствии термо-э.д.с. термопары стандартной градуировке.

9. По данным таблицы 1.1 строится график зависимости:

$$E^{\text{оп}}(t, 0) = f(t).$$

1.6. Контрольные вопросы

1. Из чего состоит термоэлектрический термометр?
2. Каково устройство и принцип работы термопар?
3. Какие термопары являются стандартными, чем они характеризуются?
4. Что такое термобатарея?
5. Каково назначение компенсационных и соединительных проводов? Схемы соединения.
6. Как стабилизируется температура свободных концов термопары?
7. Каковы два способа измерения термо-э.д.с.?
8. В чем суть поверки термопар?
9. Каковы причины отклонения термо-э.д.с. термопары от стандартной градуировки?
10. Устройство установки для поверки термопар.
11. Каков порядок поверки термопар на установке?

[illegible]

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ПОВЕРКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКТА ДМ С ВМД

2.1. Цель работы

Целью работы является изучение устройства и поверка измерительного комплекса дифференциального манометра ДМ с ВМД.

2.2. Теоретический раздел

Под *давлением* жидкости понимают отношение силы F , действующей на данную поверхность, к площади S этой поверхности:

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

Единицей давления в Международной системе единиц СИ является паскаль (Па) – это давление, создаваемое силой в один Ньютон (Н), равномерно распределенной по поверхности площадью, равной одному квадратному метру (м^2). $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$.

Более удобными для практического использования являются кратные единицы – килопаскаль (кПа) и мегапаскаль (МПа):

$$1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}; 1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}.$$

В связи с тем, что большинство измерительных приборов градуировано еще в старых (внесистемных) единицах, а также то, что в справочной литературе, каталогах и технических характеристиках их пока используют, соотношения между различными единицами давления приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Соотношения между единицами давления

Наименование внесистемной единицы давления	Обозначение (русское) единицы	Соотношение с единицей СИ	Соотношение с другими внесистемными единицами
Килограмм-сила на квадратный метр	кгс/м ²	9,81 Па	10^{-4} кгс/см ²
Килограмм-сила на квадратный сантиметр (техническая атмосфера)	кгс/см ² (ат)	$9,81 \cdot 10^4$ Па	10^4 кгс/м ² 735,6 мм рт. ст. 10^4 мм вод. ст.
Миллиметр ртутного столба (Торр)	мм. рт. ст. (Торр)	133,3 Па	10^{-3} м рт. ст. 13,6 мм вод. ст.
Миллиметр водяного столба	мм. вод. ст.	9,81 Па	10^{-3} м вод. ст.
Бар	бар	10^5 Па	750 мм рт. ст.
Физическая атмосфера	атм	101325 Па	760 мм рт. ст.

Различают атмосферное, абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давление.

Абсолютное давление p представляет собой полное напряжение сжатия от действия всех внешних сил, приложенных к жидкости.

Атмосферное давление B создается весом столба воздуха, простирающегося от уровня земли до высоты более 300 километров. Нормальное атмосферное давление на уровне моря при температуре 0°C принимают равным 101325 Па (1 атм или 760 мм.рт.ст.).

Если абсолютное давление жидкости в резервуаре больше атмосферного, то говорят об *избыточном давлении* p_u , под которым понимают разность:

$$p_u = p - B.$$

Недостаток абсолютного давления до атмосферного называется *вакуумметрическим давлением (вакуумом или разрежением)* p_v :

$$p_v = B - p.$$

Приборы, служащие для измерения избыточного давления, называются *манометрами*, вакуумметрического – *вакуумметрами*, атмосферного – *барометрами* [1].

В манометрах используются различные физические принципы. По этому признаку манометры делятся на жидкостные, механические и грузопоршневые.

В первых – измеряемое избыточное давление или разность давлений в различных точках уравнивается давлением столба жидкости, во вторых – избыточное давление определяется по деформации чувствительного элемента (трубчатой пружины, мембраны или сильфона), в третьих – измеряемое давление уравнивается массой поршня и груза.

При поверке технических манометров производится [5]:

- внешний осмотр;
- проверка герметичности;
- определение погрешности показаний.

При внешнем осмотре необходимо убедиться в том, что прибор не имеет видимых внешних дефектов. Более детальные требования по данному вопросу представлены в соответствующих инструкциях, имеющих в поверочных лабораториях.

Герметичность прибора проверяется следующим образом: поверяемый прибор подключается к прессу и в системе создается давление, равное верхнему пределу измерений. Если в течение 5 минут показание прибора не изменяется, то прибор считается герметичным.

Погрешность показаний прибора определяется путем сравнения

показаний прибора с действительным значением, устанавливаемым по образцовому манометру. При этом необходимо, чтобы верхний предел образцового прибора был более или равен верхнему пределу измерений поверяемого прибора. Кроме того, основная погрешность образцового прибора должна быть в $3\div 4$ раза меньше основной погрешности поверяемого прибора.

Отсчеты производятся не менее чем на пяти отметках, равномерно расположенных по шкале при повышении давления и в тех же отметках при понижении давления. Погрешности прибора, получаемые при поверке в каждой отметке шкалы, как при повышении, так и при понижении давления, не должны превышать величины основной допустимой погрешности данного прибора. Разность показаний прибора при повышающемся и понижающемся давлении (вариация) для каждой отметки шкалы также не должна превышать величины основной допустимой погрешности данного прибора.

Первичные приборы типа ДМ являются частью комплекта для дистанционного измерения перепада давления, а также других параметров, которые могут определяться по изменению перепада давления (расход, уровень и др.), и служат для преобразования измеряемого перепада давления в выходной электрический сигнал, который передается на вторичный прибор (ВМД) дифференциально-трансформаторной схемы. Измеряемыми средами могут служить жидкости и газы, не имеющие механических включений, не кристаллизующиеся в пределах рабочей температуры и не агрессивные по отношению к меди и нержавеющей сталям и сплавам, в том числе: пресная и морская вода, дистиллят, бидистиллят, керосин, флотский мазут, дизельное топливо, бензин, смазочное масло, воздух, водяной пар.

Общий вид первичного прибора дифференциального манометра показан на рисунке 2.1.

Принцип действия прибора основан на использовании деформации упругого чувствительного элемента при воздействии на него измеряемого перепада давления.

Упругий чувствительный элемент манометра состоит из разделительной перегородки 5, в которую ввернуты металлические мембранные коробки 4 и 6. Коробки составлены из мембраны с совпадающими профилями гофрировки. Внутренние полости коробок сообщаются между собой каналом и заполнены дистиллированной водой. В центре верхней мембраны закреплен ферромагнитный сердечник 3, помещенный в катушки 2 и 8. Сердечник находится внутри разделительной

тельной трубки 1, выполненной из немагнитной стали. В нижнюю и верхнюю камеры корпуса 7 подводятся давления P_1 и P_2 через специальные штуцерные соединения. Под действием разности давлений в камерах, когда $P_1 > P_2$, нижняя коробка сжимается, жидкость из нее через отверстие в перегородке перетекает в верхнюю мембранную коробку, вызывая перемещение мембраны и сердечника 3. Мембраны перемещаются до тех пор, пока сила, вызванная перепадом давлений, не уравнивается силами упругой деформации. В случаях, когда перепад давлений превысит предельное значение, мембраны сжимаются гофр в гофр. Это предотвращает разрушение мембраны. Передача показаний к вторичному (показывающему) прибору ВМД осуществляется с помощью дифференциально-трансформаторной передачи.

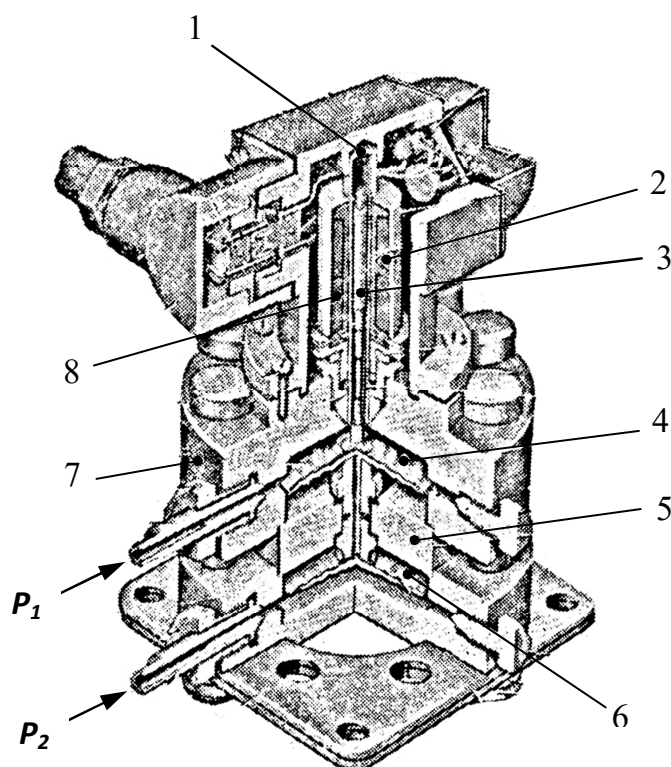


Рисунок 2.1 – Первичный прибор дифференциального манометра: 1 – разделительная трубка; 2 – катушки; 3 – ферромагнитный сердечник; 4 – верхняя мембранная коробка; 5 – разделительная диафрагма; 6 – мембранная коробка; 7 – корпус; 8 – катушки

Вторичный полупроводниковый миниатюрный прибор типа ВМД с дифференциально-трансформаторной схемой в комплекте с первичным прибором предназначен для непрерывного измерения параметра и сигнализации отклонения его величины от заданных предельных значений.

2.3. Описание лабораторной установки

Для выполнения поверки манометра в работе используется установка, схема которой представлена на рисунке 2.2.

В корпусе питающего насоса 10 расположен поршень 11, который с помощью винтового штока 9 перемещается при вращении маховика 8. К корпусу питающего насоса 10 присоединены с помощью клапанов 12, 13, 14 и 15 соответственно образцовый манометр 7, маслобак 6, пресс 5 и поверяемый манометр 1. В прессе 5 давление создается плунжером 4 за счет размещения на тарелке 3 контрольных грузов 2. В качестве поверяемого прибора в установке используется дифференциальный манометр 1 (ДМ).

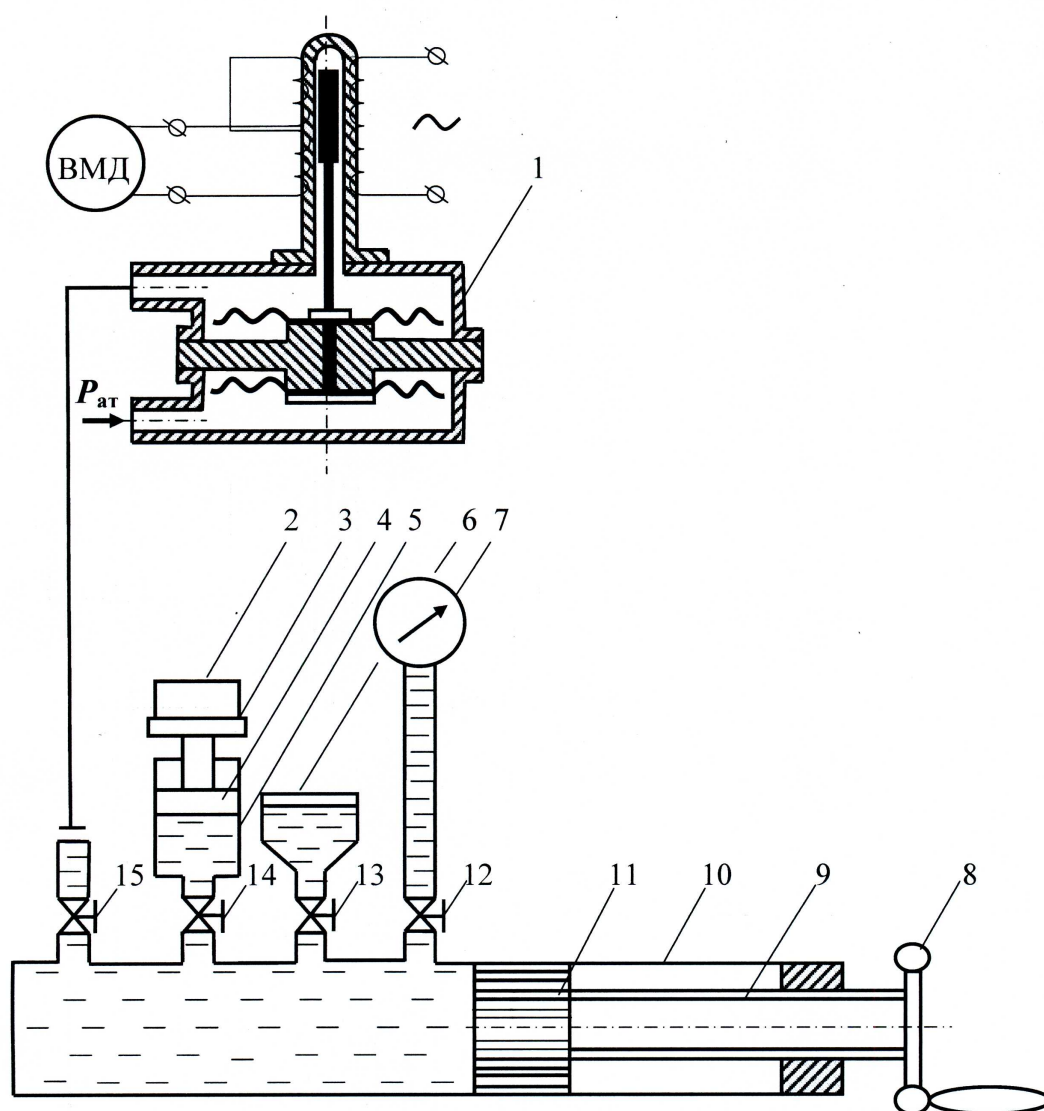


Рисунок 2.2 – Схема установки:

- 1 – поверяемый манометр; 2 – контрольные грузы; 3 – тарелка; 4 – плунжер;
5 – пресс; 6 – маслобак; 7 – образцовый манометр; 8 – маховик; 9 – винтовой шток;
10 – питающий насос; 11 – поршень; 12, 13, 14, 15 – клапаны

2.4. Порядок выполнения работы

Поверка манометра на установке (рисунок 2.2) может быть выполнена двумя способами.

Поверка манометра с использованием образцового манометра.

Исходное состояние установки следующее: поршень 11 находится в крайнем левом положении, клапаны 12, 13, 14 и 15 закрыты.

Последовательность операций при поверке:

- открыть клапан 13 маслобака 6;
- вращая маховик 8 и, тем самым, перемещая поршень 11 вправо, заполнять полость питающего насоса 10 маслом;
- закрыть клапан 13;
- открыть клапаны 12 и 15;
- вращением маховика 8 поршнем 11 в полости подающего насоса 10 создается давление, его значение считывается по образцовому 7 и поверяемому 1 манометрам;
- повышают давление, задавая по поверяемому манометру 1 соответствующие значения (см. таблицу 2.2);
- снижают давление, задавая по поверяемому манометру 1 соответствующие значения (см. таблицу 2.2);
- снизив давление до нуля, переводят установку в исходное состояние, закрыв клапаны 12 и 15 и открыв клапан 13, вращая маховик 8, перекачивают масло в маслобак 6 (поршень 11 переходит в крайнее левое положение).

Таблица 2.2 – Таблица опытных данных

По поверяемому манометру $P_{\text{пов}} \cdot 10^{-5}$, Па	По образцовому манометру					
	Нагрузка			Разгрузка		
	$P'_{06} \cdot 10^{-5}$, Па	$P_{06} \cdot 10^{-5}$, Па	$\Delta P \cdot 10^{-5}$, Па	$P'_{06} \cdot 10^{-5}$, Па	$P_{06} \cdot 10^{-5}$, Па	$\Delta P \cdot 10^{-5}$, Па
0						
1,6						

Поправка на взаимное расположение манометров:

$$P_{об} = P'_{об} + \gamma \cdot h,$$

где $\gamma = 9000 \text{ Н/м}^3$ – удельный вес масла;

$h = 0,17 \text{ м}$ – расстояние по вертикали между манометрами.

Поверка манометра с использованием контрольных грузиков.

Последовательность операция при поверке:

- открыть клапан 13 маслобака 6;
- вращая маховик 8, заполнить полость питающего насоса 10 маслом;
- закрыть клапан 13;
- открыть клапаны 14 и 15;
- размещая на тарелке 3 контрольные грузики 2 (на которых указана добавка давления в системе при установке их на столике 3), создают строго определенное давление, регистрируемое поверяемым манометром.

Остальные операции аналогичны рассмотренным при поверке с использованием образцового манометра.

2.5. Обработка опытных данных

Преподаватель указывает, каким из двух перечисленных способов выполняется поверка манометра на установке. В процессе поверки заполняется таблица 2.2. В результате находится разница показаний манометров:

$$\Delta P = P_{об} - P_{пов}, \text{ Па}$$

которая также заносится в таблицу 2.2.

По данным таблицы 2.2 строится график зависимости $\Delta P = f(P_{пов})$, совмещенный для нагрузки и разгрузки (рисунок 2.3). Опытные точки соединяются при этом прямыми линиями.

Допустимая основная погрешность прибора определяется как:

$$\Delta P_{доп} = \frac{P_{max} \cdot k}{100}, \text{ Па}$$

где P_{max} – максимальное значение шкалы прибора, Па;

$k = 2,5$ – класс точности прибора.

Сравниваются полученные значения ΔP с допустимыми $\Delta P_{доп}$. Должно выполняться условие $\Delta P_{доп} \geq \Delta P$. В противном случае прибор считается непригодным к работе.

В результате делается заключение о пригодности данного прибора для эксплуатации.

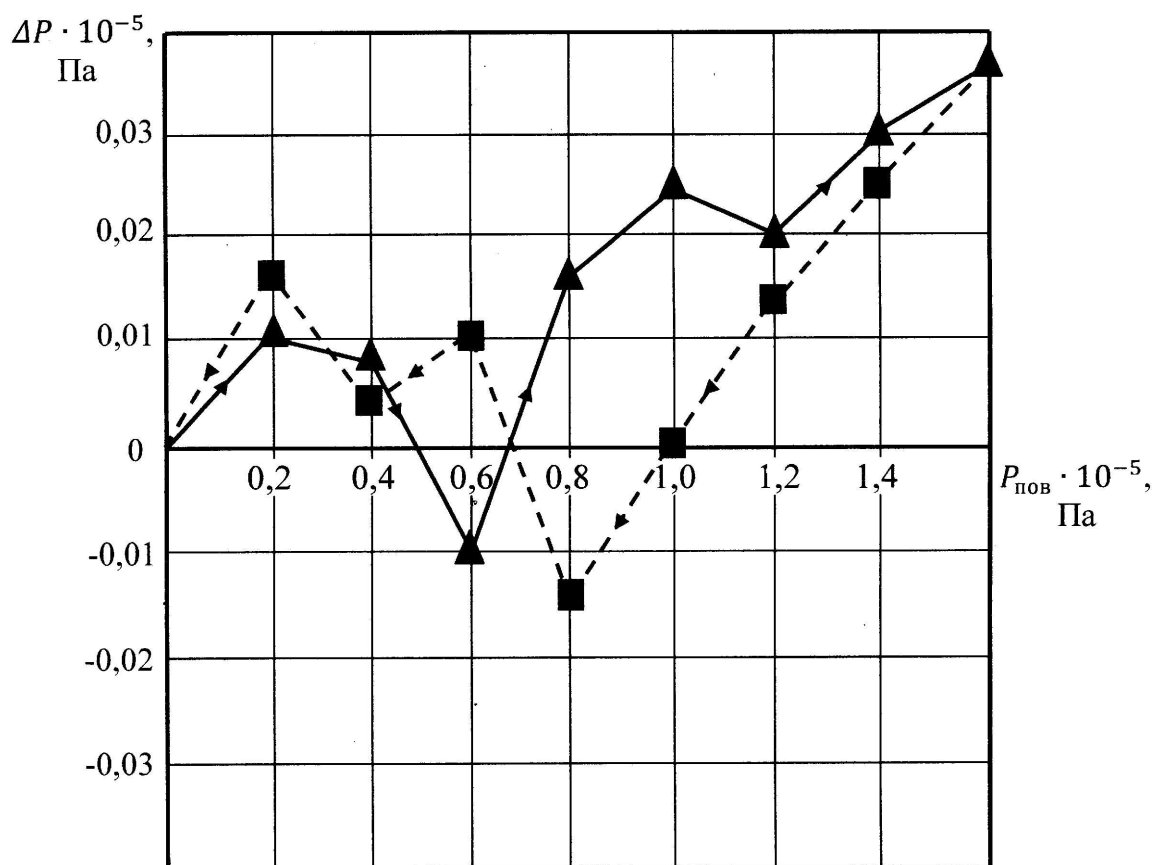


Рисунок 2.3 – Один из возможных вариантов графической зависимости

2.6. Контрольные вопросы

1. Название, цель и содержание работы.
2. Понятие давления жидкости, его свойства и единицы измерения.
3. В чем различие между абсолютным, атмосферным, избыточным и вакуумметрическим давлением?
4. Какие приборы называются манометрами и вакуумметрами?
5. Какие типы манометров известны, их устройство и принцип действия?
6. Каковы основные принципы выбора манометров для измерения давления?
7. Как учитывается геометрическая высота расположения манометра над точкой измерения?
8. В чем смысл поверки манометра? Какие показатели контролируются и как?
9. Каково устройство установки для поверки манометров?
10. Каковы два способа поверки манометров на установке и соответствующая им последовательность операций в работе?
11. Каковы критерии оценки пригодности поверяемого прибора к дальнейшей эксплуатации?

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА. ТАРИРОВКА РАСХОДОМЕРА ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

3.1. Цель работы

Целью работы является изучение приборов для измерения расхода и проведение тарировки расходомера переменного перепада давления с построением соответствующей графической зависимости.

3.2. Теоретический раздел

Расход - это количество вещества, проходящее через определенное сечение в единицу времени. В зависимости от количества вещества (объема V или массы m) различают объемный Q , м³/с, и массовый Q_m , кг/с, расходы.

$$Q = \frac{V}{\tau} = v_{\text{ср}} \cdot S, \text{ м}^3/\text{с}; \quad Q_m = \frac{m}{\tau} = \rho \cdot v_{\text{ср}} \cdot S, \text{ кг/с},$$

где $v_{\text{ср}}$ – средняя скорость, м/с;

S – площадь сечения, м²;

ρ – плотность вещества, кг/м³.

Расходомер – это прибор, измеряющий количество вещества, проходящего через данное сечение в единицу времени.

Счетчик количества – это прибор, измеряющий количество вещества, протекающего через данное сечение за некоторый промежуток времени.

Расход может быть измерен:

- объемным методом;
- тахометрическими счетчиками количества и расхода;
- расходомерами переменного перепада давления;
- расходомерами постоянного перепада давления и т.д.

3.2.1 Объемный метод измерения расхода

Объемный метод применяют для определения средних за период измерения расходов жидкости. Этот метод характеризуется простотой и при тщательной подготовке – высокой точностью. Суть метода заключается в измерении времени заполнения жидкостью мерной емкости (рисунок 3.1), объем которой известен.

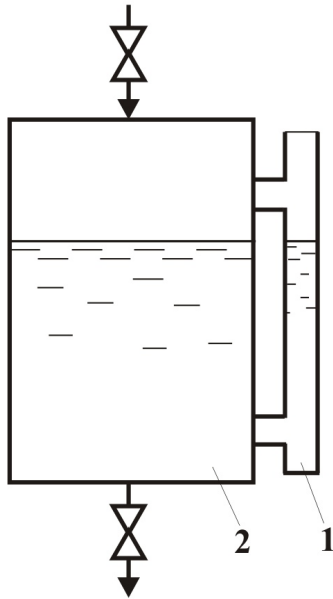


Рисунок 3.1 – Объемный метод измерения расхода:
1 – мерное стекло; 2 – емкость

Расход жидкости определяется:

$$Q = \frac{V}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где V – объем мерной емкости, м^3 ;

τ – время заполнения мерной емкости, с.

Основной источник погрешностей этого метода – отсчет количества жидкости и промежутка времени.

3.2.2 Тахометрические расходомеры и счетчики количества

Тахометрические счетчики количества состоят из тахометрического преобразователя расхода и счетного суммирующего механизма. По принципу действия они делятся на скоростные и камерные.

В скоростных в качестве тахометрического преобразователя чаще всего используются турбинки, которые вращаются под действием набегающего потока.

Действие таких счетчиков основано на линейной зависимости частоты вращения n турбинки от скорости v_{cp} потока:

$$n = k \cdot v_{cp},$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Тахометрические скоростные счетчики в зависимости от положения турбинок относительно направления потока делятся на тангенциальные (рисунок 3.2) и аксиальные (рисунок 3.3).

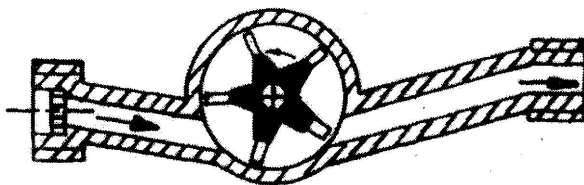


Рисунок 3.2 – Тахометрический скоростной счетчик с тангенциальной турбинкой

В аксиальных турбинках лопасти имеют винтовую форму. Турбинка 1 через червячную передачу 2 вращает вал 3, который механически связан со счётным механизмом 4.

Основная погрешность таких счётчиков равна $\pm 2\%$ при измерении расхода в пределах $10 \div 150\%$ от номинального и 5%

– при меньших расходах. Счётчики с тангенциальной турбинкой выпускаются на расходы воды от 1 до 10 м³/ч, с аксиальной – от 10 до 100 м³/ч. При установке на трубопроводах необходимо выдерживать до и после счётчика прямые участки длиной 8÷10 диаметров трубопровода.

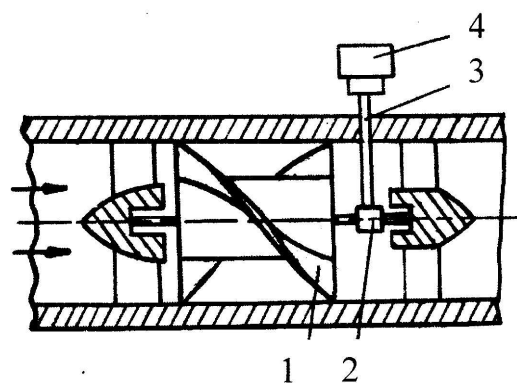


Рисунок 3.3 – Тахометрический скоростной счетчик с аксиальной турбинкой:

1 – турбинка; 2 – червячная передача; 3 – вал; 4 – счетный механизм

Камерные счётчики основаны на пропускании жидкости (газа) через определённые объёмы и подсчёты числа отсечек таких объёмов.

$$V = n \cdot V_m,$$

где V_m – объём жидкости, отсекаемый разделительным элементом, м³;

n – число ходов разделительного элемента за некоторое время.

Наибольшее распространение получили счётчики с овальными шестернями (рисунок 3.4). Основная погрешность счётчика равна ±0,5%, потеря давления при нормальном расходе не превышает 0,05 МПа.

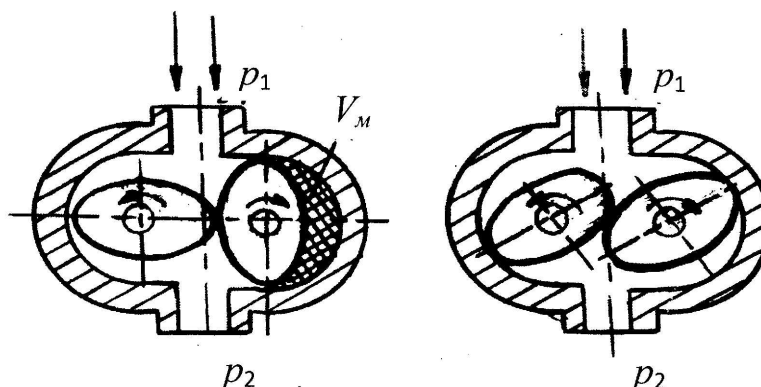


Рисунок 3.4 – Камерный счетчик с овальными шестернями

Тахометрические расходомеры имеют аналогичную конструкцию преобразователя расхода, отличаясь наличием специального счётного устройства.

3.2.3 Расходомеры переменного перепада давления

Принцип действия этих расходомеров основан на зависимости расхода от перепада давления, создаваемого неподвижным устройством, устанавливаемым в трубопроводе:

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2},$$

где ΔP – перепад давления, Па;

ζ – коэффициент местного сопротивления (неподвижного устройства);

v – скорость жидкости, м/с;

ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Наибольшее распространение получили расходомеры с сужающим устройством. В них преобразователем расхода служат диафрагмы, сопла, расходомерные трубы (сопла Вентури). Обязательное условие для нормальной работы таких устройств: установившийся режим течения, неизменность фазового состояния и полное заполнение жидкостью сечения трубопровода.

Диафрагма представляет собой тонкий диск с центральным отверстием, concentрично расположенным в трубопроводе (рисунок 3.5). Отношение площади отверстия S_0 к площади проходного сечения трубы S называется модулем:

$$m = \frac{S_0}{S} = \frac{d_0^2}{D^2}.$$

При измерении расхода несжимаемой среды его величина может быть найдена по зависимости:

$$Q = \mu \cdot S_0 \cdot \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}},$$

где μ – коэффициент расхода;

p_1 и p_2 – давление соответственно до и после сужающего устройства, Па;

ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Для сужающих устройств основным является определение величины μ , которое выполняется опытным путём.

У стандартных сужающих устройств (имеющих строго определённый профиль, проходное сечение и способ измерения перепада давления) величины μ установлены с высокой точностью. Необходимые сведения по выбору таких устройств даны в «Правилах 28-64 измерения расхода жидкостей, газов и паров стандартными диафрагмами и соплами».

Стандартные диафрагмы используются в трубопроводах с условным диаметром прохода 50÷500 мм. Модуль диафрагмы $m = 0,05 \div 0,7$. При диаметре трубопровода менее 50 мм необходима индивидуальная

тарировка диафрагмы. Стандартные сопла (рисунок 3.6) характеризуются меньшей безвозвратной потерей напора. Применяются в трубопроводах диаметром $50 \div 500$ мм и модулем $0,05 \div 0,65$.

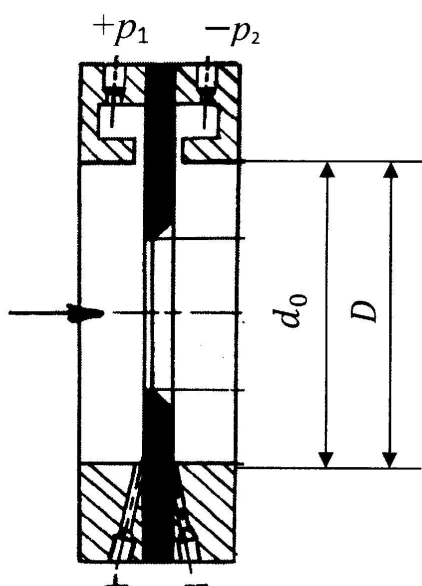


Рисунок 3.5 – Стандартное сужающее устройство: диафрагма

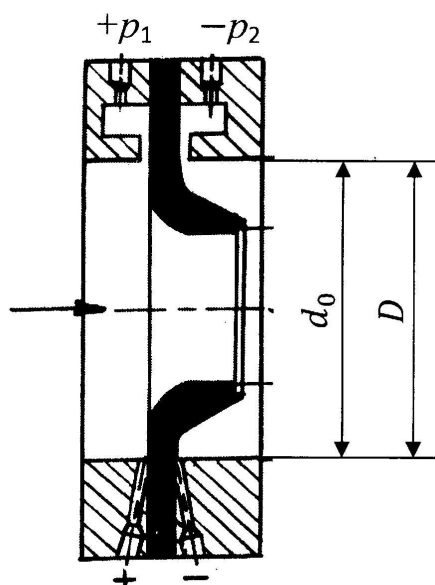


Рисунок 3.6 – Стандартное сужающее устройство: сопло

Стандартные сопла Вентури (рисунок 3.7) имеют входную часть с профилем стандартного сопла, которая переходит в цилиндрическую часть и выходной конус.

Угол выходного конуса $\varphi = 5 \div 30^\circ$. Сопла Вентури применяются в трубопроводах диаметром 50 мм и модулем $0,05 \div 0,5$. Они имеют минимальную безвозвратную потерю давления.

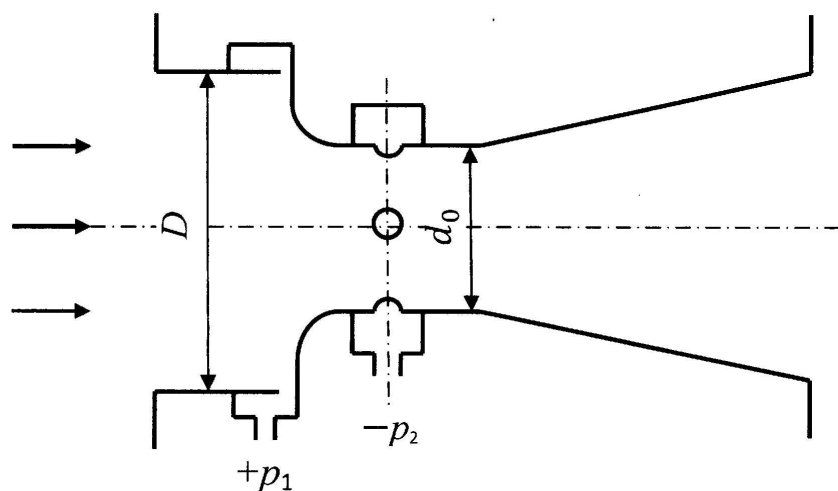


Рисунок 3.7 – Стандартное сужающее устройство: сопло Вентури

3.2.4. Расходомеры постоянного перепада давления. Ротаметры

Действие таких расходомеров основано на изменении проходного сечения пропорционально расходу. Вытекающее отсюда постоянство скорости измеряемой среды в проходном сечении означает поддержание в процессе измерения постоянного перепада давления на подвижном сопротивлении.

Ротаметр (рисунок 3.8) состоит, как правило, из прозрачной конической трубки 3, внутри которой расположено подвижное сопротивление (ротор) 4. На верхнем ободе ротора имеются винтовые пазы 2, обеспечивающие вращение ротора. Вследствие этого он центрируется в середине потока и не соприкасается со стенками.

Подъём ротора происходит до тех пор, пока сила тяжести ротора не уравнивается силами взаимодействия потока с ним (что пропорционально перепаду давления на нём). Подъём ротора h (рисунок 3.8) ограничен упором 1.

Расход определяется:

$$Q = \mu \cdot (S - S_p) \cdot \sqrt{\frac{2(\Delta p)}{\rho}},$$

где S – площадь поперечного сечения конической трубки при поднятии ротора на высоту h , м²;

S_p – площадь лобовой поверхности ротора, м²;

Δp – разность статических давлений на роторе, Па.

Поскольку $\Delta p = \text{const}$ и $(S - S_p) = f(h)$, то

$$Q = k_1 \cdot (S - S_p) = k \cdot h,$$

где k_1 и k – коэффициенты пропорциональности.

На поверхности трубки 1 нанесены деления, с помощью которых по высоте h можно определить расход.

Ротаметры позволяют измерять малые расходы. Например, у стеклянных ротаметров верхний предел измерения составляет: для воды $7,0 \cdot 10^{-7}$ м³/с, по воздуху $1,0 \cdot 10^{-5}$ м³/с.

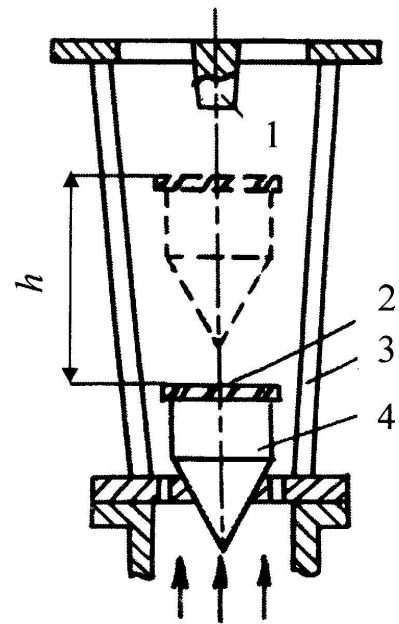


Рисунок 3.8 – Стеклянный ротаметр: 1 – трубка; 2 – ротор; 3 – винтовые пазы; 4 – упор

Нижний предел равен $10 \div 0$ % от верхнего. Класс точности промышленных ротаметров 1; 1,5; 2,5; 4,0.

3.2.5. Поверка расходомеров

Комплект расходомера состоит из сужающего устройства, дифманометра со вторичным прибором или без него, соединительных трубопроводов и вентиля.

Поверка расходомера в полном объёме складывается из поверки:

- а) расчёта сужающего устройства;
- б) соответствия сужающего устройства, трубопровода, соединительных линий и дополнительных принадлежностей Правилам 28-64;
- в) основных размеров сужающего устройства, остроты входной кромки диафрагмы, профиля сопла, частоты и качества обработки поверхностей;
- г) дифманометра и вторичных приборов.

В ряде случаев, оговоренных Правилами 28-64, допускается сокращать объём поверки, исключая пункты а, б, в. Поверку дифманометра и вторичных приборов полагается делать во всех случаях.

Дифманометры с невзаимозаменяемой телеметрической системой передачи показаний поверяются совместно (в комплекте) с относящимися к ним вторичными приборами.

В случае если сужающее устройство отличается от стандартного, то оно подлежит тарировке. Суть тарировки заключается в установлении соответствия между расходом, проходящим через сужающее устройство и перепадом давления на нём, измеряемым дифференциальным манометром. Величина же расхода при этом определяется другим прибором.

3.3. Описание лабораторной установки

Для проведения тарировки расходомера переменного перепада давления используется установка, изображённая на рисунке 3.9. Вода забирается центробежным насосом 7 из расходного бака 1 и прокачивается через сужающее устройство (диафрагму) 5. Далее через клапан 4, служащий для регулирования расхода, вода поступает на тахометрический скоростной счётчик количества (с тангенциальной турбинкой) 2. После этого вода опять сбрасывается в расходный бак 1. К сужающему устройству 5 присоединён дифференциальный манометр ДМ 6 со вторичным прибором ВМД 3.

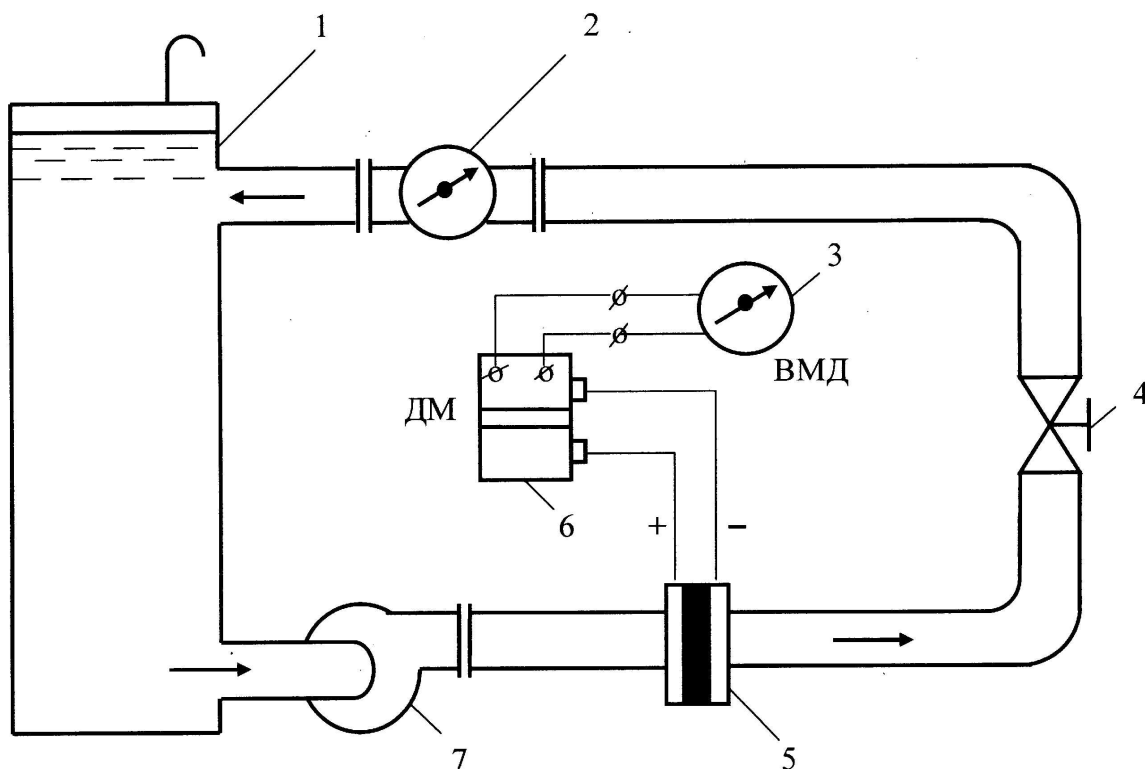


Рисунок 3.9 – Схема установки:

- 1 – расходный бак; 2 – скоростной счетчик с тангенциальной турбинкой;
 3 – прибор ВМД; 4 – клапан; 5 – диафрагма; 6 – дифференциальный манометр;
 7 – центробежный насос

Тарируемым прибором является расходомер с сужающим устройством 5 в комплекте с дифференциальным манометром ДМ 6 и вторичным прибором ВМД 3. Тарировка выполняется по тахометрическому счётчику количества 2.

3.4. Порядок выполнения опытов

Тарировка расходомера на установке (рисунок 3.9) выполняется следующим образом:

–при закрытом клапане 4 включается насос 7. В таблицу 3.1 записываются показания дифманометра 6;

–за счёт открытия клапана 4 увеличивается расход воды в системе, что связано с соответствующим изменением перепада давления на дифманометре 3. Расходы задаются по прибору 3 с шагом $0,2 \cdot 10^5$ Па (см. таблицу 3.1);

–для каждого заданного расхода заносятся в таблицу 3.1 показания прибора 3. По счётчику 2 засекается время τ прохождения некоторого объёма воды V . Данные записываются в таблицу 3.1;

–после достижения максимального расхода, его уменьшают клапаном 4, обеспечив те же значения перепада давлений по дифманометру 3, что и при увеличении расхода. При этом аналогичным образом заполняют таблицу 3.1;

–выключают центробежный насос при полностью закрытом клапане 4.

Таблица 3.1 - Таблица опытных данных

Перепад давлений по дифманометру $\Delta P \cdot 10^{-5}$, Па	Увеличение расхода			Уменьшение расхода		
	V , м ³	τ , с	$Q = V/\tau$, м ³ /с	V , м ³	τ , с	$Q = V/\tau$, м ³ /с
0						
0,2						
0,4						
0,6						
0,8						
1,0						

3.5. Обработка опытных данных

После заполнения таблицы 3.1 производится расчёт расхода воды по формуле:

$$Q = \frac{V}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Результаты вносятся в таблицу. По этим данным строится тарировочный график зависимости $Q = f(\Delta p)$ для увеличивающегося и уменьшающегося расходов (рисунок 3.10). Причём проведённая линия графика является осредняющей для полученных опытных точек.

Для режимов, указанных преподавателем, производится расчёт коэффициента расхода сужающего устройства:

$$\mu = \frac{Q}{S_0 \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}},$$

где S_0 – площадь отверстия диафрагмы, м². В установке использована диафрагма с диаметром отверстия $d_0 = 27,5$ мм.

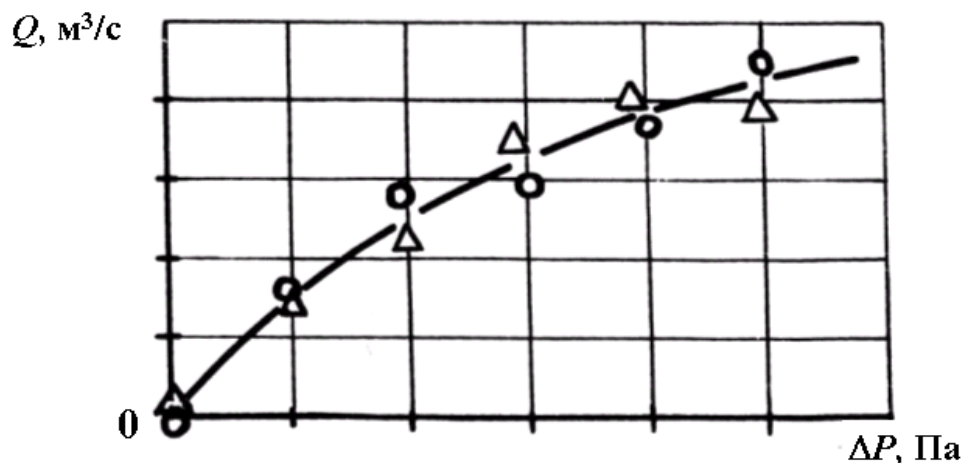


Рисунок 3.10 – Общий вид тарировочного графика

3.6. Контрольные вопросы

1. Что такое расход, каковы единицы его измерения и основные зависимости?
2. Что такое расходомер и счётчик количества?
3. С помощью каких приборов и методов может быть измерен расход?
4. Каково устройство тахометрических расходомеров?
5. Каково устройство и принцип действия расходомеров переменного и постоянного перепада давления?
6. Каковы требования к конструкции и размещению сужающих устройств?
7. В чём смысл тарировки расходомера переменного перепада давления?
8. Устройство экспериментальной установки для выполнения работы?
9. Что такое тарировочный график?

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ТЕСТИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ

4.1. Цель работы

Целью работы является тестирование преобразователя давления и определение погрешности его показаний.

4.2. Теоретический раздел

Преобразователь давления – это измерительный прибор, предназначенный для непрерывного измерения давления различных сред и последующего преобразования измеренного значения в унифицированный выходной сигнал по току или напряжению [4]. Преобразователи давления часто называют *датчиками давления*.

В зависимости от вида измеряемого давления в СЭУ преобразователи давления делятся на следующие.

1. Преобразователи избыточного давления. Данные преобразователи измеряют превышение давления, создаваемого какой-либо средой, над атмосферным давлением. Этот тип преобразователей в СЭУ применяется для:

- а) контроля давления топлива, смазочного масла и охлаждающей воды в трубопроводах и насосах;
- б) контроля давления воздуха в компрессорных установках;
- в) контроля давления в цилиндрах двигателя и котлах;
- г) контроля нагрузки по скручиванию вала.

2. Преобразователи вакуумметрического давления. Эти преобразователи измеряют уровень разрежения (вакуума) относительно атмосферного давления. Они применяются в судовых осушительных системах и опреснительных установках.

3. Преобразователи перепада давления. Они измеряют разность двух давлений, подаваемых на измерительные соединения преобразователей, и используются для измерения уровня воды в котлах.

4. Преобразователи гидростатического давления (манометрические уровнемеры). Они представляют собой разновидность преобразователей избыточного давления в том случае, когда последние применяются для измерения гидростатического уровня жидкостей (топлива, смазочного масла, пресной воды) в танках и цистернах. Преобразователь фактически измеряет уровень жидкости над ним.

На рисунке 4.1 показан вид преобразователя давления, а на рисунке 4.2 приведена общая схема его конструкции.



Рисунок 4.1 – Фотография преобразователя давления

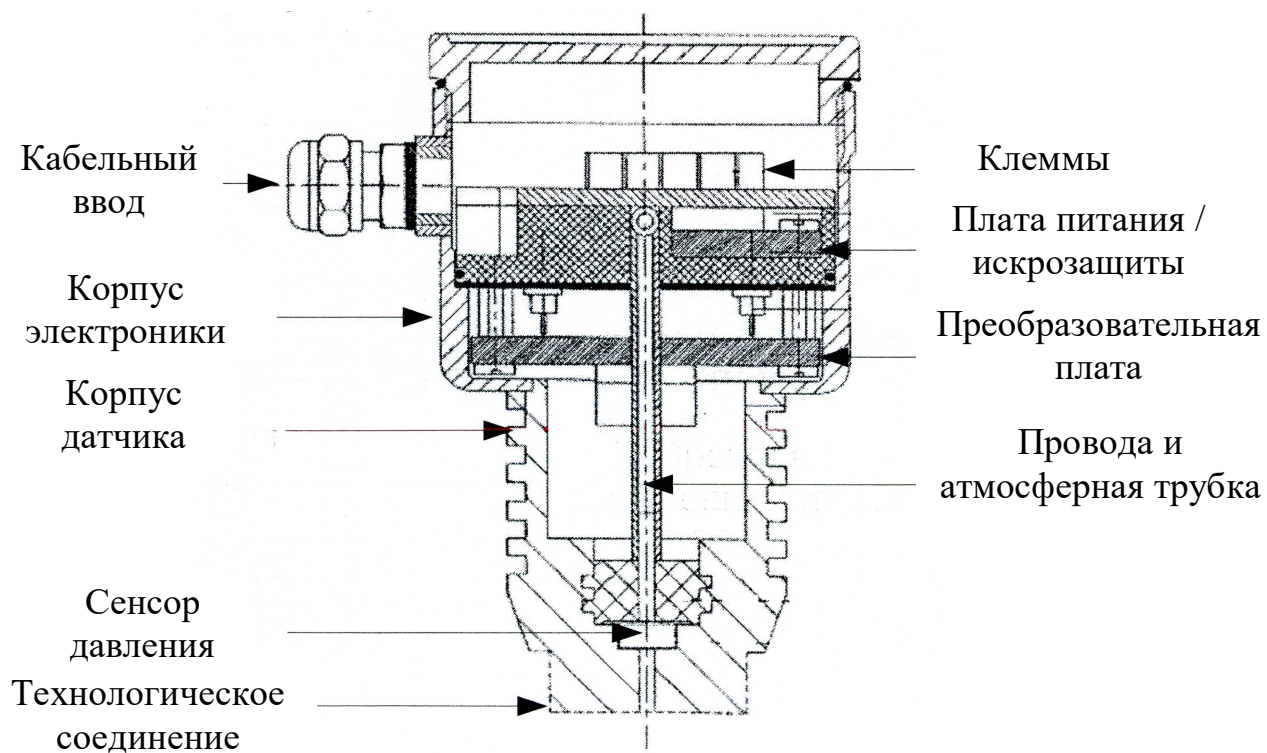


Рисунок 4.2 – Конструкция преобразователя давления

Кабельный ввод используется для герметичного ввода электрического кабеля в датчик.

Клеммы необходимы для физического подключения электрических проводов к датчику.

Плата питания / искрозащиты осуществляет распределение энергии между электронными компонентами датчика. У преобразователей во взрывоопасном исполнении на данной плате реализуется функция искрозащиты.

В *корпусе электроники* расположены плата питания и преобразовательная плата.

Преобразовательная плата осуществляет преобразование сигнала от первичного сенсора в унифицированный электрический сигнал по току или по напряжению.

Корпус датчика – основная механическая часть, представляющая собой собственно тело преобразователя.

Провода и атмосферная трубка представляют собой кабельный шлейф, соединяющий выводы сенсора и преобразовательную плату. Атмосферная трубка используется в датчиках избыточного и вакуумметрического давления для осуществления связи чувствительного элемента (сенсора давления) с атмосферным давлением.

Технологическое соединение используется для физического подключения датчика к процессу (к трубопроводу, прибору, емкости, оборудованию).

Сенсор давления (первичный преобразователь) непосредственно осуществляет преобразование действующего на него давления в электрический сигнал, который потом унифицируется на преобразовательной плате. Наибольшее распространение получили керамические и кремниевые сенсоры (рисунок 4.3).



а)

б)

Рисунок 4.3 – Сенсоры давления:

а) керамический сенсор; б) кремниевый сенсор

Различают емкостной, индуктивный, пьезоэлектрический и тензорезистивный датчики преобразования давления.

Емкостной датчик (рисунок 4.4) состоит параллельных пластин – конденсаторов, соединенных с металлической диафрагмой, которая подвергается давлению сил, участвующих в процессе, с одной стороны и опорным давлением на другой стороне. Электроды прикреплены к мембране и получают питание от генератора высокой частоты. Электроды воспринимают любое перемещение диафрагмы, что влияет на изменении емкости пластин-конденсаторов. Изменение емкости обнаруживается подсоединенной электрической цепью, которая выводит напряжение в соответствии с изменением давления. Данный тип датчика может работать в диапазоне от 2,5 Па до 70 МПа с чувствительностью 0,07 МПа.

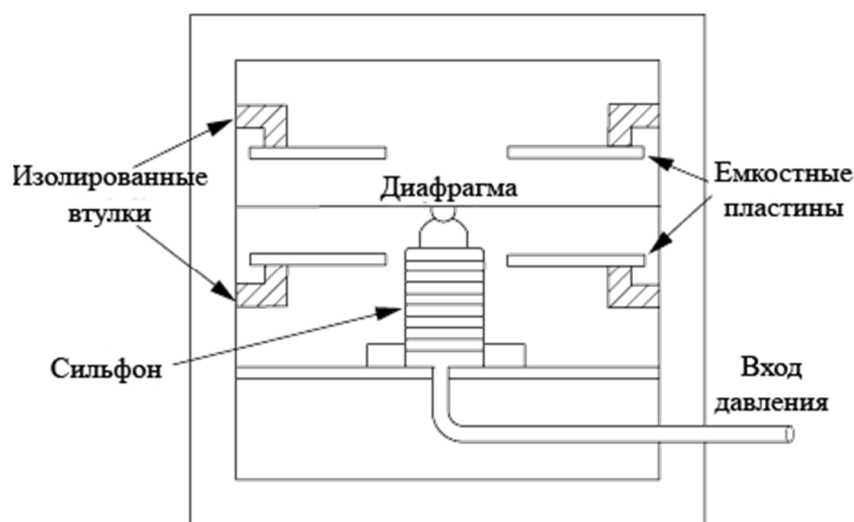


Рисунок 4.4 – Емкостной датчик давления

Индуктивный датчик давления используется в сочетании с диафрагмой или трубкой Бурдона. Ферромагнитный сердечник прикреплен к упругому элементу и имеет первичную и две вторичные обмотки. Ток подается на первичную обмотку. Когда сердечник по центру, одинаковое напряжение будет индуцироваться на двух вторичных обмотках. Когда сердечник перемещается под влиянием давления, отношение напряжения между вторичными обмотками изменится. Разность напряжений пропорциональна изменению давления.

На рисунке 4.5 показан пример индуктивного датчика с использованием диафрагмы. Для этого вида датчика давления, камера 1 принимается в качестве эталонной камеры с опорным давлением p_1 . Катушка L_1 заряжается эталонным током. Когда давление в другой камере изменяется, диафрагма движется и индуцирует ток во второй ка-

тушке L_2 , который измеряется и выражает измеренное значение тока в единицах давления.

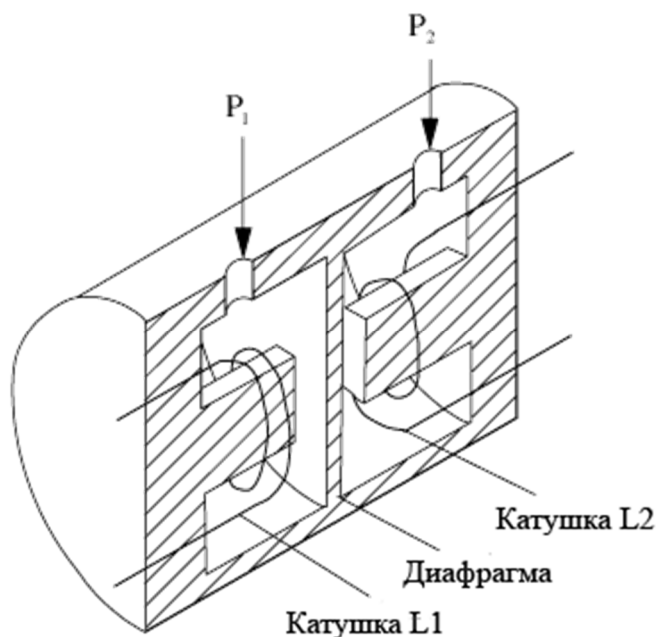


Рисунок 4.5 – Индуктивный датчик давления

Чтение значения создаваемого давления, будет определяться калибровкой напряжения. Таким образом, диапазон давления, в котором может быть использован этот датчик, определяется относительно упругого элемента, и лежит в диапазоне от 250 Па до 70 МПа.

В пьезоэлектрическом преобразователе (рисунок 4.6) используется датчик – кристалл.

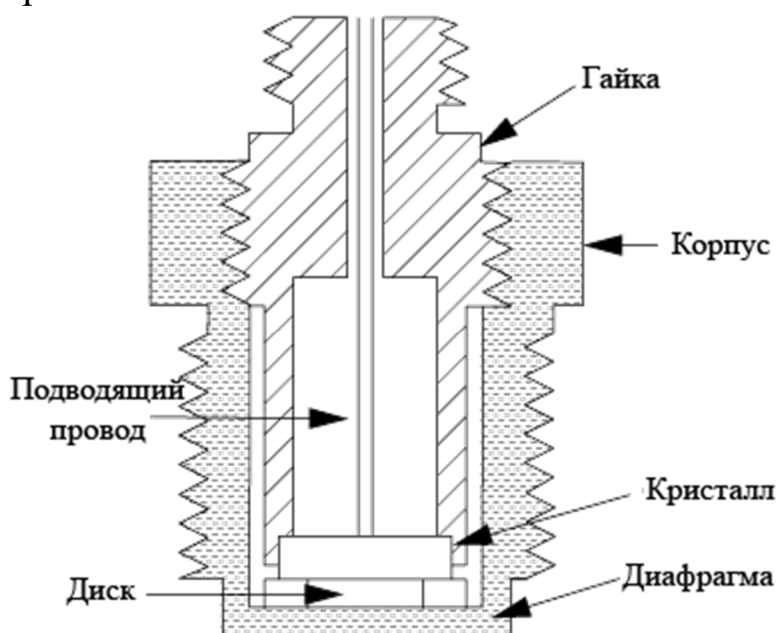


Рисунок 4.6 – Пьезоэлектрический датчик давления

Когда давление прикладывается к кристаллу, он деформируется и создается небольшой электрический заряд. Измерение электрического заряда пропорционально изменению давления.

Этот тип датчика имеет очень быстрое время отклика на постоянные изменения давления. Пьезоэлектрический элемент очень чувствителен, но реагирует гораздо быстрее. Таким образом, если время имеет существенное значение, пьезоэлектрический датчик будет приоритетным к использованию. Диапазон давления датчиков такого типа составляет $0,021 \div 100$ МПа с чувствительностью $0,1$ МПа.

Тензометрический метод основан на явлении тензоэффекта в металлах и полупроводниках. Тензорезисторы, соединенные в мостовую схему (мост Уитстона) (рисунок 4.7), под действием давления изменяют свое сопротивление, что приводит к разбалансу моста. Разбаланс прямо пропорционально зависит от степени деформации резисторов и, следовательно, от приложенного давления.

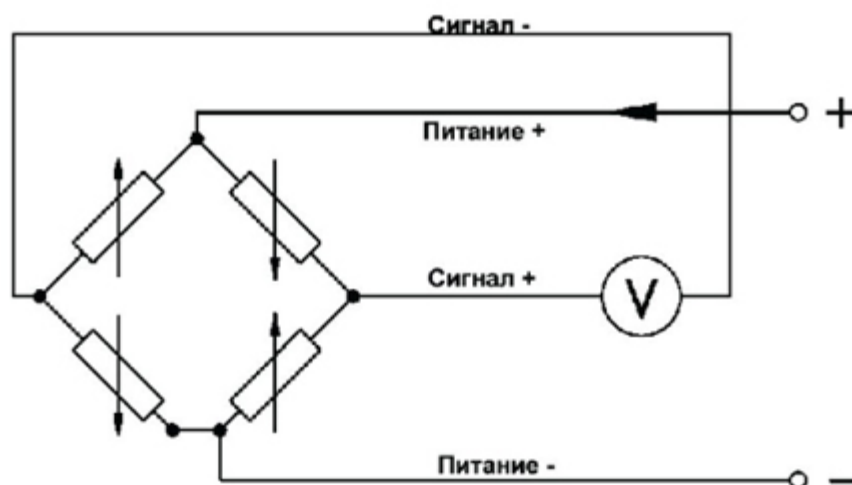


Рисунок 4.7 – Мост Уитстона

Чувствительность тензометрических датчиков значительно больше, чем чувствительность их металлических аналогов, однако с большей чувствительностью приходит более узкий функциональный диапазон: температура должна оставаться постоянной, чтобы получить действительное значение. Эти датчики сильно зависят от изменений температуры (в отличие от других типов электрических компонентов). Диапазон давления $0 \div 1400$ МПа с чувствительностью $1,4 \div 3,5$ МПа.

Для замера давления в цилиндре двигателя внутреннего сгорания применяют датчики специального исполнения, поскольку они должны работать в условиях высоких температур, высоких давлениях и ударной нагрузке. Одним из вариантов готового комплекта для кон-

троля параметров процесса внутри цилиндров ДВС является система мониторинга DEPAS (рисунок 4.8).

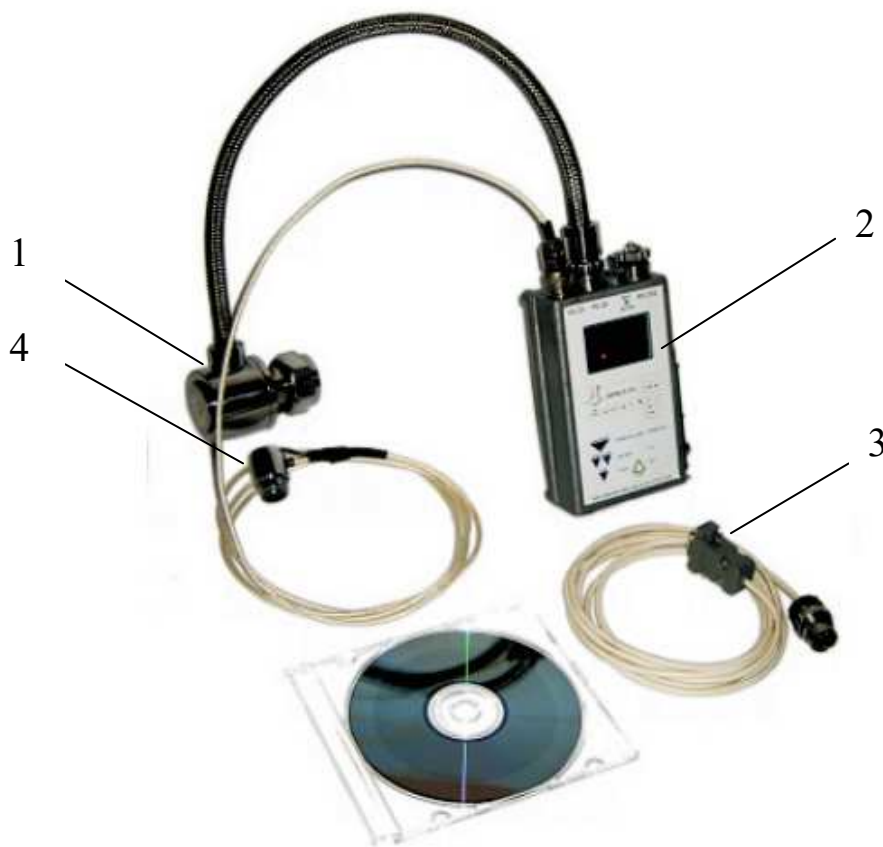


Рисунок 4.8 – Система мониторинга DEPAS:
1 – датчик давления PS-16; 2 – блок контроля DEPAS Handy unit;
3 – вибродатчик VS-20; 4 – кабель

В состав системы входят: датчик давления PS-16, присоединяемый к индикаторному крану ДВС; блок контроля DEPAS Handy unit, вибродатчик VS-20, расширяющий возможности измерительного комплекта; кабель для передачи данных по последовательному интерфейсу.

Система предназначена для использования на судовых дизелях (главных и вспомогательных). Причем автоматическое определение тактности двигателя позволяет проводить мониторинг без предварительной настройки на тип двигателя.

Система определяет следующие параметры.

1. P_z – максимальное давление сгорания в цилиндре двигателя (среднее, минимальное и максимальное значения за несколько тактов).
2. P_c – максимальное давление сжатия.
3. Частоту вращения коленчатого вала.

4. P_i и N_i – среднее индикаторное давление и индикаторную мощность цилиндра.

5. Параметры рабочего процесса, топливоподачи и газораспределения.

4.3. Описание лабораторной установки

Тестирование датчика давления с выходным электрическим сигналом по току $4 \div 20$ мА производится с помощью установки, схема которой представлена на рисунке 4.9.

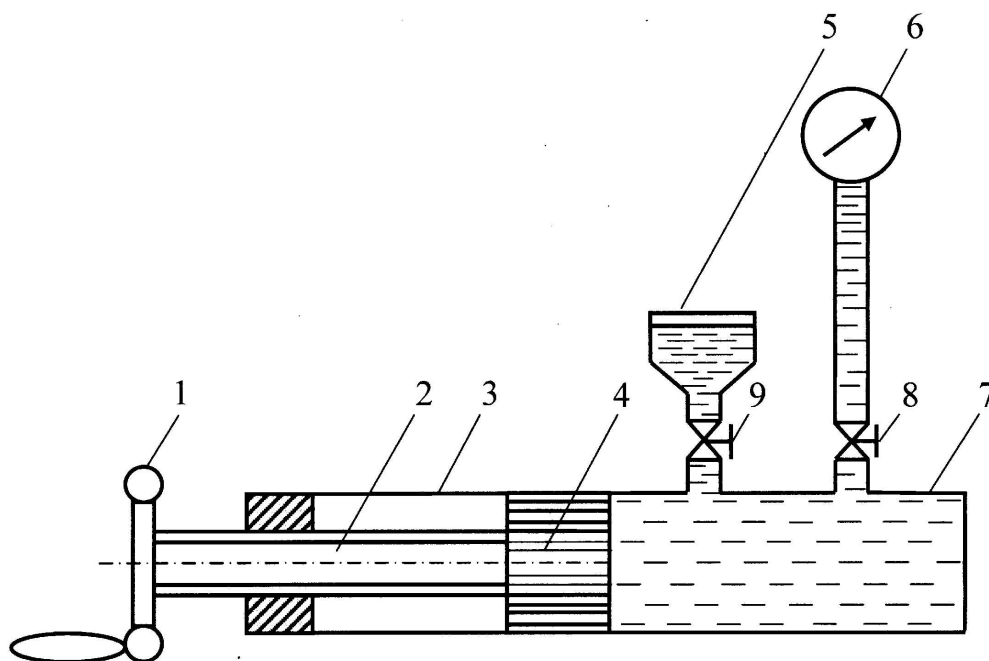


Рисунок 4.9 – Схема установки:

1 – маховик; 2 – винтовой шток; 3 – пресс; 4 – поршень; 5 – масленка; 6 – образцовый манометр; 7 – корпус системы; 8, 9 – вентили

Масло в систему 7 поступает из масленки 5. Давление в установке создается прессом 3. В прессе находится поршень 4, который с помощью винтового штока 2 перемещается при помощи маховика 1. К установке подключен образцовый манометр 6. Установка оборудована клапанами 9 и 8.

Электрическая схема подключения датчика давления к манометру 6 представлена на рисунке 4.10. В качестве приемника токового сигнала используется миллиамперметр. Датчик является двухпроводным и подключается к приемнику с помощью блока питания напряжением 24 В постоянного тока.

Параметры датчика: диапазон давлений – $0 \div 10$ бар; полная точность – 0,5%; диапазон температур – $-40 \div +110$ °С; материал корпуса – нержавеющая сталь.

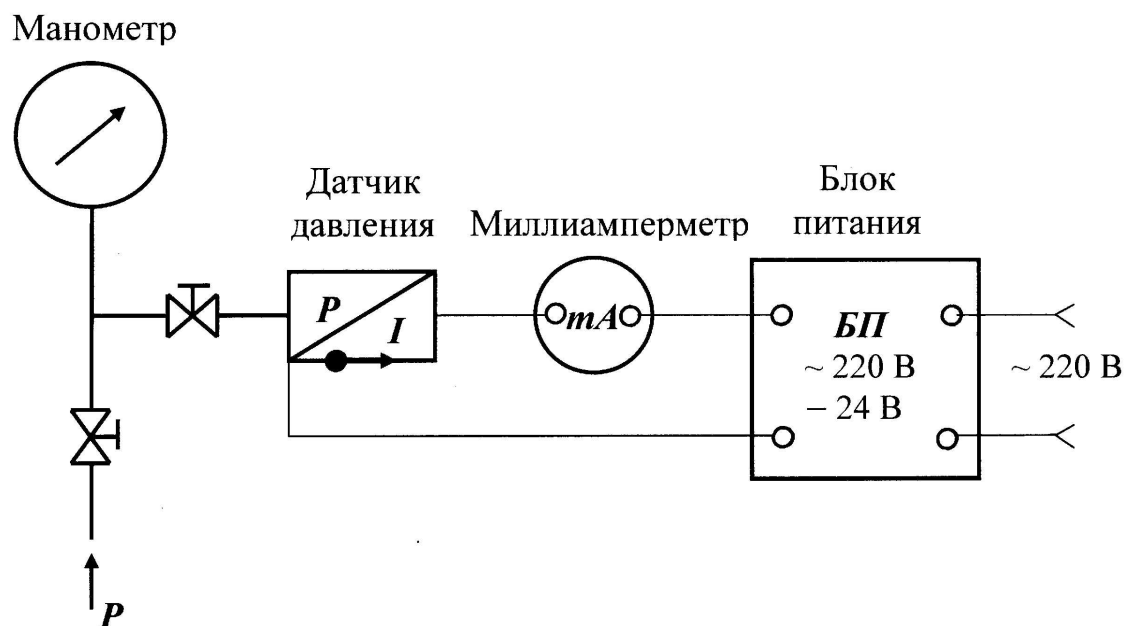


Рисунок 4.10 – Схема подключения датчика к манометру

4.4. Порядок выполнения работы

Исходное состояние установки: поршень 2 находится в крайнем правом положении, клапаны 9 и 8 закрыты.

Последовательность операций при тестировании датчика давления следующая.

1. Открыть клапан 9.
2. Вращая маховик 1 и, тем самым, перемещая поршень 4 влево, заполнить установку 7 маслом из масленки 5.
3. Закрыть клапан 9.
4. Открыть клапан 8.
5. Вращением маховика 1 поршнем 4 в полости установки создается определенное давление p , измеряемое манометром 6. Это давление преобразовывается датчиком в силу тока $I_{\text{оп}}$, измеряемую миллиамперметром.
6. Последовательно повысить давление, задавая по манометру 6 соответствующие значения p , указанные преподавателем (от 0 до 6 ат).
7. Снизить давление до нуля.
8. Закрыть клапан 8.
9. Открыть клапан 9 и, вращая маховик 1, перекачать масло в масленку 5 (поршень 4 переходит в крайнее правое положение).
10. Показания манометра p и миллиамперметра $I_{\text{оп}}$ свести в таблицу 4.1.

4.5. Обработка опытных данных

1. Расчетные значения силы тока I_p определяются, исходя из параметров датчика (диапазону давлений $0 \div 10$ бар соответствует выходной электрический сигнал по току $4 \div 20$ мА. Для этого используется интерполяционная зависимость:

$$I_p = 4 + \frac{20 - 4}{10 - 0} \cdot (p - 0),$$

где p – показание манометра, бар.

2. Сопоставить опытное $I_{оп}$ и расчетное I_p значения силы тока и определить относительную погрешность по формуле:

$$\varepsilon = \frac{I_{оп} - I_p}{I_p} \times 100\%.$$

3. Результаты обработки опытных данных свести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Опытные данные и их обработка

Давление по манометру, p , ат	Давление по манометру, p , бар*	Показания миллиамперметра, $I_{оп}$, мА	Расчетные значения, I_p , мА	Относительная погрешность, ε , %
0				
0,5				
1				
1,5				
2				
2,5				
3				
3,5				
4				
4,5				
5				
5,5				
6				
*1 ат = 0,981 бар				

Сравнить максимальную относительную погрешность ε_{max} с допустимой $\varepsilon_{доп} = 3,5\%$. Датчик давления считается пригодным к эксплуатации, если $\varepsilon_{доп}$ больше ε_{max} .

4.6. Контрольные вопросы

- 1 Для каких целей предназначен датчик давления?
- 2 На какие виды делятся датчики давления в зависимости от вида измеряемого давления?
- 3 Из каких основных элементов состоит датчик давления? Какова их функция?
- 4 Какие существуют датчики давления по способу восприятия давления?
- 5 Какой принцип работы психрометра?
- 6 С какой целью служит система DEPAS?
- 7 Каково устройство установки для тестирования датчика давления?

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА О ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТЫ

Отчет о выполнении лабораторной работы должен содержать следующие пункты:

- титульный лист (форма титульного листа представлена в Приложении Г);
- название и цель работы;
- основные формулы и формулировки;
- схему лабораторной установки;
- заполненные таблицы замеров и обработки опытных данных;
- результаты расчетов и графики (при необходимости);
- вывод.

Отчеты должны быть выполнены аккуратно, графики – на миллиметровой бумаге в соответствии с требованиями ЕСКД и правилами черчения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев В.И. Контрольно-измерительные приборы судовых энергетических установок (устройство, эксплуатация, эффективность): Справочник / В.И. Агеев. – Л: Судостроение, 1985. – 416 с.
2. ГОСТ 8.338-2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Преобразователи термоэлектрические. Методика поверки. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – М.: Издательство стандартов. – 23 с.
3. Корнилов Э.В. Приборы и аппаратура контроля автоматических систем судовых энергетических установок / Э.В. Корнилов, П.В. Бойко. – Одесса.: Изд-во Экспрессреклама, 2009. – 332 с.
4. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы / В.П. Преображенский. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.
5. Рыжков С.В. Теплотехнические измерения в судовых энергетических установках / С.В. Рыжков. – Л.: Изд-во Академия, 1980. – 264 с.
6. Справочник инженера по контрольно-измерительным приборам / А.В. Калиниченко, Н.В. Уваров, В.В. Дойников. – Москва: Изд-во Инфа-Инженерия, 2008. – 576 с.
7. Теплоэнергетика и теплотехника. Справочная серия: В 4 кн. Кн. 2. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник./ под общ. ред. чл.-кор. РАН А.В. Клименко и проф. В.М. Зорина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 564 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Таблица А1 – Градуировочные таблицы $E(t, 0)$ термоэлектрических термометров при температуре свободных концов $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Температура рабочего конца, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$	ТХК Градуировка ХК, мВ	ТХА Градуировка ХА, мВ	ТПП Градуировка ПП-1, мВ
0	0	0	0
10	0,65	0,4	0,054
20	1,31	0,8	0,112
30	1,98	1,2	0,171
40	2,66	1,61	0,234
50	3,35	2,02	0,296
60	4,05	2,43	0,364
70	4,76	2,85	0,431
80	5,48	3,26	0,500
90	6,21	3,68	0,573
100	6,95	4,10	0,643
110	7,69	4,51	0,723
120	8,43	4,92	0,792
130	9,18	5,33	0,879
140	9,93	5,73	0,947
150	10,69	6,13	1,041
160	11,46	6,53	1,106
170	12,24	6,93	1,201
180	13,03	7,33	1,269
190	13,84	7,73	1,381
200	14,66	8,13	1,436
210	15,48	8,53	1,521
220	16,30	8,93	1,606
230	17,12	9,34	1,692
240	17,95	9,74	1,779
250	18,77	10,15	1,867
260	19,60	10,56	1,955
270	20,43	10,97	2,044
280	21,25	11,38	2,133
290	22,08	11,80	2,223
300	22,91	12,21	2,314
310	23,75	12,62	2,406
320	24,60	13,04	2,498
330	25,45	13,45	2,591
340	26,31	13,87	2,684
350	27,16	14,30	2,777

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Таблица Б1 – Допустимые отклонения ($\pm$) термо-э.д.с.
стандартных термопар

Градуировка	Отклонение термо-э.д.с. от градуированных значений, мВ	
	До 300°C	Свыше 300°C
ПП-1	0,01	$0,01+2,5 \cdot 10^{-5} (t - 300)$
ПР 30/6	-	$0,01+3,3 \cdot 10^{-5} (t - 300)$
ХА	0,16	$0,16+2,0 \cdot 10^{-4} (t - 300)$
ХК	0,2	$0,20+6,0 \cdot 10^{-4} (t - 300)$
НС	0,12	0,15 (для $t > 400^\circ\text{C}$)

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

Таблица В1 – Предельные температуры применения стандартных термопар

Обозначение	Градуировка	Пределы применения, °C		
		Нижний	Верхний	
			Длительно	Кратковременно
ТПП	ПП-1	-20	1300	1600
ТПР	ПР 30/6	300	1600	1800
ТХА	ХА	-50	1000	1300
ТХК	ХК	-50	600	800
ТНС	НС	300	1000	1000

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
(обязательное)
**Форма титульного листа отчета о выполнении
лабораторной работы**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Морской институт
Кафедра "Энергоустановки морских судов и сооружений"

ОТЧЕТ

о выполнении лабораторной работы №
(название работы)

по дисциплине «Измерение параметров рабочих процессов в СЭУ и
контрольно-измерительные приборы»

Выполнил: студент группы

(шифр группы)

(Ф.И.О.)

(подпись)

Проверил: _____
(должность, Ф.И.О. преподавателя)

(подпись)

« ____ » _____ 20 ____ г.

20 ____ г.