

УДК 53.08(076)

ББК 30

Э 413

---

ФГБОУ ВО  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ МЭИ»

---

Буринский В.В., Захарова О.Д., Листратов Я.И.,  
Мирошниченко В.И., Устюжанин Е.Е.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Лабораторные работы  
для студентов, обучающихся  
по направлению 140700  
«Ядерная энергетика и теплофизика»

Методическое пособие  
по курсу  
«Экспериментальные методы исследования»

ББК 30  
Э 413

*Утверждено учебным управлением МЭИ*

Подготовлено на кафедре инженерной теплофизики

Буринский В.В., Захарова О.Д., Листратов Я.И., Мирошниченко В.И., Устюжанин Е.Е. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Лабораторные работы для студентов, обучающихся по направлению «Ядерная энергетика и теплофизика». Методическое пособие по курсу «Экспериментальные методы исследования» / Под редакцией Ю.Б.Смирнова.- М.: Издательский дом МЭИ, 2015.-36 с.

Методическое пособие содержит описания четырёх лабораторных работ, посвященных изучению:

- методов измерения расхода жидкостей;
- методов измерения температуры в стационарных условиях;
- методов измерения давления;
- методов измерения температуры в нестационарных условиях.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 140700 «Ядерная энергетика и теплофизика» Института тепловой и атомной энергетики НИУ «МЭИ».

Продолжительность одного занятия - 2 часа.

---

## Лабораторная работа № 1

### ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ЖИДКОСТИ

#### 1.1 Цель работы

Целью работы является изучение: а) методов измерения расхода жидкости, б) приобретение навыков по использованию двух типов расходомеров (расходомер с переменным перепадом давления, расходомер - ротаметр с постоянным перепадом давления).

#### 1.2 Введение

В промышленных и лабораторных условиях одной из важнейших является задача измерения расхода – количества вещества, проходящего в единицу времени через трубопровод или канал.

Массовый расход жидкости  $G$  выражается в единицах массы за единицу времени (кг/с, т/ч). Объемный расход  $V$  выражается в единицах объема за единицу времени ( $\text{м}^3/\text{с}$ , л/ч).

Известно более десятка надежных методов измерения расхода. Наиболее широко распространены следующие:

- по перепаду давления на сужающем устройстве (расходомерная диафрагма, сопло, труба Вентури);
- по высоте поднятия поплавка потоком в вертикальной конической трубке (ротаметр);
- по частоте вращения турбинки или крыльчатки, которые устанавливаются непосредственно в поток (тахометрический расходомер);
- по величине ЭДС, возникающей в проводящей жидкости при ее движении в магнитном поле (электромагнитный расходомер).

Определенным преимуществом первых двух указанных методов является возможность измерения расхода без применения электронных преобразователей. Выпускаются также модификации соответствующих типов расходомеров, обеспечивающие дистанционную передачу показаний в электронном виде.

Более подробно с методами измерения расхода и разными типами расходомеров можно ознакомиться в справочнике [1].

***Измерение расхода по перепаду давления на сужающем устройстве***

На рис. 1.1 показано сужающее устройство в виде участка трубопровода с установленной в нем расходомерной диафрагмой.

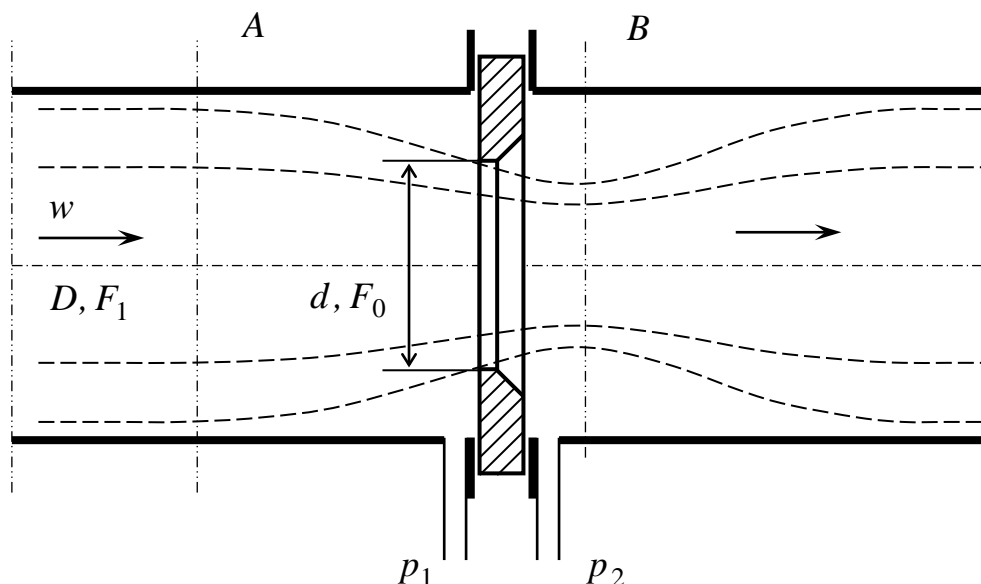


Рис. 1.1 Схема установки расходомерной диафрагмы в трубопроводе.  
1 – участок трубопровода; 2 – сужающее устройство;  
3 – трубки отбора статического давления.

Диафрагма представляет собой тонкий диск с круглым центральным отверстием, которое имеет диаметр  $d$  и площадь  $F_0$ . Трубопровод имеет внутренний диаметр  $D$  и площадь сечения  $F_1$ . До некоторого сечения A поток остается невозмущенным и движется со средней скоростью  $w$ . Сужение потока начинается перед диафрагмой и продолжается за диафрагмой до некоторого сечения B, где поток достигает максимального сужения. Далее поток постепенно расширяется до полного сечения трубопровода.

В соответствии с законом сохранения энергии, в суженном сечении скорость потока увеличивается за счет перехода части потенциальной энергии давления в кинетическую. В результате статическое давление в суженном сечении становится меньше статического давления перед сужающим устройством. Разность (перепад) статических давлений зависит от расхода жидкости.

Отбор статических давлений  $p_1$  и  $p_2$  осуществляется с помощью двух отверстий в трубопроводе, расположенных непосредственно до и после диска диафрагмы. Перепад давлений измеряется с помощью дифференциального манометра.

Штриховыми линиями на рис. 1.1 показаны линии тока основного течения. В угловых зонах между стенками трубопровода и диафрагмой возника-

ют застойные области, в которых образуются вторичные вихревые течения (их линии тока на рисунке не показаны).

Установлено [2], что для несжимаемой жидкости массовый расход связан с перепадом давления на диафрагме выражением

$$G = \alpha F_0 \sqrt{2 \rho \Delta p}, \quad (1.1)$$

где  $G$  – массовый расход жидкости, кг/с;

$\Delta p = p_1 - p_2$  – перепад давлений на диафрагме, Па;

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

$F_0 = \pi d^2/4$  – проходное сечение диафрагмы, м<sup>2</sup>;

$d$  – диаметр отверстия в диафрагме, м;

$\alpha$  – коэффициент расхода (безразмерный).

В общем виде коэффициент расхода выражается функциональной зависимостью

$$\alpha = f(\text{Re}, m), \quad (1.2)$$

где  $m = F_0/F_1$  – относительная площадь сужающего устройства;

$F_1 = \pi D^2/4$  – проходное сечение трубопровода, м<sup>2</sup>;

$D$  – диаметр трубопровода, м;

$\text{Re} = \frac{w D}{\nu}$  – число Рейнольдса;

$w$  – средняя по сечению трубопровода скорость потока, м/с;

$\nu$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с.

Если среднюю скорость потока выразить через массовый расход, то выражение для числа Рейнольдса запишется в виде

$$\text{Re} = \frac{4 G}{\pi D \mu}, \quad (1.3)$$

где  $\mu = \nu \rho$  – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·с.

Для диафрагм при фиксированном значении  $m$  коэффициент расхода с ростом числа Рейнольдса монотонно падает, стремясь к некоторому асимптотическому значению.

Существуют стандартные сужающие устройства, при изготовлении и применении которых должны соблюдаться определенные требования. Для стандартных устройств зависимости типа (1.2) известны [2], поэтому коэффициенты расхода могут быть определены расчетным путем, с заранее известной погрешностью.

Стандартные расходомерные диафрагмы могут применяться в трубопроводах диаметром  $D \geq 50$  мм. Если же диаметр трубопровода меньше 50 мм, то требуется проведение экспериментов по индивидуальной градуировке

диафрагмы с целью получения зависимости коэффициента расхода данной диафрагмы от числа Рейнольдса.

### *Измерение расхода жидкости ротаметром*

Ротаметры предназначены для измерения объемного расхода однородных потоков жидкостей и газов. Схема ротаметра показана на рис. 1.2.

Ротаметр представляет собой конусную стеклянную трубку, расположенную вертикально, внутри которой находится поплавков. Между поплавком и внутренней поверхностью конусной трубки образуется кольцевой зазор, площадь которого зависит от высоты поплавка. Поток жидкости или газа с расходом  $G$  протекает снизу вверх, создавая перепад давления на кольцевом зазоре, как на сужающем устройстве.

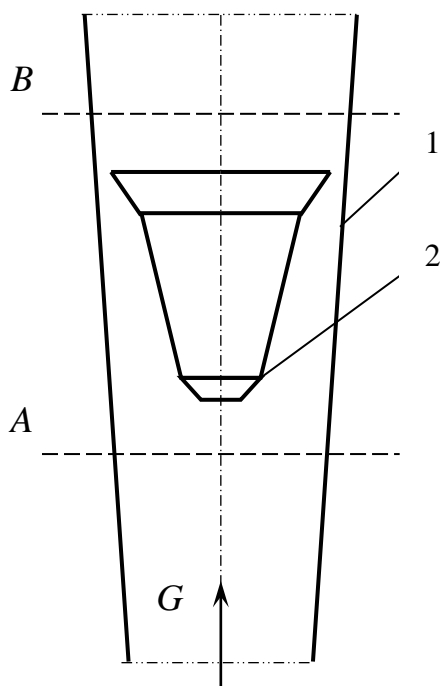


Рис. 1.2. Схема ротаметра.  
1- трубка конусная;  
2- поплавок.

На поплавок действует результирующая подъемная сила, в создании которой участвует не только перепад давлений, но также силы вязкого трения, действующие на боковую поверхность поплавка при протекании потока в кольцевом зазоре, сила гидростатического выталкивания (архимедова сила) и динамический напор набегающего потока. В состоянии равновесия результирующая подъемная сила равна силе тяжести поплавка. Вследствие этого, каждому по-

ложению поплавка соответствует определенное значение расхода. При изменении расхода поплавков стремится занять новое положение равновесия, при котором перепад давлений на кольцевом зазоре остается постоянным. Фактически можно считать, что сохраняется перепад давления между близкими к поплавку сечениями  $A$  и  $B$ .

Для снятия показаний ротаметра на стеклянной конусной трубке наносится равномерная условная шкала. В качестве указателя положения поплавка относительно шкалы служит верхняя горизонтальная плоскость самого поплавка.

На предприятиях, выпускающих ротаметры, проводится их индивидуальная градуировка. Ротаметры поставляются с паспортом, в котором имеется таблица градуировки, связывающая условную шкалу с конкретными значениями расхода.

Жидкостные ротаметры градуируются по воде, и в паспорте приводится температура, при которой проводилась градуировка, а также плотность и вязкость воды при этой температуре. В случае использования других жидкостей таблица градуировки пересчитывается по известной методике с учетом изменения плотности и вязкости жидкости.

### 1.3 Описание лабораторного гидростенда

На рис. 1.3 приведена схема лабораторного гидростенда, предназначенного для испытаний расходомерных устройств. В состав гидростенда входят два ротаметра и одно сужающее устройство - расходомерная диафрагма. Ротаметры - однотипные, но имеют разные пределы измерений. Вода поступает из напорной магистрали через входной вентиль и фильтр.

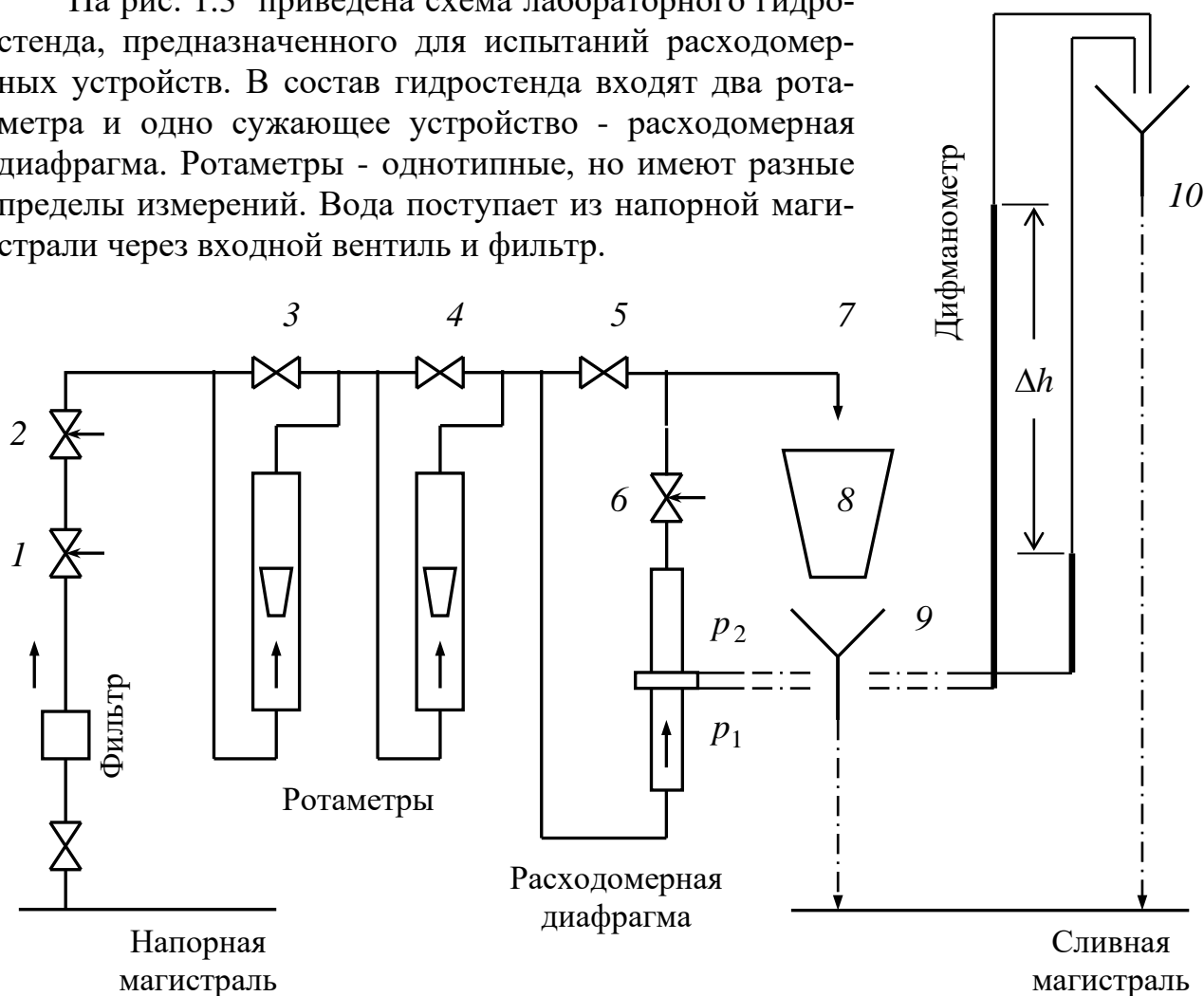


Рис. 1.3. Схема лабораторного гидростенда.

1 – основной регулировочный вентиль; 2 – вентиль-ограничитель; 3,4,5 – запорные вентили расходомеров; 6 – вентиль-регулятор; 7 – ниппель; 8 – мерная кружка; 9,10 – сливные воронки.

Необходимый расход устанавливается основным регулировочным вентилем 1. Вспомогательный вентиль 2 служит для ограничения максимального расхода. Для включения или выключения рабочего режима расходомеров служат запорные вентили 3, 4 и 5. Если какой-либо из этих вентилях полностью закрыт, то весь поток воды направляется в обход него через соответ-

ствующий расходомер – обеспечивается рабочий режим измерений. Если наоборот, какой-либо из этих вентилях открыт, то он шунтирует свой расходомер, при этом почти весь поток проходит через вентиль, минуя расходомер – последний считается выключенным.

Далее весь поток сливается через ниппель 7 в мерную кружку 8 или просто в сливную воронку 9. Мерная кружка используется, если требуется измерить массовый расход воды весовым способом.

Для измерения перепада давления на диафрагме служит дифференциальный манометр (дифманометр). Нижние концы трубок дифманометра подключены к отборам статических давлений  $p_1$  и  $p_2$ . Верхние концы трубок дифманометра открыты, сообщаются с атмосферой и расположены над воронкой 10, которая в случае перелива направляет воду в сливную магистраль. Разность уровней воды  $\Delta h$  в трубках дифманометра измеряется по линейке, проложенной между трубками.

На выходе из расходомерной диафрагмы установлен регулирующий вентиль 6, с помощью которого можно изменять средний уровень водяных столбов в дифманометре. Кроме того, если в рабочем режиме этот вентиль закрыть, то весь поток воды направится через отборы давлений по трубкам дифманометра на перелив, унося с собой загрязнения и пузырьки воздуха.

Ниже приводятся основные параметры расходомерной диафрагмы и ротаметров, установленных на гидростенде.

### ***Расходомерная диафрагма.***

Диаметр отверстия в диафрагме,  $d = 4,4$  мм.

Диаметр трубопровода,  $D = 7,9$  мм.

### ***Ротаметры.***

На лабораторном гидростенде установлены жидкостные ротаметры типов РМ–4–0,16 ЖУЗ и РМ–4–0,25 ЖУЗ с номинальными пределами измерений объемного расхода 0,16 и 0,25 м<sup>3</sup>/ч соответственно.

В табл. 1.1 приводятся индивидуальные заводские градуировки ротаметров, выполненные при температуре воды 18 °С.

Т а б л и ц а 1.1  
*Заводские градуировки ротаметров*

Отметка шкалы		0	20	40	60	80	100
Расход, л/ч	РМ–4–0,16 ЖУЗ	20	46	76	107	140	171



	PM-4-0,25 ЖУЗ	41	80	121	161	209	259
--	---------------	----	----	-----	-----	-----	-----

Допускаемая основная погрешность ротаметров составляет  $\pm 2,5\%$  от номинальных пределов измерений.

Дополнительная погрешность не превышает половины основной допускаемой погрешности на каждые  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  изменения температуры воды.

### 1.4 Проведение работы

В лабораторной работе необходимо выполнить градуировку расходомерной диафрагмы и одного из ротаметров (по указанию преподавателя).

Расход воды определяется весовым способом. Для этого используются мерная кружка, лабораторные весы и секундомер.

В установившемся рабочем режиме измерения пустая мерная кружка подставляется под струю слива из ниппеля с одновременной фиксацией по секундомеру начального момента времени. После заполнения водой кружка убирается из-под струи с одновременной фиксацией конечного момента времени. Масса собранной воды определяется как разность масс полной и пустой кружки.

Массовый расход рассчитывается по формуле  $G = \Delta M / \Delta \tau$ ,  
 где  $\Delta M$  – масса собранной воды, кг;  
 $\Delta \tau$  – интервал времени заполнения кружки, с.

#### *Градуировка расходомерной диафрагмы.*

Для расходомерной диафрагмы градуировка заключается в нахождении коэффициента расхода и его зависимости от числа Рейнольдса.

Оценка погрешности для коэффициента расхода позволит установить, является ли зависимость от числа Рейнольдса значимой в выбранном диапазоне изменения расхода.

В опытах градуировочные значения расхода устанавливаются по разности уровней воды  $\Delta h$  в трубках стеклянного дифманометра. Минимальное значение  $\Delta h$  должно быть не менее 100 мм, а максимальное ограничивается только размахом шкалы дифманометра. В этом диапазоне требуется получить не менее пяти опытных точек с разными значениями расхода.

Перепад давления на диафрагме рассчитывается по формуле

$$\Delta p = (\rho - \rho_{\text{возд}}) g \Delta h, \quad (1.4)$$

где  $\Delta p$  – перепад давления, Па;

$\Delta h = h_1 - h_2$  – разность уровней воды в трубках дифманометра, м;

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

$\rho$ ,  $\rho_{\text{возд}}$  – плотности воды и воздуха в дифманометре, кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент расхода и его зависимость от числа Рейнольдса определяются на основе формул (1.1) – (1.4).

Во всех формулах, кроме (1.4), теплофизические свойства воды соответствуют температуре потока в расходомерах. При расчете перепада давления по формуле (1.4) значения плотности воды и воздуха определяются при температуре окружающей среды.

Температура воды, протекающей в расходомерах и температура окружающей среды измеряются в конце работы.

Данные по градуировке сужающего устройства заносятся в табл. 1.2.

Т а б л и ц а 1.2  
Данные по градуировке диафрагмы

№ опыта	$\Delta M$ , кг	$\Delta \tau$ , с	$h_1$ , мм	$h_2$ , мм	$\Delta p$ , Па	$\alpha$	Re
1							
2							
...							

### **Градуировка ротаметра.**

Для ротаметра градуировка заключается в построении таблицы расхода по фиксированным отметкам шкалы при той температуре воды, которая установилась в период проведения работы.

Сравнение с заводской градуировкой (выполненной при температуре 18 °С) позволит определить соответствие прибора своему классу точности по основной и дополнительной погрешностям измерений.

В опытах градуировочные значения расхода устанавливаются по тем же отметкам шкалы ротаметра, что приняты для заводской градуировки (см. табл. 1.1). Данные по градуировке ротаметра заносятся в табл. 1.3.

Т а б л и ц а 1.3  
Данные по градуировке ротаметра

Отметка шкалы	0	20	40	60	80	100
$\Delta M$ , кг						
$\Delta \tau$ , с						
Объемный расход						

$V$ , л/ч						
-----------	--	--	--	--	--	--

Объемный расход рассчитывается по формуле  $V = G / \rho$ .

Заметим, что для сравнения с заводской градуировкой объемный расход в табл. 1.3 необходимо пересчитать в л/ч.

### 1.5 Содержание отчета

- Краткое описание схем и принципов работы расходомерной диафрагмы и ротаметра.
- Протокол опытных данных и результаты их обработки.
- Для диафрагмы следует привести таблицу градуировки и график зависимости коэффициента расхода от числа Рейнольдса. Оценить погрешность измерения коэффициента расхода.
- Для ротаметра следует привести таблицу градуировки. Оценить погрешность в сравнении с заводской градуировкой. Определить соответствие прибора своему классу точности по основной и дополнительной погрешностям измерений.
- Для ротаметра на основе таблицы градуировки необходимо построить график зависимости расхода от значений отметок условной шкалы. Оценить погрешность при аппроксимации графика линейной зависимостью.

### 1.6 Контрольные вопросы

- Каков принцип измерения расхода жидкости с помощью сужающего устройства?
  - Что такое стандартное сужающее устройство?
  - Каков принцип работы ротаметра?
  - В чем заключается весовой способ измерения расхода жидкости?
-

## Лабораторная работа № 2

### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОРЕЗИСТОРА И ГРАДУИРОВКА ТЕРМОПАРЫ

#### 2.1 Цель работы

Целью работы является изучение: а) методов измерения температуры в стационарных условиях, б) градуировка термопары с помощью терморезистора (платинового термометра сопротивления), в) поверка цифрового термометра и поверка стеклянного ртутного термометра.

#### 2.2 Введение

Измерение температуры объектов является важной практической задачей. Температура – это физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы. Прямое измерение температуры невозможно, поэтому все существующие методы определения температуры являются косвенными и основаны на использовании зависимости между температурой и другой физической величиной, определяемой непосредственно (объем, давление, ЭДС, сопротивление, характеристика теплового излучение и др.) [1]. В работе изучаются методы измерения температуры с помощью терморезистора и термоэлектрического преобразователя (термопары).

Принцип измерения температуры с помощью терморезистора основан на зависимости электрического сопротивления проводника  $R$  от температуры  $T$ , которую можно представить следующим образом:

$$R = R_0 (1 + \alpha(T - T_0) + \dots) , \quad (2.1)$$

где  $R_0$  - сопротивление проводника при температуре  $T_0$ , выбранной за начало отсчета,  $\alpha$  – температурный коэффициент электрического сопротивления. Для проведения измерений температуры  $T$  вещества терморезистор приводят в состояние теплового равновесия с веществом, измеряют сопротивление резистора  $R$  и рассчитывают температуру вещества по известному градуировочному уравнению  $T(R)$ .

Принцип действия термопары основан на термоэлектрических явлениях, которые приводят к возникновению термо-ЭДС в цепи, состоящей из двух разнородных проводников  $A$  и  $B$  в случае, если температуры мест соединения (спаев) проводников отличаются (эффект Зеебека). Для измерения температуры одно из мест соединения разнородных проводников (горячий спай) помещают в измеряемую среду, а место соединения с измерительной цепью

(холодные спаи) помещают в среду с заранее известной и стабильной температурой (например, в сосуд Дьюара с тающим льдом). В этом случае термо-ЭДС  $E$ , возникающая в цепи зависит только от разности температур между спаями и от материала проводников:

$$E = \alpha_{AB} \Delta T, \quad (2.2)$$

где  $\alpha_{AB}$  – коэффициент Зеебека для пары проводников  $A$  и  $B$ ;  $\Delta T = T - T_0$ , где  $T$  – температура горячего спая,  $T_0$  – температура холодного спая (для тающего льда  $T_0 = 273,15 \text{ K}$ ).

При известной температуре холодных спаев  $T_0$  термо-ЭДС термопары является однозначной функцией температуры вещества  $E(T) = f(T)$ , называемой «градуировочной характеристикой». Она выбирается в форме полинома:

$$E(T) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + \dots, \quad (2.3)$$

где  $a_0, a_1, a_2, \dots$  – коэффициенты, определяемые также с помощью статистической обработки результатов градуировочных опытов.

Температуру  $T$  среды при известном значении термо-ЭДС определяют по зависимости  $T(E)$ , которая может быть получена из 2.2. На практике для расчета температуры используется «градуировочное уравнение» в форме полинома:

$$T(E) = b_0 + b_1 E + b_2 E^2 + \dots, \quad (2.4)$$

Входящие в него коэффициенты ( $b_0, b_1, b_2, \dots$ ) находятся с помощью статистической обработки результатов градуировочных опытов.

В данной лабораторной работе необходимо осуществить градуировку термопары и выполнить поверку цифрового и ртутного термометров.

Во время опытов терморезистор, термопара, цифровой и ртутный термометры приводятся в состояние теплового равновесия со средой, находящейся в термостате при неизменной температуре. В заданном стационарном режиме измеряют электрическое сопротивление терморезистора и термо-ЭДС  $E$  термопары, показания цифрового  $T_{цифр}$  и ртутного  $T_{рт}$  термометров.

Электрическое сопротивление терморезистора находят с помощью измерений падения напряжения  $U_T$  на нем и падения напряжения  $U_K$  на образцовой катушке, сопротивление  $R_K$  которой известно:

$$R_T = R_K U_T / U_K, \quad (2.5)$$

Градуировка термопары предусматривает серию измерений ( $E_i, U_{ti}, U_{ki}$ ) в нескольких стационарных  $i$  - режимах. По первичным данным на основании градуировочного уравнения терморезистора  $T(R)$  вычисляют значения температуры среды ( $T_i$ ), а затем находят градуировочную характеристику  $E(T)$  и градуировочное уравнение  $T(E)$  термопары.

В процессе поверки цифрового термометра для каждого стационарного режима вычисляют поправку к его показаниям по формуле:

$$\Delta_{цифр} = T - T_{цифр} , \quad (2.6)$$

где  $T$  – температура среды, рассчитанная по показаниям терморезистора.

Значения  $\Delta_{цифр}$  сравнивают с паспортными данными цифрового термометра. Аналогично находят поправки для ртутного термометра.

Градуировка термопары и поверка термометров проводятся на экспериментальной установке.

### 2.3 Описание экспериментальной установки

В экспериментальную установку (рис. 2.1) входит жидкостной термостат 7, в который погружены терморезистор 5, горячий спай термопары 8, чувствительный элемент цифрового термометра 6 и ртутный термометр 12. Холодные спаи термопары 9 размещены в сосуде Дьюара с тающим льдом.

Терморезистор - платиновый термометр сопротивления ПТС-10, включен последовательно с образцовым сопротивлением 2 и магазином сопротивлений 4, марки МСР-63, в цепь источника напряжения 3. В качестве образцового сопротивления используется катушка Р-321 номиналом 10,0000 Ом.

С помощью магазина сопротивлений в измерительной цепи устанавливается электрический ток такой величины, чтобы чувствительный элемент терморезистора не нагревался этим током. Для термометра сопротивления ПТС-10 этот ток не должен превышать 10 мА.

Измерение падений напряжения на терморезисторе и образцовом сопротивлении, а также термо-ЭДС термопары осуществляется цифровым вольтметром В7-78/1. Подключение датчиков к вольтметру производится с помощью термопарного переключателя 11.

На рис.2.2 показана конструкция терморезистора - платинового термометра сопротивления ПТС-10. На кварцевом каркасе 1, имеющем форму геликоида, размещена спираль 2 из платиновой проволоки. Диаметр платиновой проволоки равен 0,05 мм. Диаметр спирали- 0,5 мм.

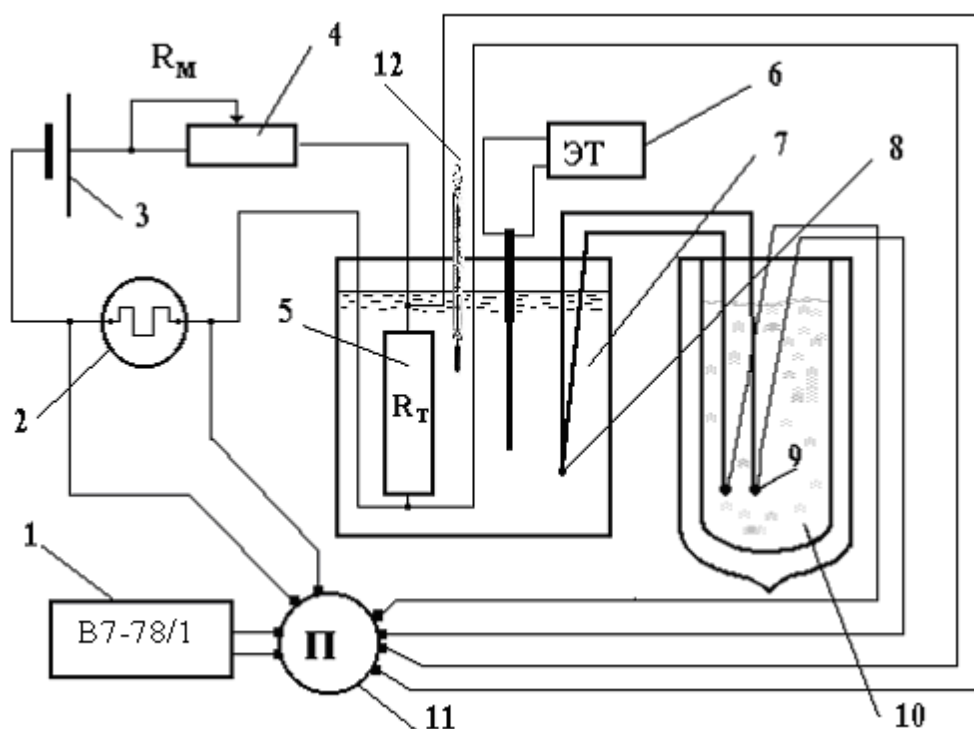


Рис.2.1. Схема экспериментальной установки  
 1-цифровой вольтметр В7-78/1; 2-образцовое сопротивление Р-321;  
 3-источник питания; 4-магазин сопротивлений МСР-63;  
 5-терморезистор (ПТС-10); 6-электронный термометр; 7-термостат;  
 8-рабочий спай термопары; 9-холодные спаи термопары; 10-сосуд Дьюара с  
 тающим льдом; 11-переключатель термопарный; 12 – ртутный термометр

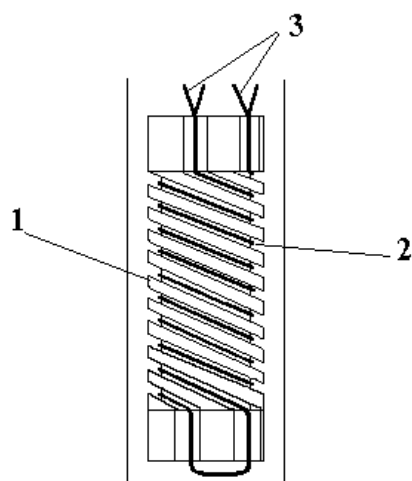


Рис. 2.2. Схема платинового термометра сопротивления  
 1-кварцевый каркас; 2-платиновая спираль; 3-выводящие проводники.

Каркас со спиралью образуют чувствительный элемент термометра сопротивления диаметром 3 – 4 мм и длиной 50 мм. В верхней части каркаса закреплены приваренные к спирали две пары выводящих проводников 3 из платиновой проволоки диаметром 0,3 мм. Чувствительный элемент помещен в герметичный чехол, который изготовлен из плавленого кварца и заполнен газообразным гелием.

## 2.4 Проведение работы

В работе необходимо провести градуировку термопары и поверку цифрового и ртутного термометров с помощью платинового термометра сопротивления ПТС-10.

При подготовке к работе необходимо приготовить лёд для холодных спаев термопары и загрузить его в сосуд Дьюара. Далее включить установку: источник питания в цепи термометра сопротивления, измерительный милливольтметр, цифровой термометр.

Установить с помощью магазина сопротивлений требуемое значение электрического тока в цепи терморезистора (не более 10 мА). Включить термостат и вывести его на заданный режим. Для этого с помощью электроконтактного термометра термостата установить заданное значение температуры и включить нагреватель термостата. При достижении стационарного температурного режима провести измерения падения напряжения на терморезисторе, на образцовой катушке сопротивления, ЭДС термопары, а также температуры с помощью цифрового и ртутного термометров. Результаты измерений занести в протокол (табл.2.1).

Т а б л и ц а 2.1  
Протокол измерений

№ опыта	$\tau$ , ч, мин	$U_T$ , мВ	$U_k$ , мВ	$E$ , мВ	$T_{\text{цифр}}$ , °С	$T_{\text{рт}}$ , °С
1						
2						
...						

Количество стационарных режимов, а также число измерений в каждом режиме согласовать с преподавателем.

На основании экспериментальных данных по формуле 2.5 рассчитать значения сопротивлений терморезистора  $R_T$ . Температуры  $T$  в стационарных состояниях рассчитать, используя градуировочное уравнение для образцового платинового термометра сопротивления (ПТС-10):



$$T = t' + 0.015 \left[ \frac{t'}{100} \left( \frac{t'}{100} - 1 \right) \right] \left[ \left( \frac{t'}{419.58} - 1 \right) \left( \frac{t'}{630.74} - 1 \right) \right], \quad (2.7)$$

где  $t'$ , °C.- вспомогательный параметр («платиновая» температура).

Величина  $t'$  находится из решения уравнения

$$t' = \frac{1}{\alpha} (w - 1) + \delta \frac{t'}{100} \left( \frac{t'}{100} - 1 \right), \quad (2.8)$$

Здесь  $w = R_T / R_0$ ,  $R_T$  - сопротивление ПТС-10 при измеряемой температуре;  $R_0 = 10,0923$  Ом – сопротивление ПТС-10 при температуре 0 °C;  $\alpha = 3,9141 \cdot 10^{-3}$ ,  $\delta = 1,49187$  – эмпирические коэффициенты уравнения, характеризующие данный термометр сопротивления; 100, 419,58, 630,74 – температуры (°C): кипения воды, затвердевания цинка и затвердевания сурьмы соответственно (эти значения получены при давлении, равном одной физической атмосфере).

## 2.5 Содержание отчета

- Краткое описание схемы и принципов работы термопары и терморезистора (ПТС-10).
- Протокол опытных данных и результаты их обработки.
- Для термопары построить градуировочную характеристику  $E(T)$  и градуировочное уравнение  $T(E)$ , используя опытные данные, выражения 2.3 и 2.4 и метод наименьших квадратов. Сравнить градуировочную характеристику  $E(T)$  с соответствующей стандартной градуировкой термопары, приведенной в [2] и определить поправку для стандартной термопары по соотношению

$$\Delta_{\text{станд}} = T - T_{\text{станд}}, \quad (2.9)$$

где  $T$  - температура, измеренная терморезистором в стационарном режиме,  $T_{\text{станд.}}$  - соответствующее табулированное значение температуры для стандартной термопары.

- Провести оценку случайной и систематической погрешностей определения сопротивления ПТС-10 ( $R_T$ ), термо-ЭДС термопары ( $E$ ).
- Оценить косвенным методом приборную погрешность температуры, измеренной терморезистором.
- Определить погрешность градуировки термопары.

- Построить график  $\Delta_{\text{станд}}(T)$ , а также графики локальных отклонений  $\Delta T_i(T)$  и  $\Delta E_i(T)$ , используя соотношения

$$\Delta T_i = T_i - T_{\text{средн}} , \quad (2.10)$$

$$\Delta E_i = E_i - E_{\text{средн}} , \quad (2.11)$$

## 2.6 Контрольные вопросы

- Как рассчитать случайную погрешность измерения термоЭДС?
  - Как рассчитать случайную погрешность измерения сопротивления терморезистора?
  - Какие приборы входят в измерительную схему терморезистора?
-

### **Лабораторная работа № 3**

## **ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПОРШНЕВОГО И ПРУЖИННОГО МАНОМЕТРОВ**

### **3.1 Цель работы**

Целью работы является изучение: а) метода измерения давления с помощью поршневого манометра, б) метода измерения давления с помощью пружинного манометра, в) метода измерения давления с помощью цифрового манометра МИДА. Студенты знакомятся с конструкцией указанных манометров, выполняют проверку пружинного и цифрового манометров, обрабатывают полученные данные и делают заключение о метрологических характеристиках указанных измерительных приборов.

### **3.2 Введение**

При постановке физических экспериментов и в технологических задачах проблема определения давления является актуальной. В работе изучаются два способа измерения давления в жидкой и газовой средах: с помощью грузопоршневого и пружинного манометров. Манометры установлены на стенде и заполнены маслом. Давление масла можно менять в широких пределах. Одновременное измерение давления двумя манометрами позволяет проводить поверку пружинного манометра. Результатом поверки являются определение погрешности поверяемого манометра и установление степени соответствия его показаний паспортным данным.

### **3.3 Описание стенда и манометров**

На рис. 3.1. показана схема стенда, на котором размещены манометры. Их соединяет система коммуникаций. Коммуникации и манометры заполнены маслом, давление которого  $P$  измеряется в эксперименте.

Насос и гидравлический пресс предназначены для создания давления в системе. В процессе поверки в качестве образцового используется поршневой манометр 8 (тип МП-600). В качестве поверяемого – пружинный манометр 6 (тип 1226) и цифровой манометр МИДА.

Ручной насос 3 служит для заполнения системы трубопроводов поршневого манометра маслом из емкости 1 и для создания предварительного давления масла в коммуникациях.

Вентили и шариковый клапан 2 предназначены для разъединения и соединения масляных коммуникаций. Вентиль 4 отключает насос от остальной

части стенда. Вентиль *13* служит для снижения давления в манометре и сброса масла в бак *1*.

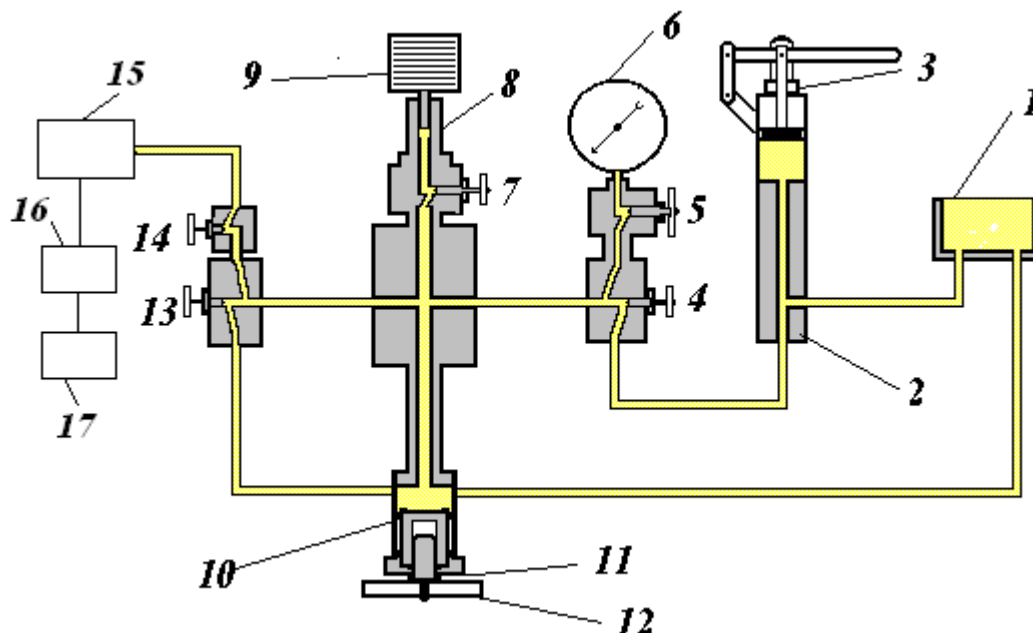


Рис. 3.1. Схема установки.

*1* – масляная емкость; *2* – шариковый клапан; *3* – ручной насос; *4* – запорный вентиль насоса; *5* – запорный вентиль манометра; *6* – пружинный манометр; *7* – запорный вентиль измерительной колонки; *8* – измерительная колонка; *9* – грузы; *10* – цилиндр пресса; *11* – винт пресса; *12* – маховик пресса; *13* – вентиль, соединяющий поршневой манометр с атмосферой; *14* – вентиль, отключающий поршневой манометр от установки; *15* – цифровой манометр МИДА; *16* – блок преобразования; *17* – вольтметр В7-78/1

Вентиль *5* отключает пружинный манометр *6* от поршневого манометра. Необходимое давление в опыте создается винтовым гидравлическим прессом, содержащим узлы *10*, *11* и *12*.

Вентиль *14* подключает к стенду цифровой манометр МИДА *15* и функционально связанные с ним: а) блок преобразования *16* и цифровой вольтметр В7-78/1, отмеченный как *17*.

Манометр МП-600 класса точности 0,05, предназначен для измерения избыточного давления, поверки и градуировки пружинных, образцовых и других манометров, имеющих допустимую погрешность 0,1% и более. Верхний предел измерения давлений – 600 кгс/см<sup>2</sup>, нижний предел измерения - 10 кгс/см<sup>2</sup>. Допустимая погрешность измерения давления манометром МП-600 составляет 0,05% от действительного значения измеряемого давления. Значение рабочей площади поршня составляет  $F_0 = 0,05 \text{ см}^2$ . Конструкция порш-

невого манометра изображена на рис. 3.1. Поршень расположен внутри измерительной колонки 8. Снизу поршень находится в контакте с маслом, сверху на поршне располагаются грузоприемное устройство и грузы - цилиндрические диски 9. Каждый диск снабжен надписью, которая указывает давление, создаваемое этим диском, например,  $P_d = 10 \text{ кгс/см}^2$ .

Метод измерения давления с помощью поршневого манометра состоит в том, что оператор создает контакт между манометром и исследуемым веществом, варьирует массу грузов на грузоприемном устройстве, меняя число дисков и устанавливая равновесное положение поршня, при этом величина давления считывается с грузов – дисков и вычисляется по расчетному уравнению (3.1).

В процессе измерения давления поршень должен находиться во вращательном движении для устранения возможных перекосов и снижения силы трения. Для достижения полного равновесия наряду с грузами – дисками могут использоваться грузы в виде гирь.

Связь между массой грузов, рабочей площадью поршня  $F$  и измеряемым избыточным давлением  $P_{изм}$  выражается соотношением:

$$P_{изм} = P_{зр} + \frac{m_{Г} g_{М}}{F} \left( 1 - \frac{\rho_{В}}{\rho_{ГР}} \right), \quad (3.1)$$

где  $P_{изм}$  – измеряемое давление масла;  $P_{зр}$  – давление, которое создается грузами - дисками, установленными на измерительной колонке, и грузоприемным устройством, кгс/см<sup>2</sup>;  $m_{Г}$  - масса разновесов;  $F$  – рабочая площадь поршня;  $\rho_{В}$  - плотность воздуха при комнатных условиях;  $\rho_{ГР}$  – плотность материала грузов,  $g_{М}$  - местное ускорение свободного падения.

Множитель  $\left( 1 - \frac{\rho_{В}}{\rho_{ГР}} \right)$  учитывает влияние Архимедовой силы на грузы - разновесы, расположенные на грузоприемном устройстве.

Значение давления  $P_d$ , создаваемое диском, задано для следующего условия: ускорение свободного падения  $g_0$  равно нормальному ускорению свободного падения, то есть  $g_0 = 9,80665 \text{ м/с}^2$ . В связи с этим для местного ускорения свободного падения  $g_m$ , которое зависит от географической широты, следует вводить поправку  $\Delta P_g$  в результаты измерения в виде

$$\Delta P_g = P_{зр} ((g_{М} / g_0) - 1), \quad (3.2)$$

где  $g_m = 9,8156 \text{ м/с}^2$  - ускорение для широты Москвы,  $P_{зр} = \sum P_{di}$  - давление, которое создается грузами, имеющими номиналы ( $P_{di}$ ).

При отклонении температуры окружающего воздуха от 20 °С необходимо учитывать термическое расширение поршня в виде зависимости

$$F = F_0(1 + 2\alpha(T - 273.15)), \quad (3.3)$$

где  $F_0$  – площадь поршня при температуре 20 °С,  $T$  – температура окружающего воздуха, К;  $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6}$ , 1/К – коэффициент линейного расширения материала поршня. Соответствующая поправка к давлению вычисляется по формуле

$$\Delta P_T = P_{изм} 2\alpha(T - 273.15), \quad (3.2)$$

Пружинный манометр 6 (см. рис. 3.1) предназначен для измерения давления в диапазоне от 0 до 250 кг/см<sup>2</sup>, имеет равномерную шкалу 0...400 делений и допустимую погрешность 0.15 %, которая вычисляется от верхнего предела шкалы.

Метод измерения давления с помощью пружинного манометра [1] состоит в том, что оператор соединяет манометр с системой и регистрирует положение стрелки манометра в делениях шкалы. Измеренное давление  $P$ , кгс/см<sup>2</sup>, рассчитывают, используя число делений и цену деления  $C$ , (кгс/см<sup>2</sup>)/дел, шкалы манометра.

### 3.4 Проведение работы

В работе необходимо провести поверку пружинного манометра и цифрового манометра МИДА с помощью грузопоршневого манометра МП-600.

При подготовке к работе необходимо ознакомиться с конструкцией поршневого и пружинного манометров, изучить ручной насос и гидравлический пресс. Затем необходимо установить заданное давление масла и измерить его. Для этого: закрыть вентили 7, 13 и открыть вентили 4, 5, 14 (рис. 3.1.). Ручным насосом предварительно поднять давление масла до 5 ... 10 кгс/см<sup>2</sup>, при этом вести наблюдение за показанием пружинного манометра и манометра МИДА. Установить грузы на измерительную колонку поршневого манометра в соответствии с заданием. Поднять давление масла в системе поршневого манометра до заданного уровня с помощью гидравлического пресса, контролируя его значение по пружинному манометру. Открыть вентиль 7 и вывести поршень в рабочее положение. Сделать отсчет давления по пружинному манометру и по манометру МИДА. Определить давление (кгс/см<sup>2</sup>) масла в заданных состояниях с помощью поршневого манометра, в том числе избыточное  $P_{изм}$  и абсолютное  $P_{абс}$  давления. Занести результаты измерений в протокол (табл. 3.1). Рассчитать давление (кгс/см<sup>2</sup>) масла в заданных состояниях с помощью пружинного манометра и манометра МИДА.

Т а б л и ц а 3.1  
Данные по поверке манометров

№ опыта	$P_{пр}$ , дел.	$P_{мида}$ , В	$P_{гр}$ , кгс/см <sup>2</sup>	$m_i$ , кг	$t$ , °С	$P_{изм}$ , кгс/см <sup>2</sup>	$B$ , мм рт. ст.	$P_{абс}$ , кгс/см <sup>2</sup>
1								
2								
...								

Перейти на следующий уровень давления в масляной системе. Выполнить пошаговое измерение давления при подъеме и снижении давления (7-10 шагов).

В лабораторной работе измеряются следующие величины:  $P_{пруж}$  - давление, измеряемое пружинным манометром;  $P_{мида}$  - давление, измеряемое манометром МИДА;  $P_{гр}$  - давление, создаваемое грузами,  $m_i$  - масса разновесов;  $t$  - температура воздуха в лаборатории;  $P_{изм}$  - значение избыточного давления, измеренного поршневым манометром;  $B$  - барометрическое давление (определяется по барометру);  $P_{абс}$  - абсолютное давление.

### 3.5 Содержание отчета

- Краткое описание схемы и принципа стенда.
- Протокол опытных данных и результаты их обработки.
- Для грузопоршневого манометра МП-600 следует оценить случайную и систематическую погрешности измерения давления, учитывая следующие метрологические данные: допустимая погрешность рабочей площади поршня  $F_0$  составляет  $\pm 0,05 \%$ , погрешность разновесов приведена в паспорте (учесть поправки, связанные с изменением температуры и давления).
- Для пружинного манометра и манометра МИДА необходимо определить поправку к их показаниям. Определить случайную и систематическую погрешности при измерениях давления пружинным манометром и манометром МИДА. Построить график отклонений показаний пружинного манометра и манометра МИДА и найти эмпирическую зависимость для поправок.

### 3.6 Контрольные вопросы

- Как рассчитать случайную погрешность измерения, которое проведено с помощью: а) пружинного манометра, б) манометра МИДА?
- Как рассчитать систематическую погрешность поршневого манометра?
- Какие устройства и элементы входят в стенд для поверки манометров?

## Лабораторная работа № 4

### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ

#### 4.1 Цель работы

Целью настоящей работы является изучение метода измерения температуры вещества с помощью термопары, когда условия эксперимента существенно отличаются от стационарных.

#### 4.2 Введение

Во многих научно-технических задачах возникает необходимость измерения температуры среды в условиях, когда отсутствует тепловое равновесие между термодатчиком и веществом. Например, требуется контролировать температуру в потоке теплоносителя, температура которого меняется во времени в форме пульсаций (турбулентный режим течения).

Для измерений температуры в таких случаях часто используются датчики, чувствительным элементом которых является термопара [2]. На рис.4.1 показана схема термопары.

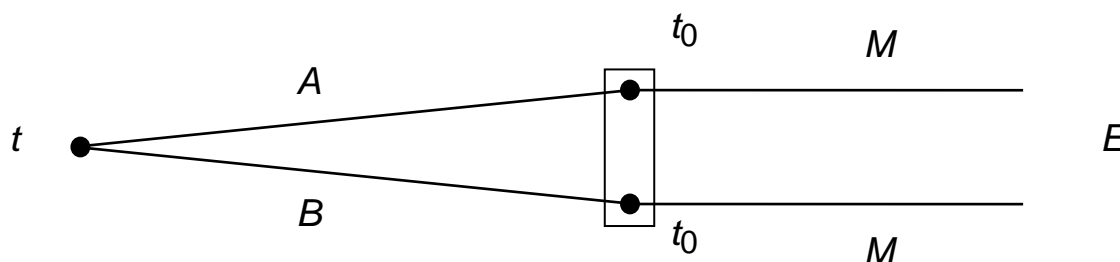


Рис.4.1. Схема термопары

Разнородные термопарные провода A и B соединяют на одном конце, при этом образуется рабочий спай термопары, который находится при температуре  $t$ . Рабочий спай называют также «горячим» спаем. Чтобы подключить термопару к измерительному средству необходимо другие концы термоэлектродов A и B соединить с медными проводами M. При этом образуются спаи, которые должны находиться при одинаковой температуре  $t_0$ , например  $0^{\circ}\text{C}$ . Эти спаи называют «холодными».

При такой схеме на медных проводниках появляется разность потенциалов  $E$ , величина которой однозначно связана с разностью температур горячего и холодного спаев (эффект Зеебека):



$$E = \alpha_{AB} \Delta t, \quad (4.1)$$

где:  $E$  – термо-ЭДС,  $\alpha_{AB}$  – коэффициент Зеебека,  $\Delta t = t - t_0$  – разность температур горячего и холодного спаев.

Для измерения температуры в потоке жидкости используются термопарные зонды. В данной работе горячий спай термопары размещается на носике зонда (рис. 4.2); он имеет вид шарика, приваренного к дну металлической защитной оболочки.

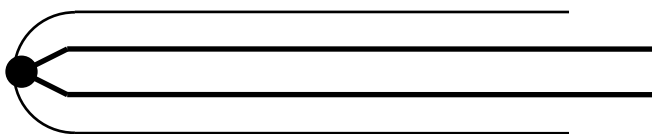


Рис.4.2. Схема зонда

Температура спая, которая измеряется термопарой, отличается от температуры жидкости  $t_{ж}$  в точке, где выполняется измерение. Основными источниками погрешности термопарных измерений являются:

- а) отток тепла от спая по проводам и по материалу оболочки;
- б) тепловая инерция спая из-за его конечной теплоемкости.

В данной работе исследуется погрешность измерений, обусловленная тепловой инерцией, поскольку она оказывается существенной при измерениях в нестационарных условиях.

Рассмотрим следующий пример. Пусть требуется измерить пульсирующую температуру в некоторой точке среды. Среда может представлять собой, например, поток жидкости или газа с температурными неоднородностями. Если в этом случае применяется термопара с большой тепловой инерционностью, то будет получена сглаженная картина теплового процесса во времени, на которой не будет видно пиков и высокочастотных составляющих процесса.

На рис.4.3 показано, как в этом случае отличается показание термопары  $t$  от истинной температуры среды  $t_{ист}$  в окрестности спая. Если инерционность применяемой термопары окажется слишком большой, то удастся измерить только среднее значение температуры  $t_{ср}$ .

В общем случае тепловая инерционность термопары зависит не только от размеров спая и теплоемкости материала (спая, оболочки и т.д.), но и от коэффициента теплоотдачи и скорости обтекания термопары жидкостью.

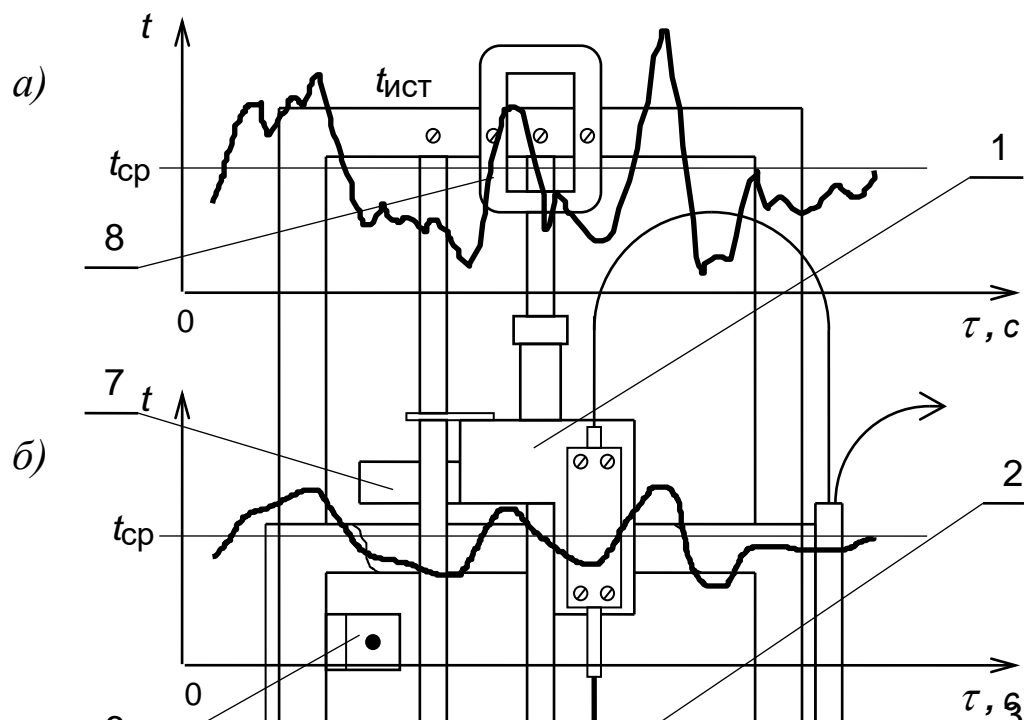


Рис.4.3. Случайные температурные пульсации в среде (а) и сглаженный отклик термопары (б)

Эффекты инерционности термопары изучаются в данной работе при ступенчатом изменении температуры окружающей среды. До некоторого момента времени  $\tau_0$  термопара находится в воздухе и имеет начальную температуру  $t_B$ , затем в момент времени  $\tau_0$  термопара погружается в нагретую жидкость с температурой  $t_{ж}$ . В итоге регистрируемая температура горячего спая  $t$  асимптотически стремится к значению  $t_{ж}$ .

Задачи настоящей лабораторной работы:

- получение зависимости регистрируемой температуры спая  $t$  от времени при ступенчатом изменении температуры среды;
- оценка времени  $\Delta\tau$ , после которого регистрируемую температуру спая можно с заданной точностью считать совпадающей с температурой среды  $t_{ж}$ .

### 4.3 Описание экспериментальной установки

На рис.4.4 показана экспериментальная установка для исследования тепловой инерционности термопары при ступенчатом изменении температуры среды.

Рис.4.4 Экспериментальная установка.

1 – подвижная каретка; 2 - термопара; 3 – термостат; 4 – сосуд для холодных спаев; 5 – направляющие каретки; 6 – датчик оптопары;  
7 – шторка; 8 – фиксатор.

Для измерения температуры среды используется термопара 2, которая закреплена на подвижной каретке 1. Каретка с термопарой может перемещаться по направляющим 5. Фиксатор 8 служит для удержания каретки в верхнем положении.

При выполнении опытов каретка вначале находится в верхнем положении, при этом термопара находится в воздухе, имея температуру  $t_{\text{в}}$ .

После нажатия фиксатора каретка падает вдоль направляющих, в результате термопара с некоторой скоростью погружается в нагретую до температуры  $t_{ж}$  воду в термостате 3.

Холодные спаи термопары помещены в сосуд 4 и находятся при температуре окружающего воздуха. Благодаря этому сигнал от термопары в начальном ее положении, когда она находится в воздухе, близок к нулю. После погружения термопары в жидкость сигнал плавно возрастает до уровня, соответствующего температуре жидкости.

Момент времени  $\tau_0$ , когда термопара начинает погружаться в жидкость, фиксируется с помощью датчика 6 и шторки 7. нажатия фиксатора каретка падает вдоль направляющих

Датчик представляет собой оптическую пару (оптопару), состоящую из светодиода, излучающего инфракрасный луч, и приемного фотодиода, причем луч света в оптопаре перекрывается шторкой 7 во время движения каретки. При перекрытии луча происходит скачкообразное изменение напряжения на выходе датчика.

Высота расположения датчика оптопары выбрана такой, чтобы момент перекрытия луча совпадал с началом погружения термопары в рабочую жидкость. Поэтому при выполнении опытов момент времени  $\tau_0$  определяется по скачку сигнала от датчика оптопары.

Поскольку тепловая инерционность термопары при измерениях в движущейся среде зависит от скорости обтекания, то при выполнении опытов необходимо контролировать скорость движения термопары в жидкости.

Определение средней скорости движения термопары осуществляется расчетом по известной ширине шторки и по интервалу времени, в течение которого луч датчика оптопары перекрыт шторкой. При выполнении опытов моменты времени закрытия и открытия луча шторкой определяются по скачкам сигнала от датчика оптопары.

Ширина шторки составляет 15 мм.

На рис.4.5 показана схема соединений исследуемой термопары и датчика оптопары с измерительной аппаратурой.

Сигнал от термопары 1 через сосуд с холодным спаем 3 поступает на вход усилителя 4. Регулируемый коэффициент усиления позволяет при проведении опытов получить размах сигнала на выходе усилителя до 5 В.

Напряжение на датчик оптопары 7 поступает от блока питания 6 (постоянное напряжение 9 В). При перекрытии луча оптопары шторкой 2 выходной сигнал датчика меняется скачком от 1 до 8 В.

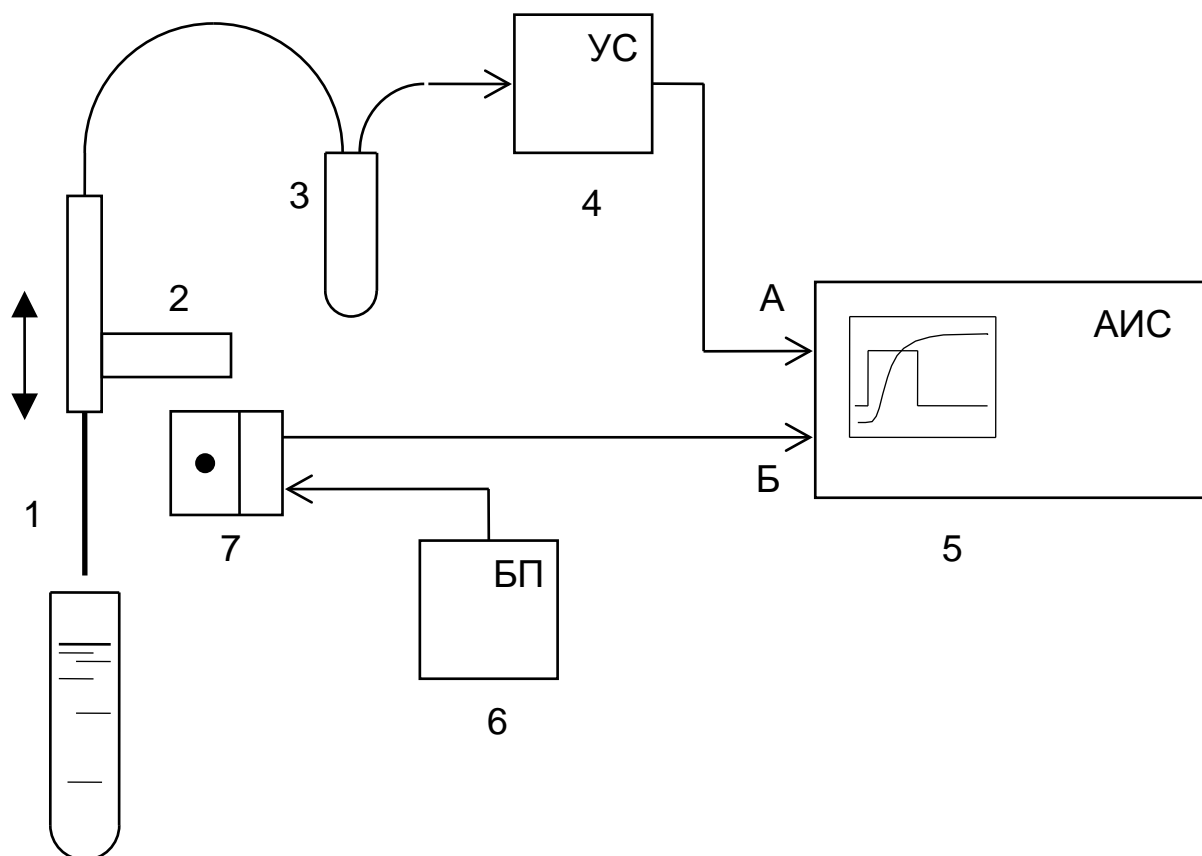


Рис.4.5. Структурная схема измерений.

1 – термопара; 2 – шторка; 3 – сосуд для холодных спаев; 4 – усилитель;  
5 – автоматизированная измерительная система; 6 – блок питания.

Автоматизированная измерительная система (АИС) 5 выполнена на базе магистрально-модульной архитектуры PXI и содержит контроллер под управлением ОС Windows и двухканальный запоминающий программируемый осциллограф. Осциллограф АИС записывает в память сигналы, поступающие с экспериментальной установки. Сигнал от усилителя поступает на канал А, сигнал от датчика оптопары – на канал Б осциллографа.

Осциллограф преобразует входные сигналы аналого–цифровым способом с некоторым шагом дискретизации по времени, помещает результаты в память, позволяет просматривать их на экране, а также считывать их «вручную» (с помощью специального маркера).

Запуск осциллографа осуществляется от сигнала, который генерирует датчик оптопары в момент перекрытия луча шторкой.

#### 4.4 Проведение работы

На первом этапе работы следует выполнить ряд действий.

1. Подготовить термостат, залив в него воду, нагретую до температуры 50–60 °С. Уровень воды должен быть таким, чтобы при опускании каретки шторка перекрывала луч оптопары одновременно с касанием термопарой поверхности воды.

2. Убедиться, что установка соединена с электронной аппаратурой согласно структурной схеме, приведенной на рис. 5. Включить приборы – усилитель, АИС и блок питания оптопары.

3. Настроить аппаратуру и рабочий режим на установке согласно Инструкции. Меняя коэффициент усиления, установить размах сигнала на выходе усилителя до 4–5 В.

4. Задать начало запоминания сигналов с опережением, чтобы сохранить в памяти некоторый отрезок предыстории процесса. Добиться устойчивого запуска осциллографа по переднему фронту сигнала от датчика оптопары.

Метода измерения температуры вещества с помощью термопары, когда условия эксперимента являются нестационарными, содержит ряд действий.

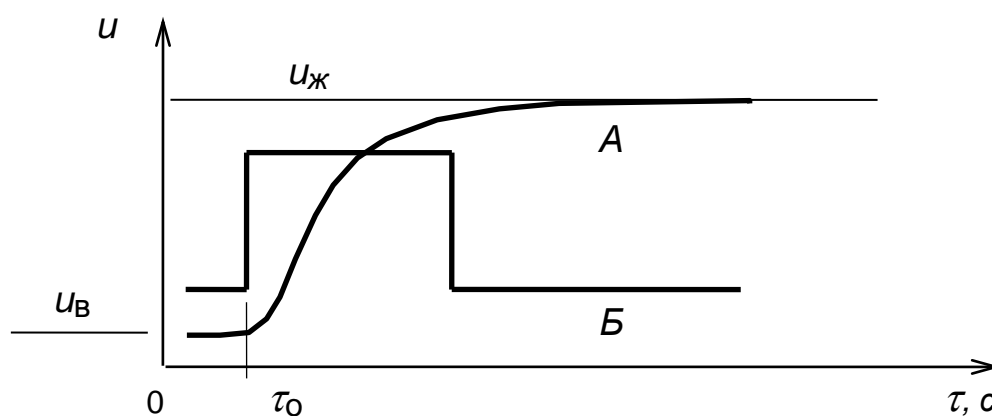


Рис. 4.6. Форма сигналов на экране осциллографа.

1. Измерение температур окружающего воздуха с помощью термометра,

2. Запуск осциллографа; в итоге на экране появляются два графика, соответствующие каналам A и B (см. рис. 4.6),

3. Момент времени  $\tau_0$  отвечает таким действиям метода, как:

а) нажатие фиксатора и движение каретки вдоль направляющих,

б) начало движения термопары в жидкости, которое фиксируется с помощью датчика б и шторки 7.

Заключительные действия, предусмотренные указанным методом, представляют собой измерения, которые делаются термопарой в виде  $(t, \tau)$  данных на интервале от  $\tau_0$  до  $\tau_1$  (рис. 4.7).

Статистическая обработка первичных данных  $(t, \tau)$ , полученных при реализации рассматриваемого метода (см. ниже), позволяет рассчитать значение функции  $t(\tau)$ , включая  $t = t_{\text{ж}}$ , Доверительный интервал,  $\Delta$  (4.7), погрешности данной термопары, а также ее тепловую инерционность  $\Delta t$  (4.8)

Момент  $\tau_0$  совпадает со скачком сигнала по каналу  $B$ .

Слева от  $\tau_0$  график идет практически горизонтально, причем сигнал  $u_B$  соответствует температуре окружающего воздуха. Справа от  $\tau_0$  наблюдается быстрый рост сигнала.

Настройка интервала дискретизации по горизонтальной оси (параметр время/точка) должна быть такой, чтобы по каналу  $A$  на экране осциллографа находился график переходного процесса с выходом на асимптотическое значение, соответствующее температуре воды. По каналу  $B$  данные должны содержать весь скачок напряжения от датчика оптопары.

Считывание данных с экрана осциллографа выполняется с помощью маркера, который можно перемещать по графикам  $A$  и  $B$ . При этом в нижней части экрана слева выдается координата  $X$  графика (время), а справа – координата  $Y$  графика (величина сигнала).

Для определения времени перекрытия луча шторкой с графика  $B$  необходимо снять две точки по координате  $X$ , соответствующие скачкам напряжения с датчика оптопары.

С графика  $A$  необходимо последовательно снять координаты следующих точек:

- а) точку на участке предыстории процесса, непосредственно перед моментом начала погружения термопары в жидкость, по которой можно оценить значение  $u_B$ , соответствующее температуре воздуха;
- б) пять точек на экспоненциальном участке переходного процесса;
- в) точку на асимптотическом участке процесса, по которой можно оценить значение  $u_{\text{жс}}$ , соответствующее температуре жидкости.

Провести 3 опыта при одинаковых условиях, воспроизводя скорость входа термопары в жидкость и поддерживая температуру жидкости постоянной. Во всех опытах данные с графиков  $A$  снимать в одни и те же моменты времени.

Подходящие моменты времени выбрать при съеме данных в первом опыте и зафиксировать их в протоколе. Во втором и третьем опытах перемещать маркер по графику  $A$  к зафиксированным значениям времени.

В результате для каждого зафиксированного момента времени получится статистическая выборка из трех значений, измеренных в разных опытах. По этой выборке необходимо рассчитать средние значения и среднеквадратические отклонения (СКО) для каждого из выбранных моментов времени.

Протокол опытных данных с графиков  $A$  и результаты расчетов оформить в виде таблицы 4.1:

Таблица 4.1

*Данные по инерционности термопары*

Время	Данные опытов			Сигнал		Температура	
$\tau, \text{с}$	1 $u, \text{В}$	2 $u, \text{В}$	3 $u, \text{В}$	Средние $u, \text{В}$	СКО $\sigma_u, \text{В}$	Средние $t, ^\circ\text{C}$	СКО $\sigma_t, ^\circ\text{C}$

В графе «Время» проставить моменты времени, зафиксированные в первом опыте.

В графе «Данные опытов» поместить первичные данные с графиков  $A$ , в графе «Сигнал» – оценки средних значений и СКО для данных опытов, в графе «Температура» – результат преобразования средних значений и СКО для сигнала из напряжений в температуры.

Поскольку разность температур горячего и холодного спаев невелика, то характеристику преобразования для термопары в этом диапазоне можно считать линейной:

$$E = \alpha \Delta t, \quad (4.2)$$

где  $\alpha$  – среднее значение коэффициента Зеебека.

После усиления на осциллограф поступает сигнал

$$\Delta u = K_{yc} E = K_{yc} \alpha \Delta t. \quad (4.3)$$

Поскольку отсчет показаний термопары производится относительно температуры холодных спаев, равной температуре окружающего воздуха, то (7.3) можно записать в виде

$$(u - u_B) = K_{yc} \alpha (t - t_B), \quad (4.4)$$



откуда получаем формулу для преобразования средних значений

$$t = t_B + \frac{(u - u_B)}{K_{yc} \alpha} \quad (4.5)$$

и формулу для преобразования СКО

$$\sigma_t = \frac{\sigma_u}{K_{yc} \alpha} . \quad (4.6)$$

где  $\sigma_u$  – СКО для  $u - u_B$  .

Коэффициент усиления  $K_{yc}$  подбирается с помощью переключателя на усилителе. В таблице 4.2 указаны значения коэффициентов усиления в зависимости от положения переключателя.

Таблица 4.2

*Данные по коэффициентам усиления*

Положение переключателя, мкВ/дел	10	20	50	100
Коэффициент усиления $K_{yc}$	10000	5000	2000	1000

Коэффициент Зеебека  $\alpha$  зависит от типа термопары. Коэффициенты Зеебека для наиболее распространенных типов термопар указаны в таблице 4.3.

Таблица 4.3

*Значения коэффициента Зеебека для различных типов термопар*

Тип термопары	$\alpha$ , мкВ/К
Хромель-копель (Х-К)	62
Хромель-алюмель (Х-А)	40
Медь-константан (М-К)	37

Конкретный тип термопары, применяемой в опытах, указывает преподаватель.

Отклик термопары на ступенчатое изменение температуры среды изобразить в виде графика переходного процесса на основе таблицы данных.

Кривая переходного процесса при выходе на асимптоту должна быть близкой к экспоненте. В общем случае провести гладкий график по точкам расчетных значений средних температур практически невозможно, так как средние значения имеют случайный разброс. Однако график требуемого

вида можно провести в пределах доверительных интервалов погрешности для средних величин.

Доверительный интервал погрешности для средних значений при объеме выборки  $N < 30$  рассчитывается по формуле:

$$\pm \Delta = \pm k_{p,N} \frac{\sigma t}{\sqrt{N}}. \quad (4.7)$$

Коэффициент  $k_{p,N}$  для распределения Стьюдента зависит от выбранной доверительной вероятности  $p$  и от объема выборки  $N$ . В таблице 4.4 приводятся значения коэффициента при двух значениях  $p$  для фиксированного  $N=3$

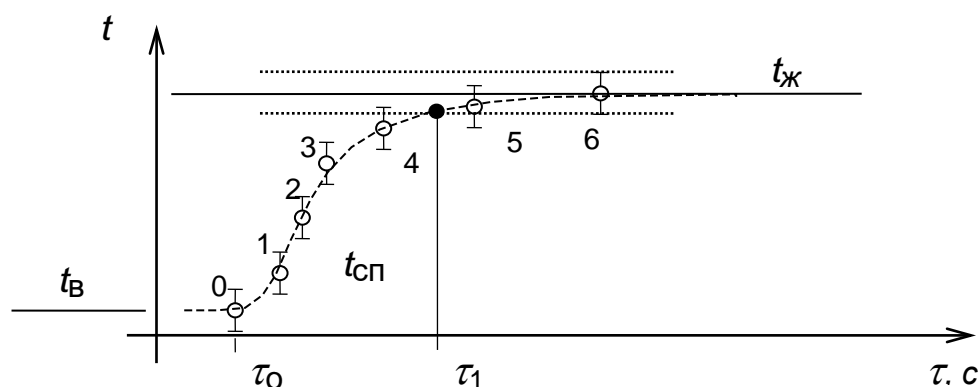


Рис. 4.7. Экспериментальный график переходного процесса

Построить точечный график по средним значениям  $t$ , затем возле каждой точки очертить границы доверительного интервала. Точки на графике пронумеровать. Через точку 0 провести линию уровня  $t_{\text{в}}$ , через точку 6 провести линию уровня  $t_{\text{жс}}$  (см. рис. 4.7).

Таблица 4.4

*Данные по коэффициентам Стьюдента*

$p$	0,9	0,95
$k_{p,N}$	2,9	4,3

Штриховой линией в пределах доверительных интервалов точек провести кривую отклика термопары.

Дополнительно вокруг линии  $t_{\text{жс}}$  очертить пунктиром коридор случайной составляющей погрешности по ширине доверительного интервала для точки 6.

В момент времени  $\tau_0$  начинается переходный процесс, в момент  $\tau_1$  кривая переходного процесса пересекает границу коридора случайной составляющей погрешности.

Доверительный интервал погрешности Тепловую инерционность термомпары определить по графику переходного процесса как отрезок времени

$$\Delta\tau = \tau_1 - \tau_0 . \quad (4.8)$$

#### 4.5 Содержание отчета

- Краткое описание структурной схемы установки и порядка проведения эксперимента.
- Протокол опытных данных и результаты расчета в виде таблицы.
- На основе первичных данных необходимо определить температуру жидкости (с поправкой на температуру окружающего воздуха).
- Расчет контрольного значения скорости движения термомпары в жидкости.
- Расчет ширины доверительных интервалов случайной погрешности для двух значений вероятности  $p = 0,9$  и  $p = 0,95$ .
- Графики переходного процесса с коридорами погрешности измерения температуры и оценками времени инерционности термомпары.
- Результаты расчета погрешности измерения температуры жидкости. Для расчета воспользоваться данными из таблицы 4.5, в которой указаны значения систематических аппаратурных погрешностей.

Таблица 4.5

*Данные по систематическим погрешностям аппаратуры*

Относительные аппаратурные погрешности	%
Коэффициент термо-ЭДС	2
Коэффициент усиления $K_{ус}$	0.5
Осциллограф	3

#### 4.6 Контрольные вопросы

- Как изменится график переходного процесса, если холодные спаи термомпары поместить в сосуд с тающим льдом ?
- Как изменится график переходного процесса, если тепловая инерционность термомпары уменьшится ?
- Зависит ли тепловая инерционность термомпары от скорости обтекания ее жидкостью ?
- Как рассчитывается доверительный интервал погрешности для средних значений ?

- Как определить время инерционности термопары ?
  - Какие аппаратурные погрешности следует учитывать при расчете общей погрешности измерения температуры среды термопарой ?
- 

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред. А.В. Клименко и В.М. Зорина // Сер. Теплоэнергетика и теплотехника; Кн. 2. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007, 564 с.
2. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергия, 1978, 704 с.
3. Махров В.В., Буринский В.В. Методы исследования теплофизических свойств веществ. М.: Московский энергетический институт, 1987. 84 с.
4. Орлова М.П. Низкотемпературная термометрия. Изд-во стандартов. М.: 1988, 280 с.
5. Буринский В.В. Измерения и обработка результатов. Изд-во МНЭПУ, 2000, 156 с.
6. Буринский В.В. Способы создания и измерения давлений в теплофизическом эксперименте. Изд-во МЭИ, 1992, 92 с.
7. Теплопередача: Учебник для вузов/ В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.
8. Г.М. Иванова, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для ВУЗов.- 2-е изд., перераб. и доп. – М. Издательство МЭИ, 2005. – 460 с.