

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Романчук Иван Сергеевич

Должность: Ректор

Дата подписания: 07.10.2023 11:47:44

Уникальный программный ключ:

6319edc2b582ffdacea443f01d5779368d0957ac34f5cd074d8b2321970

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования

«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кафедра расходомерии нефти и газа

Б. В. ГРИГОРЬЕВ, Е. В. ЗАЙЦЕВ

МЕТРОЛОГИЯ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Учебно-методическое пособие

к лабораторным работам для студентов II курса

направлений 16.03.01 Техническая физика, 15.03.06 Мехатроника и  
робототехника, 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника

Тюмень

Издательство

Тюменского государственного университета

2017

**УДК: 006(075.8)**

**ББК: Ж10я73**

**АЗ: Г834**

**Б. В. Григорьев, Е. В. Зайцев. Метрология и физико-технические измерения. Учебно-методическое пособие к лабораторным работам для студентов II курса направлений 16.03.01 Техническая физика, 15.03.06 Мехатроника и робототехника, 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2017, 52 с.**

Учебно-методическое пособие содержит теоретический материал об основных терминах, используемых в метрологии, особенностях и порядке определения метрологических характеристик средств измерений; описание устройства и принцип работы лабораторных установок; порядок выполнения лабораторных работ.

Изложенный в учебно-методическом пособии материал направлен на овладение студентами практическими навыками проведения метрологических мероприятий.

Рекомендовано к изданию базовой кафедрой расходомерии нефти и газа. Утверждено директором Физико-технического института Тюменского государственного университета.

**ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР:** *С. Г. Никулин*, зав. базовой кафедрой расходомерии нефти и газа

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:** *А. Г. Труфанова*, зам. главного метролога АО «ГМС «Нефтемаш»

*А. В. Елышев*, зам. начальника управления по взаимодействию с индустриальными партнерами Тюменского государственного университета, канд. хим. наук.

© ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», 2017

© Б. В. Григорьев, Е. В. Зайцев, 2017

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### ПОДБОР СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ ЗАДАНИЮ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

*Цель работы:* научиться проведению метрологической экспертизы технического задания на проектирование измерительных систем при подборе средств измерений.

#### *Основные понятия и определения*

Согласно РМГ 29-2013 *средство измерения* (СИ) – техническое средство, предназначенное для измерений и имеющее нормированные метрологические (установленные) характеристики.

*Измерительная система* – совокупность СИ и других средств измерительной техники, размещенных в разных точках объекта измерения, функционально объединенных с целью измерений одной или нескольких величин, свойственных этому объекту.

*Метрологическая характеристика* – характеристика одного из свойств СИ, влияющая на результат измерения.

*Нормируемые метрологические характеристики* – совокупность метрологических характеристик данного типа СИ, устанавливаемая нормативными документами на СИ.

Основными метрологическими характеристиками СИ являются диапазон измерений, класс точности и различные составляющие погрешности СИ.

*Диапазон измерений* – область значений измеряемой величины, для которой нормированы допустимые пределы погрешности средства измерений.

*Точность* – качество средства измерений, отражающее близость к нулю его погрешности. Чем меньше погрешность, тем точнее средство измерения.

*Класс точности* – обобщенная характеристика данного типа СИ, как правило, отражающая их уровень точности и выражаемая точностными характеристиками средств измерений. Класс точности обычно обозначается числом или символом, принятым по соглашению. Применяются следующие классы точности приборов: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Обозначение класса точности выражает в процентах относительную или приведенную погрешность прибора и обычно записывается на его шкале. Если на шкале прибора цифра изображена в кружочке, то она указывает относительную погрешность прибора, например,  $\textcircled{0,2}$ . Цифра, обозначающая класс точности прибора и характеризующая приведенную погрешность, обозначается на шкале прибора без кружочка, например, 1,0.

*Погрешность средства измерений* – разность между показанием средства измерений и известным опорным (действительным) значением величины.

*Предел допускаемой погрешности* – наибольшее значение погрешности средства измерений, устанавливаемое нормативным документом для данного типа СИ, при котором оно еще признается метрологически исправным.

*Абсолютная погрешность СИ* – погрешность СИ, выраженная в единицах измеряемой величины.

*Относительная погрешность СИ* – погрешность СИ, выраженная отношением абсолютной погрешности СИ к опорному значению измеряемой величины.

*Приведенная погрешность СИ* – погрешность СИ, выраженная отношением абсолютной погрешности СИ к нормирующему значению величины. Нормирующим может быть значение, характерное для данного вида измерительного прибора. Это может быть, например, диапазон измерений, верхний предел измерений, длина шкалы и т. п. Приведенную погрешность обычно выражают в процентах.

*Основная погрешность СИ* – погрешность СИ, применяемого в нормальных условиях.

*Дополнительная погрешность СИ* – составляющая погрешности СИ, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или вследствие ее выхода за пределы нормальной области значений.

## ***Практическая часть***

Для проектируемой измерительной системы многофазных газожидкостных потоков необходимо подобрать приборную базу, включающую такие СИ, как массовый расходомер жидкости, объемный расходомер газа, датчик температуры, датчик давления, датчик перепада давления. Данные СИ должны обладать определенными техническими и метрологическими характеристиками, обеспечивающими аналогичные характеристике проектируемой измерительной системы. Встречаются случаи, когда невозможно подобрать одно СИ, охватывающее весь диапазон измерений какой-либо физической величины измерительной системы, либо это СИ на определенном участке диапазона измерений будет выходить за рамки допустимых погрешностей, определенных для данной измерительной системы. В такой ситуации необходимо подобрать несколько СИ, каждое из которых покрывает свой участок выделенного диапазона измерений с требуемой точностью.

Проектируемая система должна обладать следующими техническими и метрологическими характеристиками:

- массовый расход жидкости от 0,2 до 100 т/ч;
- объемный расход газа, приведенный к стандартным условиям, от 20 до 25000 м<sup>3</sup>/ч;
- рабочий диапазон давлений 0,2-1,0 МПа;
- рабочий диапазон температуры смеси от 15 до 40 °С;
- температура окружающей среды от 15 до 40 °С;
- пределы допускаемой относительной погрешности установки при измерении массового расхода жидких компонентов не более  $\pm 0,1$  %;
- пределы допускаемой относительной погрешности установки при измерении объёмного расхода газа в рабочих условиях не более  $\pm 0,5$  %;
- пределы допускаемой приведенной погрешности установки при измерении давления не более  $\pm 0,3$  %;

- пределы допускаемой абсолютной погрешности установки при измерении температуры не более  $\pm 0,5$  °С;

- пределы допускаемой приведенной погрешности установки при измерении перепада давления не более  $\pm 0,3$  %.

*Порядок выполнения работы:*

1) В сети Интернет провести поиск СИ, удовлетворяющих указанным выше техническим и метрологическим характеристикам измерительной системы.

2) Собрать следующую информацию:

- Наличие СИ в реестре (действующее свидетельство об утверждении типа СИ с описанием типа).

- Наличие сертификата таможенного союза (электромагнитная совместимость).

- Технические параметры СИ.

- Погрешности измерений с учетом основной и дополнительной погрешностей.

- Наличие требований по взрывозащите.

3) Заполнить таблицу 1.1.

4) Сделать вывод о результатах проведенной работы.

В отчете по проделанной работе технические и метрологические параметры подобранных СИ необходимо свести в таблицу 1.1. К отчету нужно приложить техническую документацию по СИ: действующее свидетельство об утверждении типа с его описанием, сертификат таможенного союза. Полученные результаты работы необходимо отразить в выводе. Если результат отрицательный, т. е. не удалось подобрать СИ, отвечающее требуемым метрологическим и техническим параметрам, то это также необходимо указать в выводе.

Таблица 1.1. Технические и метрологические характеристики СИ.

Наименование СИ	Диапазон измерений	Температура рабочей среды, °С	Температура окружающей среды, °С	Давление рабочей среды, МПа	Пределы допускаемых значений основной относительной погрешности, %	Пределы допускаемых значений основной приведенной погрешности, %	Пределы допускаемых значений основной абсолютной погрешности
Массовый расходомер жидкости							
Датчик объемного расхода газа							
Датчик температуры							
Датчик давления							
Датчик перепада давления							

**Контрольные вопросы:**

1. Дайте определение понятию «измерительная система».
2. Назовите основные метрологические характеристики СИ.
3. Что обозначает класс точности прибора?
4. Дайте определение погрешности СИ.
5. Перечислите виды погрешностей. В чем их отличие?
6. Какими принципами необходимо руководствоваться при подборе СИ для измерительной системы?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

**Цель работы:** научиться обрабатывать результаты прямых измерений с учетом инструментальной погрешности.

#### *Теоретические сведения*

*Измерением* называется нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Существует несколько классификаций видов измерений по тому или иному признаку. Рассмотрим классификации по числу измерений (однократные и многократные) и по общим приемам получения результатов измерений (прямые и косвенные).

*Однократное измерение* – это измерение, выполненное только один раз.

*Многократное измерение* – это измерение одного и того же размера физической величины, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом однократных измерений. Измерение можно считать многократным, если ряд состоит из 4 и более измерений. За результат многократного измерения обычно принимают среднее арифметическое значение из отдельных измерений.

*Прямые измерения* – это измерения, проводимые прямым методом, при котором искомое значение величины получают непосредственно. Например, измерение диаметра штангенциркулем, угла – угломером и т. п.

*Косвенные измерения* – это измерения, проводимые косвенным методом, при котором искомое значение физической величины определяется на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной. Например, определение сопротивления проводника по прямым измерениям тока и напряжения.

*Совокупные измерения* – это проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях различных сочетаний этих величин. Пример: определение массы отдельных

гирь набора по известному значению массы одной из гирь и по результатам измерений (сравнений) масс различных сочетаний гирь.

*Совместные измерения* – это проводимые одновременно измерения двух или нескольких не одноименных величин для определения зависимости между ними. Например, на основании ряда одновременных измерений приращения длины образца и изменений его температуры определяют коэффициент линейного расширения образца.

Все измерения могут быть произведены, как правило, с ограниченной точностью. Иначе говоря, результат всякого измерения дает нам не истинное значение величины, а лишь значение, достаточно близкое к истинному. Это приближенное к истинному значение величины, найденное экспериментальным путем, называют действительным значением физической величины.

Отклонения результатов измерений от истинного значения измеряемой величины называют погрешностью (ошибкой) измерений. При этом различают абсолютную и относительную погрешности.

*Абсолютная погрешность измерения* – это разница между измеренным  $x$  и истинным  $X$  значениями измеряемой величины:

$$\Delta x = x - X, \quad (2.1)$$

Поскольку истинное значение измеряемой величины неизвестно, то в качестве наиболее близкого к нему можно принять среднее значение результатов ряда измерений одной и той же величины, т.е.

$$\Delta x = x - \bar{x}. \quad (2.2)$$

Абсолютную погрешность выражают в единицах измеряемой величины.

*Относительная погрешность измерения* – это отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины, выраженное в относительных единицах или в процентах:

$$\delta = \frac{|\Delta x|}{x}. \quad (2.3)$$

Также погрешности, возникающие в процессе измерений, можно разделить на систематические и случайные. Кроме этого, в процессе измерения

могут появиться грубые (очень большие) погрешности, а также могут быть допущены промахи.

К *систематическим погрешностям* относят составляющую погрешности измерений, которая остается постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той же величины. Как правило, систематические погрешности могут быть в большинстве случаев изучены до начала измерений, а результат измерения может быть уточнен за счет внесения поправок, если их числовые значения определены, или за счет использования таких способов измерений, которые дают возможность исключить влияние систематических погрешностей без их определения.

К *случайным погрешностям* измерения относят составляющие погрешности измерений, которые изменяются случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. В отличие от систематических погрешностей случайные погрешности нельзя устранить заранее. Однако уточнить результат измерения можно за счет проведения повторных измерений, т. е. найти значение измеряемой величины более близкое к истинному, чем результат одного измерения. Эти погрешности являются следствием, например, изменений внешних условий измерений случайного характера, погрешности округления при снятии отсчета и т. п.

*Промахами и грубыми погрешностями* называют погрешности измерения, которые значительно превышают ожидаемые при данных условиях измерений систематические или случайные погрешности. Если результаты измерений используются в расчетах, то перед этим необходимо устранить измерения, содержащие грубые погрешности. Основными причинами этих погрешностей являются ошибки экспериментатора, резкое и неожиданное изменение условий измерения, неисправность прибора и т. п. Для выявления грубых погрешностей используются методы математической статистики.

При проведении измерений какой-либо величины всегда будут присутствовать случайные погрешности, которые невозможно устранить. Для учета влияния случайных погрешностей на результат измерения необходимо

проводить обработку совокупности результатов отдельных наблюдений. Для изучения случайных погрешностей используются методы теории вероятностей и математической статистики.

Приближенным к истинному значению (действительным значением) величины  $x$  является среднее арифметическое полученных значений:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.4)$$

Чем больше число измерений, тем ближе  $\bar{x}$  к истинному значению измеряемой величины  $X$ .

При большом числе измерений равновероятно появление погрешностей с противоположными знаками. В этом случае истинное значение величины  $x$  попадает в интервал

$$\bar{x} - \Delta x \leq x \leq \bar{x} + \Delta x \quad (2.5)$$

Интервал от  $\bar{x} - \Delta x$  до  $\bar{x} + \Delta x$  называют *доверительным интервалом*. Выражение (2.5) можно переписать в виде:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x \quad (2.6)$$

Вероятность того, что  $\bar{x}$  отличается от истинного значения  $X$  не более чем на  $\Delta x$ , называют *доверительной вероятностью*, или *коэффициентом надежности*.

Для оценки рассеяния отдельных результатов измерений  $x_i$  относительно среднего значения  $\bar{x}$  определяют *среднее квадратическое отклонение* (СКО), оценкой которого служит *выборочное стандартное отклонение*:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.7)$$

Среднее значение  $\bar{x}$  также будет иметь рассеивание относительно истинной величины, в чем можно легко убедиться, если провести несколько

серий измерений, для каждого из которых значение  $\bar{x}$  будет отличаться от предыдущих. В данном случае оценкой СКО среднего арифметического является выборочное стандартное отклонение среднего арифметического:

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2.8)$$

Для определения границ абсолютной погрешности (границы доверительного интервала)  $\Delta x$  при ограниченном числе измерений  $n$ , что чаще всего происходит на практике, используют формулу:

$$\Delta x = S_{\bar{x}} t(P, n) \quad (2.9)$$

где  $t(P, n)$  – коэффициент Стьюдента, учитывающий число измерений  $n$  и принятую доверительную вероятность  $P$ . Наиболее употребительные значения коэффициента Стьюдента представлены в таблице 2.1. Для технических измерений принята доверительная вероятность  $P=0,95$ . С такой же доверительной вероятностью проводятся расчеты погрешностей многократных измерений в лабораторных работах.

Таблица 2.1. Значения коэффициентов Стьюдента  $t(p, n)$ .

P \ n	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
2	6,31	12,71	31,82	63,66	636,62
3	2,92	4,30	6,96	9,92	31,60
4	2,35	3,18	4,54	5,84	12,94
5	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
6	2,02	2,57	3,36	4,03	6,86
7	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
8	1,90	2,36	3,00	3,50	5,40
9	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
10	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78
50	1,68	2,01	2,40	2,68	3,50
100	1,66	1,98	2,36	2,63	3,39

Отметим, что описанный метод определения границ доверительного интервала относится к результатам измерений, принадлежащих нормальному распределению. В противном случае методы вычисления доверительных границ случайной погрешности могут быть иными.

Таким образом, при ограниченном числе измерений величины  $X$  доверительная граница  $\Delta x$  определяется выражением (2.9), и окончательный результат измерений величины  $X$  представляется в виде:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x = \bar{x} \pm t(P, n) S_{\bar{x}}. \quad (2.10)$$

Для учета инструментальной (приборной) погрешности в самом простом случае, когда случайная и инструментальная составляющие погрешности взаимно независимы, можно применить геометрическое суммирование:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{сл}^2 + \Delta x_{инст}^2} \quad (2.11)$$

где  $\Delta x_{сл}$  – случайная составляющая погрешности, рассчитанная по формуле (2.9),  $\Delta x_{инст}$  – инструментальная погрешность.

Если  $\Delta x_{сл}$  и  $\Delta x_{инст}$  отличаются друг от друга в два или более раз, то практически можно считать, что  $\Delta x$  равна большей из них. При этом суммарной погрешности приписывается та же доверительная вероятность  $P$ , что и при вычислении случайной погрешности.

### ***Практическая часть***

Используемое оборудование: измерительные приборы научно-испытательного стенда (датчики температуры, давления, перепада давления).

В ходе данной работы необходимо обработать не менее 100 значений прямых измерений одного из средств измерений научно-испытательного стенда (датчика температуры, давления или перепада давления), которые могут быть получены с помощью программы управления записью в файл программы Microsoft Office Excel. Также по данным измерений необходимо построить гистограмму для оценки характера распределения результатов многократных

наблюдений. Все расчеты, а также построение гистограммы необходимо производить в программе Microsoft Excel.

*Порядок выполнения работы:*

1) Найти среднее арифметическое результатов измерений по формуле (2.4).

2) Записать результаты проведенных измерений и промежуточных расчетов в следующую таблицу:

№ измерения	$h_i$ , мм	$ h_i - \bar{h} $ , мм	$(h_i - \bar{h})^2$ , мм <sup>2</sup>
1			
2			
...			
$n$			

3) По формуле (2.8) вычислить оценку СКО среднего значения  $\bar{h}$ .

4) Полагая закон распределения результатов многократных измерений нормальным, рассчитать границы случайной составляющей абсолютной погрешности по формуле (2.9), используя для определения коэффициента Стьюдента  $t(p, n)$  таблицу 2.1. Значение доверительной вероятности принять равным  $P=0,95$ .

5) По выражению (2.11) определить абсолютную погрешность с учетом инструментальной погрешности. Инструментальную погрешность необходимо определить по паспорту прибора.

б) Построить гистограмму распределения результатов измерений.

Для этого необходимо разбить диапазон измерений  $x_{min} \div x_{max}$  на определенное количество интервалов, а далее определить:

- шаг интервала

$$h = \frac{x_{max} - x_{min}}{m}, \text{ где } x_{min}, x_{max} - \text{минимальное и максимальные значения из}$$

ряда измерений,  $m$  – количество интервалов;

- границы интервалов

$$S_0 = x_{min}$$

$$S_1 = x_{min} + h$$

$$S_2 = x_{min} + 2h$$

...

$$S_m = x_{min} + mh = x_{max};$$

- относительные частоты

$$\bar{n}_j = \frac{n_j}{n}, \text{ где } j = 1 \dots m, n_j - \text{ число значений } x \text{ из ряда измерений, попавших}$$

в  $j$ -й интервал.

Для определения частот  $n_j$  удобно воспользоваться функцией ЧАСТОТА(массив\_данных; массив\_интервалов) программы Microsoft Excel.

Для нормального закона распределения гистограмма должна иметь вид, близкий к виду, приведенному на рис. 2.1.

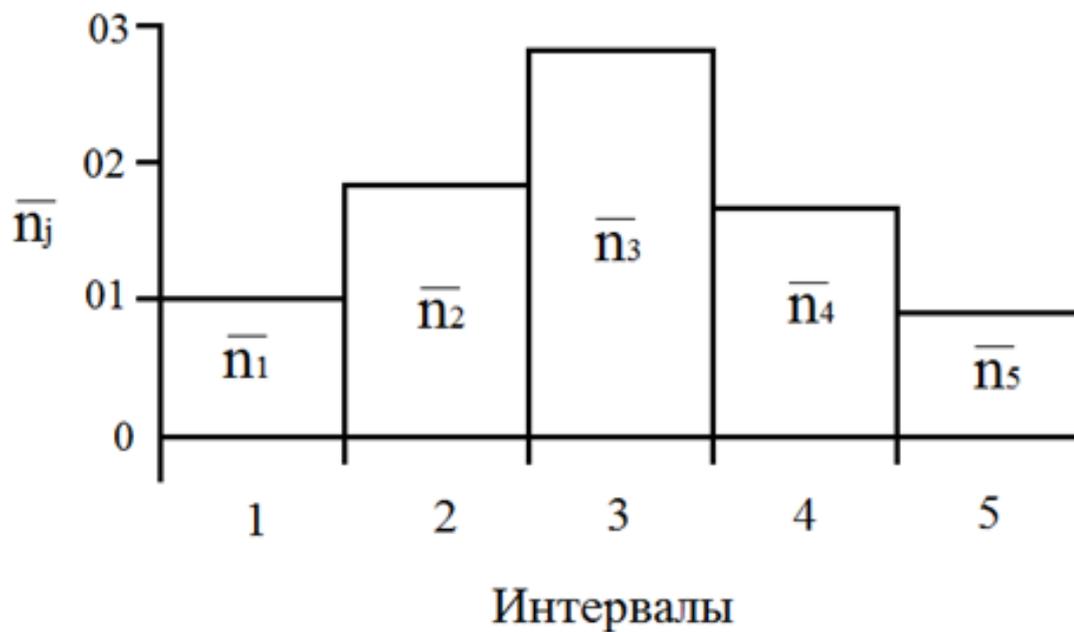


Рис. 2.1. Гистограмма результатов измерений.

При составлении отчета необходимо включить все проделанные расчеты и построенную гистограмму, а конечный результат измерений записать в стандартном виде  $x = \bar{x} \pm \Delta x, P$ .

***Контрольные вопросы:***

1. Какова классификация измерений по их числу и по общим приемам получения результатов измерений?
2. Назовите отличия между совместными и совокупными измерениями.
3. Чем обусловлены систематические и случайные погрешности?
4. Дайте определения понятиям «доверительный интервал» и «доверительная вероятность».
5. В чем принципиальная разница между формулами (2.7) и (2.8)?
6. На основе каких параметров определяется значение коэффициента Стьюдента?
7. Напишите формулу, позволяющую учитывать инструментальную погрешность.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

**Цель работы:** освоить навыки проведения измерений косвенным методом, научиться обрабатывать результаты косвенных измерений.

#### *Теоретические сведения*

*Косвенные измерения* – это измерения, проводимые косвенным методом, при котором искомое значение физической величины определяется на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой.

Косвенные измерения широко распространены в тех случаях, когда искомую величину невозможно или слишком сложно измерить непосредственно или когда прямое измерение дает менее точный результат. Роль их особенно велика при измерении величин, недоступных непосредственному экспериментальному сравнению, например, размеров астрономического или внутриатомного порядка.

При косвенных измерениях значение искомой величины находят на основании известной зависимости, связывающей ее с другими величинами, полученными прямыми измерениями.

Пусть имеется физическая величина  $A$ , связанная функциональной зависимостью с рядом других независимых величин  $x_1, x_2, \dots, x_n$ :

$$A = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Наилучшим значением величины  $A$  при косвенном ее измерении будет:

$$\bar{A} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) \quad (3.1)$$

Для нахождения погрешности величины  $A$  используется ее полный дифференциал:

$$dA = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} dx_n$$

Каждая из величин  $x_i$  измерена с некоторой погрешностью  $\Delta x_i$ . Полагая, что погрешности  $\Delta x_i$  малы, можем заменить  $dx_i$  на  $\Delta x_i$ :

$$dA = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n,$$

где каждое слагаемое  $\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i$  представляет собой частную погрешность результата косвенного измерения, вызванную погрешностью  $\Delta x_i$  определения величины  $x_i$ .

Таким образом граница погрешности  $\Delta A$  косвенного измерения величины  $A$  будет определяться выражением:

$$\Delta A = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2} \quad (3.2)$$

### ***Практическая часть***

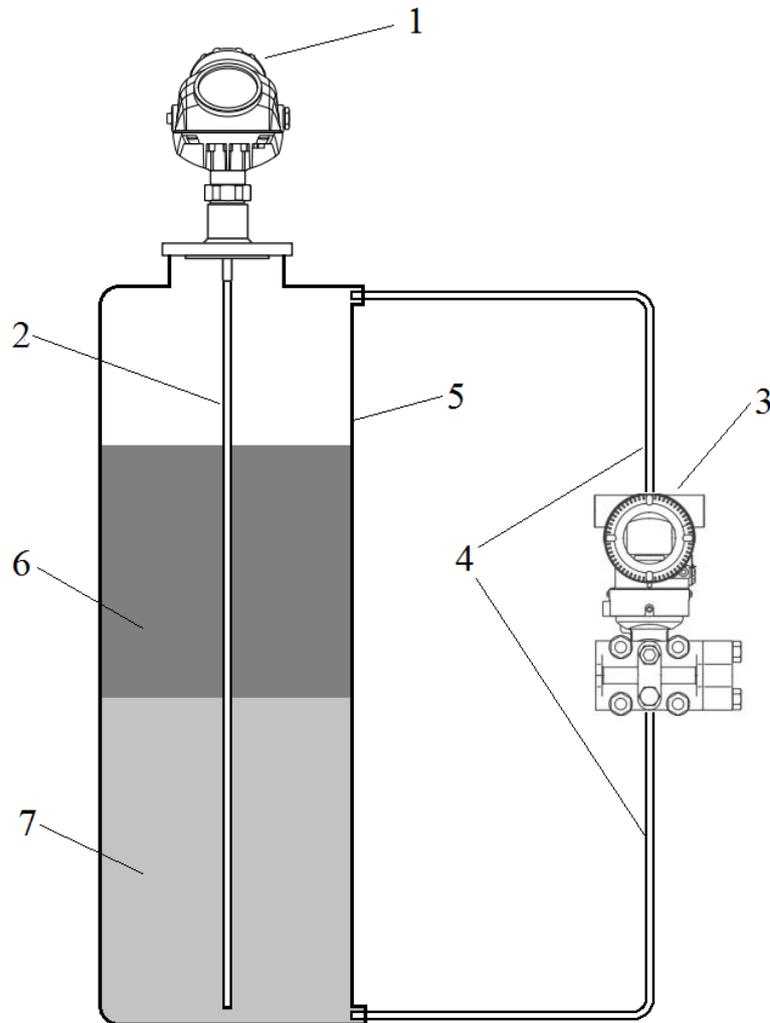
Используемое оборудование: емкость для жидкости, преобразователь перепада давления, волновой радарный уровнемер, ареометр, стеклянный цилиндр.

В данной работе необходимо определить уровень раздела фаз двух несмешивающихся жидкостей, используя прямые измерения перепада давления, общего уровня и плотности каждой жидкости, а также рассчитать погрешности косвенных измерений. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.1.

Косвенные измерения уровня раздела фаз двух жидкостей основываются на известной функциональной зависимости, определяющей давление столба жидкости:

$$P = \rho_{жс} g h,$$

где  $\rho_{жс}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения,  $h$  – высота столба жидкости, м.



**Рис. 3.1.** Схема экспериментальной установки: 1 – волновой радарный уровнемер; 2 – металлический зонд; 3 – датчик перепада давления; 4 – импульсные трубки; 5 – емкость с жидкостью; 6 – более легкая жидкость; 7 – более тяжелая жидкость.

Для определения уровня раздела фаз необходимо воспользоваться системой уравнений:

$$\begin{cases} \Delta P = \rho_{ж1} g h_1 + \rho_{ж2} g h_2 \\ h_3 = h_1 + h_2 \end{cases} \quad (3.3)$$

где  $\Delta P$  – перепад давления, измеряемый датчиком перепада давления, Па;  $h_1$  – толщина слоя более тяжелой жидкости, м (рис. 2);  $h_2$  – толщина слоя более легкой жидкости, м;  $h_3$  – общий уровень, определяемый радарным уровнемером, м;  $\rho_{ж1}$ ,  $\rho_{ж2}$  – плотности более тяжелой и более легкой жидкостей соответственно, определяемые с помощью ареометра, кг/м<sup>3</sup>.

Из системы (3.3) необходимо выразить величину  $h_1$ , которая и будет являться уровнем раздела фаз.

*Порядок выполнения работы:*

1) Снять показания (не менее 5 показаний по каждому датчику) уровнемера и датчика перепада давления.

2) Определить плотности обеих жидкостей с помощью ареометра. Для этого необходимо осторожно погрузить ареометр в стеклянный цилиндр с измеряемой жидкостью, опуская его до тех пор, пока не станет ясно, что он плавает. **Ареометр ни в коем случае не должен касаться дна и стенок сосуда.** После погружения необходимо выждать некоторое время, пока ареометр не примет неподвижное положение. Для отсчета величины плотности по шкале необходимо, чтобы уровень глаз был на одном уровне с верхним мениском жидкости. Погрешность определения плотности жидкости принять равной приборной погрешности:  $\pm 0,15 \text{ кг/м}^3$ .

3) Провести обработку прямых измерений уровня жидкости и перепада давления.

4) Выразить из системы (3.3) искомую величину  $h_l$  и найти ее оценку с учетом формулы (3.1).

5) Определить частные погрешности  $\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i$ .

6) По формуле (3.2) найти доверительные границы  $\Delta h$ .

***Контрольные вопросы:***

1. На чем основываются косвенные измерения?  
2. В каких случаях целесообразно применение косвенных измерений?  
3. Как определяется оценка косвенно измеряемой величины?  
4. Напишите выражение для определения частной погрешности результата косвенного измерения.

5. Напишите формулу для расчета границ погрешности косвенного измерения.

6. Приведите примеры нахождения физической величины методом косвенных измерений.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

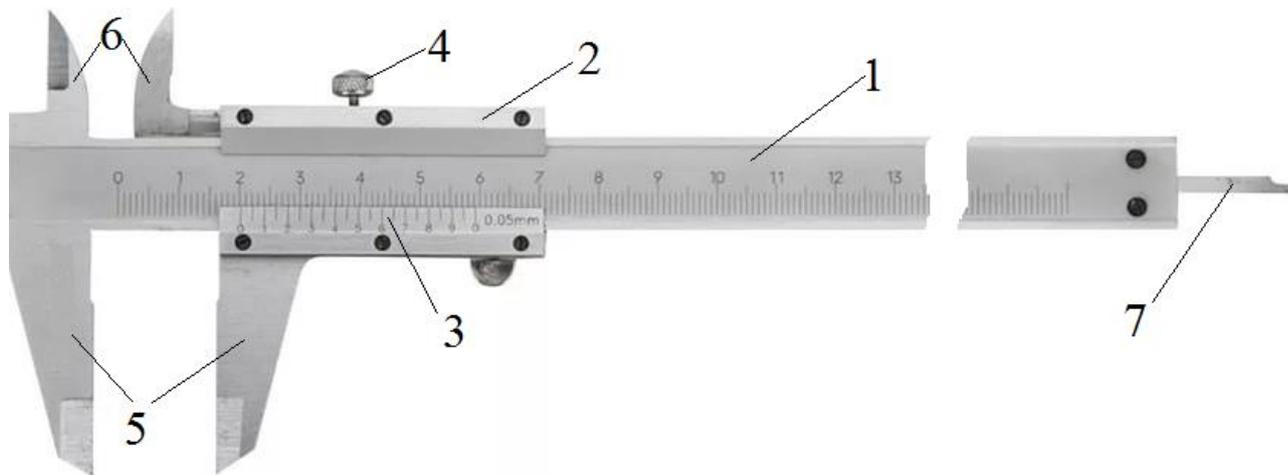
### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ С ПОМОЩЬЮ ШТАНГЕНЦИРКУЛЯ И МИКРОМЕТРА

**Цель работы:** освоить навыки измерений линейных размеров с помощью штангенциркуля и микрометра.

#### **Теоретические сведения**

*Штангенциркуль* относится к большой группе измерительных средств, именуемых общим названием «штангенинструмент». Отличительной особенностью этих измерительных средств является то, что в них используется линейка со шкалой (штанга), имеющей деления через 1 мм, а отсчитывание частей интервалов на этой основной шкале до десятых и сотых долей миллиметра производится с помощью вспомогательной шкалы – нониуса.

Согласно ГОСТ 166-89 штангенциркули изготавливают следующих типов: I – двусторонние с глубиномером; T-1 – односторонние с глубиномером с измерительными поверхностями из твердых сплавов; II – двухсторонние; III – односторонние.



**Рис. 4.1. Штангенциркуль типа ШЦ-I: 1 – штанга; 2 – рамка; 3 – нониус; 4 – винт; 5 – губки для измерения наружных размеров; 6 – губки для измерения внутренних размеров; 7 – глубиномер.**

Штангенциркуль типа ШЦ-I состоит из двух частей (рис. 4.1). Первая часть представляет собой линейку 1 (штангу) со шкалой, имеющей величину деления 1мм. На одном конце этой штанги имеется пара неподвижных измерительных губок, рабочие поверхности которых перпендикулярны

линейке. Вторая часть – рамка 2, имеющая вторую пару измерительных губок, параллельных первой, может свободно перемещаться по штанге. На рамке располагается нониус 3 и винт 4 для фиксации штанги и рамки относительно друг друга. Нижние измерительные губки предназначены для определения величин наружных размеров, верхние измерительные губки – для определения внутренних размеров.

Типоразмеры штангенциркулей охватывают диапазон размеров до 2000 мм. Однако наиболее распространены штангенциркули с диапазоном измерений от 0 до 125 (140) мм и от 0 до 320 (200, 250) мм. Первые обычно имеют отсчет по нониусу 0,1 мм, а вторые – 0,1 и 0,05 мм.

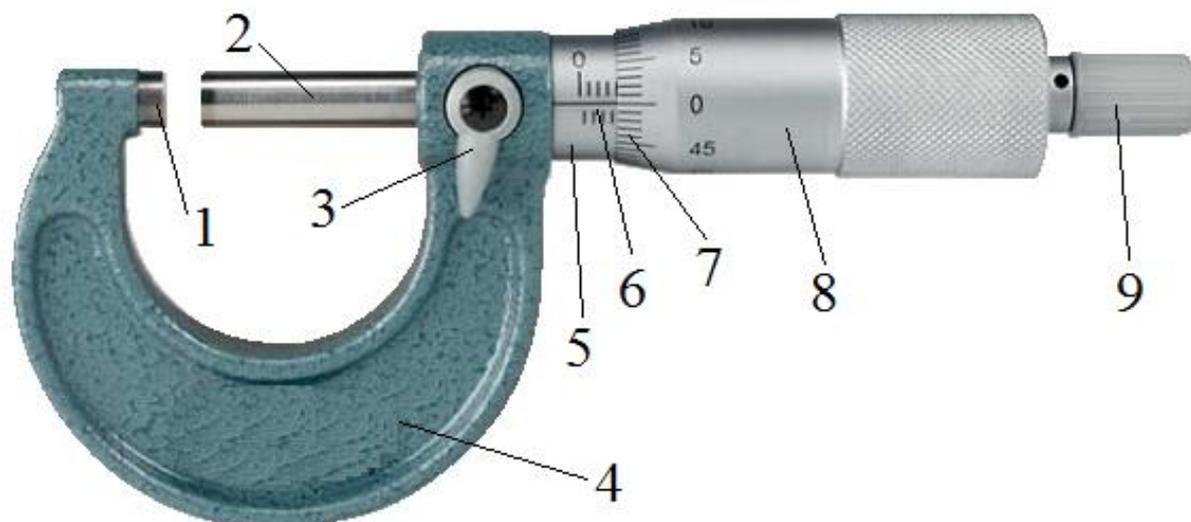
Погрешность штангенциркулей определяется измеряемой длиной, значением отсчета по нониусу, классом точности и может варьироваться от 0,03 до 0,2 мм.

*Микрометр* – измерительное средство с двухточечной схемой измерения, в котором перемещение одной из точек определяется с помощью резьбовой пары – винта и гайки.

Согласно ГОСТ 6507-90 микрометры изготавливают следующих типов: МК – гладкие для измерения наружных размеров изделий; МЛ – листовые с циферблатом для измерения толщины листов и лент; МТ – трубные для измерения толщины стенок труб; МЗ – зубомерные для измерения длины общей нормали зубчатых колес с модулем от 1 мм; МГ – микрометрические головки для измерения перемещения; МП – микрометры для измерения толщины проволоки.

Наибольшее распространение получили гладкие микрометры (рис. 4.2). Пятка 1, закрепленная в скобе 4, выполняет роль неподвижной точки. Микрометрический винт (микровинт) 2, соединенный с барабаном 8, поступательно перемещается при вращении трещотки 9. Трещотка необходима для обеспечения фиксированного усилия, прикладываемого к измерительным поверхностям прибора при измерениях. На стебле 5 нанесена шкала 6 с продольной линией, цена деления которой равна шагу резьбы

микрометрического винта. Таким образом, полный оборот барабана соответствует величине осевого смещения, равной цене деления шкалы стебля. Для отсчета неполных оборотов барабана на его скошенной поверхности также нанесена шкала 7, диапазон которой равен цене деления шкалы стебля. Стопор 3 предназначен для фиксации микровинта при установлении нуля микрометра.



**Рис 4.2. Микрометр гладкий: 1 – пятка; 2 – микрометрический винт; 3 – стопор; 4 – скоба; 5 – стержень; 6 – шкала стержня; 7 – шкала барабана; 8 – барабан; 9 – трещотка.**

Типоразмеры микрометров в основном предопределяются длиной резьбы микровинта, обеспечивающего диапазон измерений. Практикой установлена оптимальная длина резьбы микровинта 25 мм.

Обычно типоразмеры микрометров устанавливаются через 25 мм, т. е. 0 – 25; 25 – 50; 50 – 75 и т. д. Наибольший предел измерения обычно равен 600 мм, но практическое применение имеют типоразмеры до 100 мм.

Погрешность микрометров нормируется от 4 до 10 мкм в зависимости от диапазона измерения, погрешности установочных мер, отклонений от параллельности измерительных поверхностей, разгиба скобы и т. п.

## ***Практическая часть***

Используемое оборудование: штангенциркуль типа ШЦ-I, микрометр гладкий, измеряемые детали.

### *Порядок выполнения работы:*

1) Выполнить эскиз деталей и ввести обозначения размеров.

2) Определить величины размеров детали с помощью штангенциркуля. Для каждого размера необходимо провести 5 измерений в пяти различных точках. Величина размера будет равна среднему значению.

Определение показаний производится следующим образом. Количество целых миллиметров отсчитывается по шкале штанги слева направо, где указателем служит нулевой штрих нониуса. Для отсчета долей миллиметра необходимо определить штрих нониуса, который наиболее точно совпадает с одним из штрихов основной шкалы. После этого нужно умножить порядковый номер найденного штриха нониуса (не считая нулевого) на величину отсчета по нониусу. Сумма измеренного числа целых миллиметров и долей миллиметра и будет определять искомый размер. В случае точного совпадения нулевого штриха нониуса с одним из штрихов основной шкалы полученный размер выражается целым числом миллиметров.

При выполнении измерений необходимо руководствоваться следующими правилами:

- губки штангенциркуля необходимо плотно прижимать к поверхностям измеряемого объекта без видимых щелей с небольшим усилием;
- при измерении глубины отверстий торец противоположного измерительным губкам конца штанги прижимается к краю отверстия, после чего глубиномер выдвигается до упора перемещением рамки, при этом необходимо соблюдать, чтобы глубиномер располагался параллельно оси отверстия;
- определять показания следует после фиксации рамки стопорным винтом.

3) Произвести измерения размеров детали с помощью микрометра. Для каждого размера также необходимо провести 5 измерений в пяти различных точках. Определение показаний осуществляется по шкале стебля и шкале барабана. Штрихи шкалы стебля для удобства нанесены по обе стороны от продольной линии. Нижние (пронумерованные) штрихи соответствуют перемещению барабана на 1 мм, 2 мм, 3 мм и т. д., а верхние – на 0,5 мм, 1,5 мм, 2,5 мм и т. д. Круговая шкала на барабане служит для отсчета сотых и тысячных долей миллиметра. Указателем при отсчете по шкале стебля является торец барабана, а для круговой шкалы указателем служит продольная линия барабана. При измерении необходимо слегка прижать пятку к детали и вращать микрометрический винт с помощью трещотки (использовать барабан для этого недопустимо) до соприкосновения его с измеряемой поверхностью. Далее положение микровинта фиксируют с помощью стопорного устройства. При измерении наружного диаметра измерительные поверхности нужно выставлять в диаметрально противоположных точках. При этом пятка прижимается к валу, а микрометрический винт, который медленно вращают трещоткой, последовательно выравнивается в двух направлениях: осевом и радиальном.

4) Провести обработку погрешностей измерений.

5) Записать результаты измерений в таблицы 4.1, 4.2.

Таблица 4.1. Результаты измерений размеров детали 1 штангенциркулем.

№	Наименование размера согласно эскизу	Величина размера, мм	Погрешность измерения, мм
1			
2			
...			
n			

Таблица 4.2. Результаты измерений размеров детали 2 микрометром.

№	Наименование размера согласно эскизу	Величина размера, мм	Погрешность измерения, мм
1			
2			
...			
n			

***Контрольные вопросы:***

1. Назовите общие признаки штангенинструмента.
2. Опишите принцип измерения с помощью штангенциркуля.
3. Чем определяется погрешность измерения штангенциркулем?
4. Назовите основные типы микрометров.
5. Опишите принцип измерения микрометром.
6. Каковы типоразмеры микрометров?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ НА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ МИКРОСКОПЕ

**Цель работы:** ознакомиться с устройством и работой инструментального микроскопа, получить навыки его применения для измерения линейных и угловых размеров.

#### ***Теоретические сведения***

*Оптико-механическими измерительными средствами* называются приборы, в конструкции которых сочетаются оптические и механические принципы действия. При этом оптический принцип действия в приборе предназначен для визирования (совмещения границ измеряемого размера с визирной линией, перекрестием и т. п.) или определения значения измеряемого размера. Иногда эти приборы разделяют на контактные и бесконтактные.

Более строго приборы с использованием оптико-механического принципа действия можно разделить на три группы в зависимости от используемого способа визирования и отсчета значения размера:

- с механическим контактом (визированием) с измеряемой поверхностью и оптическим отсчетом измеряемого размера;
- с оптическим способом визирования (контакта) с измеряемой поверхностью и оптическим отсчетом измеряемого размера. Механическая часть этих приборов используется для перемещения оптических элементов приборов (транспортные функции);
- с оптическим способом визирования (контакта) с измеряемой поверхностью и механическим (или другим, но не оптическим) способом отсчета измеряемого размера.

*Инструментальный микроскоп* относится к третьей группе оптико-механических СИ. Принцип измерения инструментального микроскопа основан на совмещении границ измеряемого размера с визирной линией, находящейся в поле зрения окуляра, путем перемещения координатного стола

во взаимно-перпендикулярных направлениях. Механический отсчет продольных и поперечных перемещений определяет измеряемый размер.

В соответствии с ГОСТ 8074-82 выпускают микроскопы с микрометрическими измерителями двух типов: типа А – без наклона головки и типа Б – с наклоном головки. У микроскопов ИМ 100х50, А и ИМ 100х50, Б предусмотрена возможность отсчета показаний по шкалам микрометрических головок и применения концевых мер длины, тогда как микроскопы ИМЦ 100х50, А; ИМЦ 150х50, А; ИМЦЛ 150х50, Б; ИМЦЛ 160х80, Б оснащены цифровыми отсчетными устройствами. Числа в обозначении микроскопа выражают пределы его измерений в продольном (первое число) и поперечном (второе число) направлениях.

Инструментальные микроскопы предназначены для линейно-угловых измерений различных деталей в прямоугольных и полярных координатах. Они широко применяются для контроля в производственных цехах, заводских лабораториях, научно-исследовательских и поверочных учреждениях.

Погрешность при измерении на микроскопе в значительной степени зависит от квалификации оператора, качества обработки измеряемой детали, измеряемого элемента, диафрагмирования источника света, особенностей данного экземпляра микроскопа, внешних условий и других факторов. Эти погрешности измерения для линейных размеров могут составлять 3-10 мкм, а для угловых – 1-3'.

### ***Практическая часть***

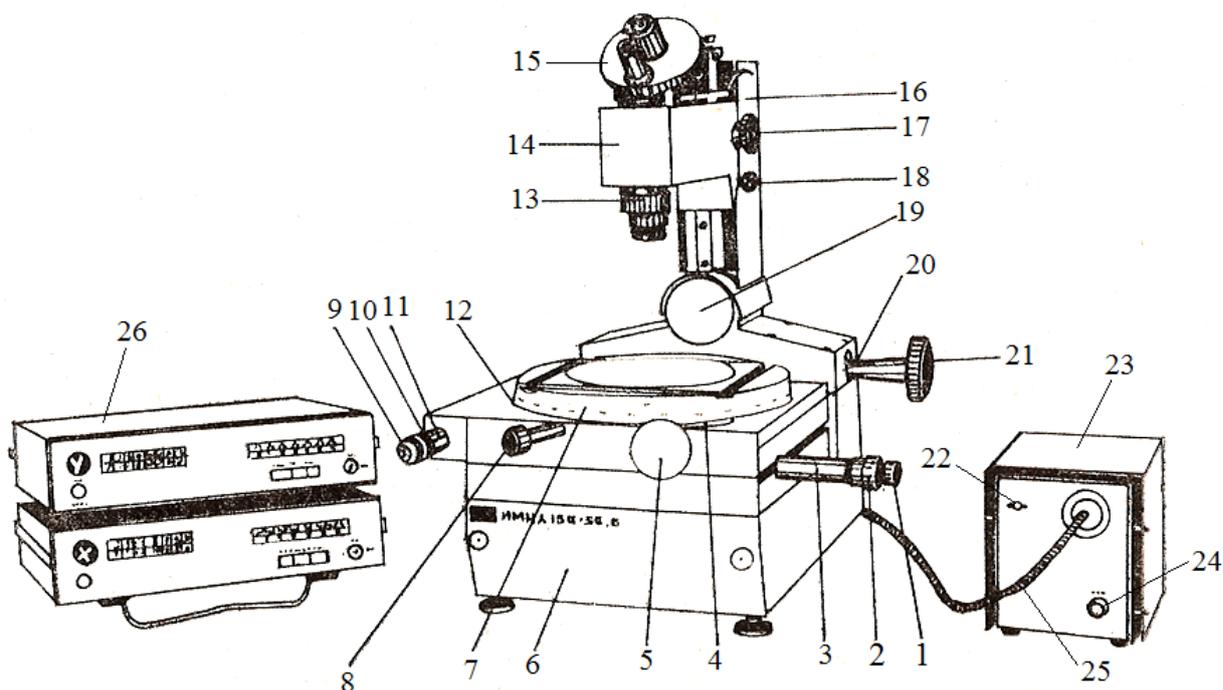
Используемое оборудование: микроскоп инструментальный ИМЦЛ 150х50, Б, измеряемые детали.

#### *Устройство микроскопа*

Микроскоп состоит из основания, координатного стола и колонки с тубусом визирного микроскопа.

На массивном литом основании 6 (рис. 5.1) находятся координатный стол 12, колонка 16, поворачивающаяся на оси 19, и тубус визирного микроскопа 14.

При вращении гайки с накаткой 13 осуществляется перемещение объектива визирного микроскопа по вертикали (точная наводка).



**Рис. 5.1. Общий вид микроскопа: 1 – маховичок грубой наводки в продольном направлении; 2 – маховичок точной наводки в продольном направлении; 3 – механизм продольного перемещения; 4 – нониус; 5 – механизм поворота лимба; 6 – основание; 7 – лимб; 8 – маховичок фиксации лимба; 9 – маховичок грубой наводки в поперечном направлении; 10 – маховичок точной наводки в поперечном направлении; 11 – механизм поперечного перемещения; 12 – координатный стол; 13 – кольцо точной наводки объектива; 14 – тубус; 15 – окулярная угломерная головка; 16 – колонка; 17 – маховичок быстрого перемещения тубуса; 18 – маховичок фиксации тубуса; 19 – ось вращения колонки; 20 – гайка со шкалой; 21 – маховичок наклона колонки; 22 – сигнальная лампа осветителя; 23 – осветитель; 24 – тумблер осветителя; 25 – световод; 26 – цифровое отсчитывающее устройство.**

Съемная окулярная угломерная головка 15 предназначена для различных линейных и угловых измерений. Для других целей, например, для измерения радиусов дуг окружностей необходимо сменить головку на соответствующую.

Кремальерный механизм с маховичком 17 служит для быстрых перемещений тубуса визирного микроскопа по вертикали (грубая наводка). Маховичком тормоза 18 тубус визирного микроскопа фиксируется в нужном положении на колонке.

Для наклона колонки служит механизм, имеющий барабан с маховичком 21. На барабане нанесены четыре риски: 0, 30' (2 риски), 60'. Поворот маховичка от нулевой риски до соседней в любую сторону соответствует углу

наклона колонки на 30 минут. На гайке 20 нанесена шкала, которая имеет деление от нуля до  $12^{\circ}30'$  в обе стороны.

Лимб 7 координатного стола имеет посадочную поверхность для предметного стекла.

Каретки стола перемещаются относительно основания 6 в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Лимб поворачивается вокруг вертикальной оси. Прямолинейное движение кареток стола осуществляется механизмом перемещения 3 и 11 (в продольном и поперечном направлениях). Для быстрого перемещения стола необходимо повернуть маховичок 1 (или 9) против часовой стрелки до упора и приложить рукой усилие к каретке по направлению перемещения.

Для медленного и более точного перемещения кареток стола служат маховички 2 и 10. При этом маховички 1 и 9 необходимо затянуть.

Перемещение кареток стола ограничивают мягкие резиновые упоры.

**Переместив от руки каретку стола до упора, ЗАПРЕЩАЕТСЯ производить дальнейшее перемещение в направлении к упору маховичками 2 и 10.** Данные действия вызовут нарушение работоспособности механизмов перемещения.

Вращение лимба стола осуществляется механизмом поворота 5. Углы поворота отсчитывают по шкале при помощи нониуса 4.

Лимб фиксируют в нужном положении маховичком 8.

#### *Измерение размеров конусного калибра-пробки*

Необходимо измерить высоту, угол, нижний и верхний диаметры конусной части данного изделия. Все эти измерения можно провести, основываясь на трех операциях, поддерживаемых цифровым отсчетным устройством: измерение расстояния между двумя точками; определение расстояния между точкой и прямой; определение значения угла между двумя прямыми.

*Измерение расстояния между двумя точками* (рис. 5.2). Необходимо навестись визуально на первую точку M(1) и нажать клавишу [R], затем

произвести наведение на вторую точку  $M(2)$  и вновь нажать клавишу [R]. При этом на индикаторных табло X и Y появится значение, равное расстоянию между двумя точками, о чем будет свидетельствовать мигание светодиода R. Повторное нажатие клавиши [R] восстанавливает индикацию текущего значения. Процесс измерения расстояний можно продолжить. При этом на табло X всегда появляется значение R, равное расстоянию между двумя последними точками наведения, а на табло Y – значение R, равное расстоянию относительно точки, когда была нажата клавиша [R] в первый раз. Это позволяет решать на плоскости задачи векторной алгебры.

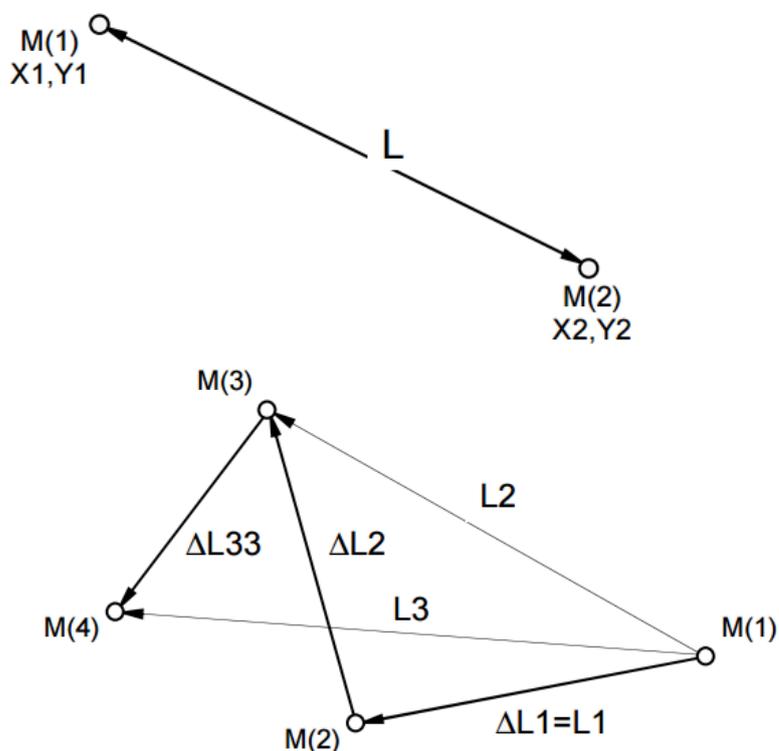


Рис. 5.2. К определению расстояния между двумя точками.

*Определение расстояния между точкой и прямой* (рис. 5.3). Сначала фиксируются две точки, лежащие на прямой  $M(1)$  и  $M(2)$  (для фиксации точки необходимо совместить ее с перекрестием (рис. 5.4) и нажать клавишу [4↓]). Затем фиксируется третья точка  $M(3)$ , расстояние от которой до прямой нужно измерить. После нажатия на клавишу [8>] на верхней строке табло появится результат измерения. Если необходимо повторить измерение от любой другой точки до данной прямой, достаточно нажать клавишу [∅], навестись на

требуемую точку и вновь нажать на клавишу [8>]. Процесс можно продолжать неограниченное количество раз. Многократные измерения расстояний от базовой прямой до произвольных точек эквивалентны переходу в другую систему координат.

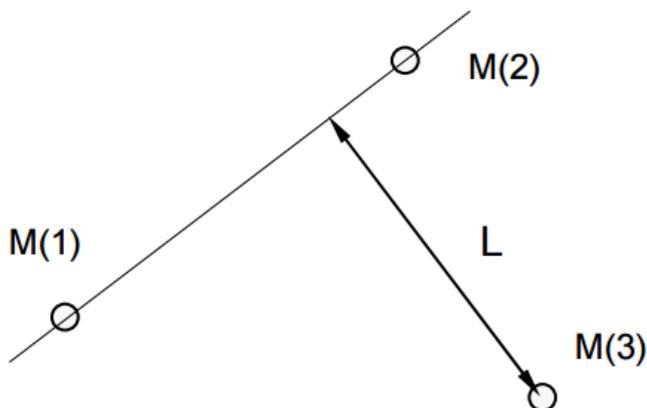


Рис. 5.3. К определению расстояния между точкой и прямой.

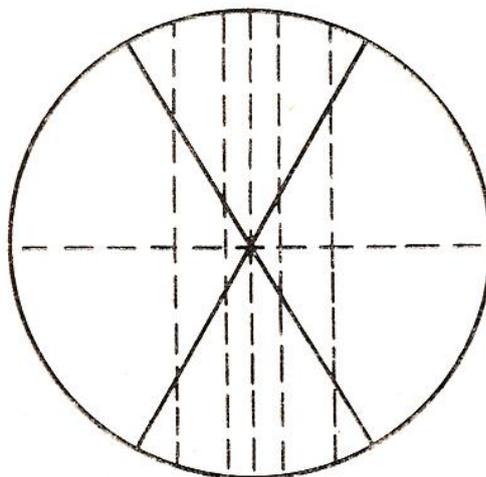
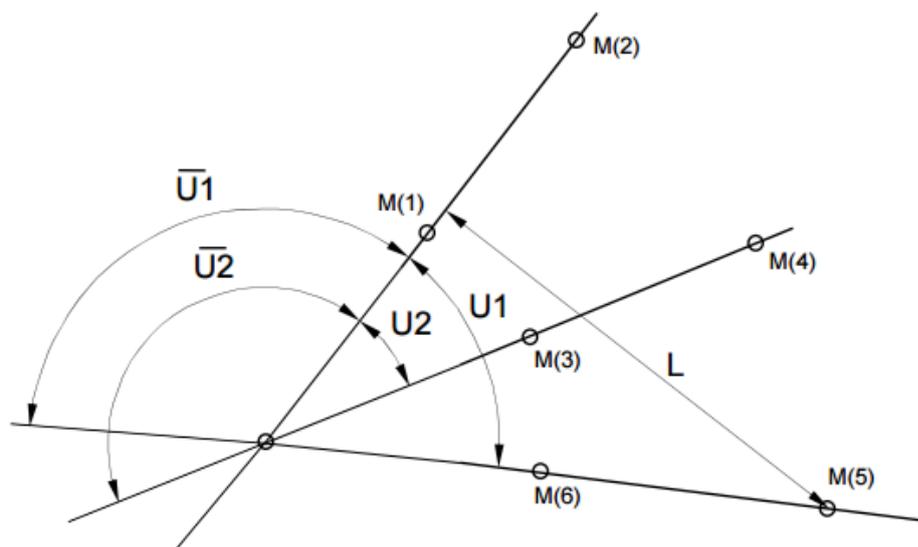


Рис. 5.4. Вид поля зрения окуляра.

Определение значения угла между двумя прямыми (рис. 5.5). После фиксации двух точек на одной прямой M(1) и M(2) и одной точки на другой прямой M(3) необходимо навестись на четвертую точку M(4) и нажать на клавишу [9<]. При этом на верхнем табло отображается значение угла от 0° до 180°, а на нижнем табло – значение угла, дополняющего до 180°.

Возможна индикация угла в радианах при повторном нажатии на клавишу [9<]. Поскольку после выхода из режима нажатием клавиши [Ø] значения двух точек на первой прямой сохраняются, возможно продолжение

измерения углов между первой прямой и любыми другими. Для этого достаточно нажать на клавишу [Ø] и продолжить фиксацию точек на второй прямой. В любой момент времени существует возможность определения расстояния  $L$  между первой прямой и любой точкой второй прямой без нарушения последовательности измерения углов.



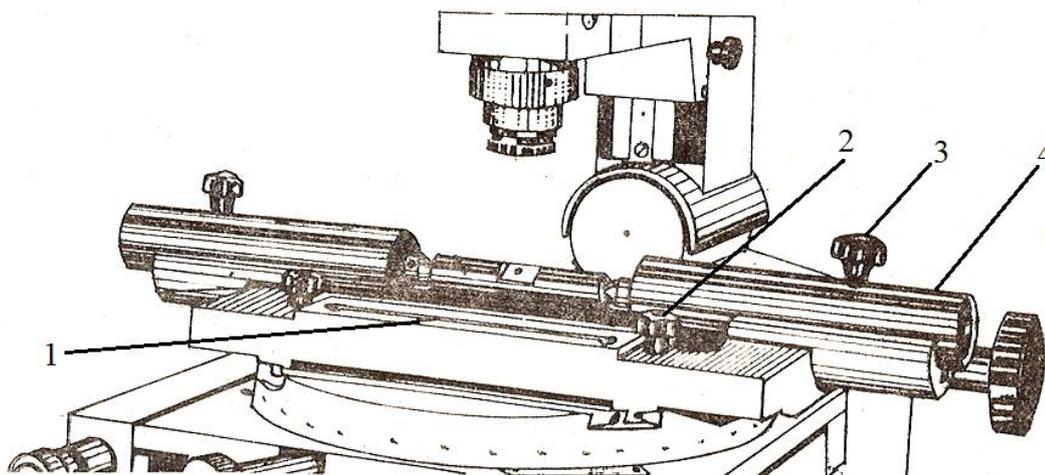
**Рис. 5.5.** К определению значения угла между двумя прямыми.

При необходимости сброс показаний цифрового табло производится отдельно для координат  $X$  и  $Y$  посредством последовательного нажатия клавиш [X] или [Y] и клавиши [C].

*Порядок выполнения работы:*

- 1) Выполнить эскиз контура конусной части изделия с указанием фиксируемых точек при измерениях, ввести обозначения размеров.
- 2) Включить осветительное устройство 23 (рис. 5.1) и цифровое отсчетное устройство 26 в сеть. Включить тумблер осветителя 24.
- 3) Установить измеряемое изделие в бабку 1 (рис. 5.6). Для этого необходимо использовать подвижные держатели конусов 4, зажимаемые в нужном направлении маховичками 3. Закрепить бабку к лимбу винтами 2.
- 4) Установить резкое изображение контура измеряемого изделия грубой наводкой, перемещая тубус микроскопа 14 (рис. 5.1) с помощью кремальеры

маховичком 17, или точной наводкой, вращая кольцо 13. Положение тубуса микроскопа зафиксировать маховичком 18.



**Рис. 5.6. Вид бабки: 1 – бабка; 2 – винт фиксации бабки к лимбу; 3 – маховичок фиксации держателя конуса; 4 – держатель конуса.**

5) Провести измерения верхнего и малого диаметров конусной части изделия с помощью операции измерения расстояния между двумя точками, используя в качестве фиксируемых точек соответствующие вершины. Провести по 5 измерений каждого диаметра.

6) Измерить высоту конусной части с помощью операции определения расстояния между точкой и прямой. Провести 5 измерений, используя в каждом из них разные фиксируемые точки.

7) Провести измерения угла между образующими конусной части, используя операцию определения величины угла между двумя прямыми. Также провести 5 измерений, каждый раз фиксируя разные точки.

8) Обработать результаты прямых измерений.

9) Записать полученные результаты измерений в таблицу 5.1.

Таблица 5.1. Результаты измерений линейных и угловых размеров на инструментальном микроскопе.

№	Наименование размера	Величина размера, мм	Погрешность измерения, мм
1			
...			
n			

***Контрольные вопросы:***

1. Каковы общие признаки оптико-механических СИ?
2. К какой группе оптико-механических СИ относятся инструментальные микроскопы?
3. Опишите принцип измерений инструментальным микроскопом.
4. Для чего предназначен инструментальный микроскоп? Где он применяется?
5. Что обуславливает погрешность измерений инструментального микроскопа?
6. При помощи каких операций отсчетного цифрового устройства можно определить диаметр цилиндра?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### ПОВЕРКА ТЕХНИЧЕСКОГО МАНОМЕТРА

**Цель работы:** освоить основные принципы поверки средств измерений, получить практические навыки поверки технических манометров.

#### *Теоретические сведения*

*Поверка средств измерений* – совокупность операций, выполняемых органами Государственной метрологической службы (другими уполномоченными органами, организациями) с целью определения и подтверждения соответствия средств измерений установленным техническим требованиям.

Средства измерений, подлежащие государственному метрологическому контролю и надзору, подвергаются поверке органами Государственной метрологической службы при выпуске из производства или ремонта, при ввозе по импорту и эксплуатации. Порядок проведения поверки средств измерений регламентируется стандартом ПР 50.2.006-94 «Правила по метрологии. Государственная система обеспечения единства измерений. Порядок проведения поверки средств измерений».

Поверочная деятельность, осуществляемая аккредитованными метрологическими службами юридических лиц, контролируется органами Государственной метрологической службы по месту расположения этих юридических лиц.

Средства измерений подвергают первичной, периодической, внеочередной и инспекционной поверке.

*Первичной поверке* подлежат средства измерений утвержденных типов при выпуске из производства и ремонта, при ввозе по импорту. Первичной поверке подлежит, как правило, каждый экземпляр средств измерений. Допускается выборочная поверка.

*Периодической поверке* подлежат средства измерений, находящиеся в эксплуатации или на хранении, через определенные межповерочные интервалы. Периодическую поверку должен проходить каждый экземпляр средств

измерений. Периодической поверке могут не подвергаться средства измерений, находящиеся на длительном хранении. Результаты периодической поверки действительны в течение межповерочного интервала.

*Внеочередную поверку* производят при эксплуатации (хранении) средств измерений при:

– повреждении знака поверительного клейма, а также в случае утраты свидетельства о поверке;

– вводе в эксплуатацию средств измерений после длительного хранения (более одного межповерочного интервала);

– проведении повторной юстировки или настройки, известном или предполагаемом ударном воздействии на средство измерений или неудовлетворительной работе прибора.

*Инспекционную поверку* производят для выявления пригодности к применению средств измерений при осуществлении государственного метрологического надзора органами государственной метрологической службы.

В большинстве случаев поверка проводится по двум наиболее часто используемым методам:

1. Методом непосредственного сравнения измеряемых величин и величин, воспроизводимых рабочим эталоном соответствующего разряда или класса точности. Наибольшая разность между результатом измерений и соответствующим ему размером эталона является в этом случае основной погрешностью прибора.

2. Методом непосредственного сличения показаний поверяемого и эталонного СИ при одновременном измерении одной и той же величины. Разность их показаний является абсолютной погрешностью поверяемого СИ.

Необходимым условием поверки является соблюдение определенного соотношения между допускаемыми погрешностями эталонного и поверяемого СИ. Обычно это соотношение принимается равным 1:3, когда при поверке вводят поправки на показания образцовых СИ. Если поправки не вводят, то

эталонные СИ выбираются из соотношения 1:5. Соотношения допускаемых погрешностей эталонных и поверяемых СИ могут отличаться от указанных цифр и, как правило, устанавливаются с учетом принятого метода поверки, характера погрешностей, допускаемых значений ошибок.

Проведение поверки технических манометров производится согласно рекомендациям МИ 2124-90.

Как правило процедура поверки СИ начинается с внешнего осмотра. При внешнем осмотре должно быть установлено отсутствие механических повреждений корпуса, штуцера (препятствующих присоединению и не обеспечивающих герметичность и прочность соединения), стрелки (пера), стекла и циферблата, влияющих на эксплуатационные свойства. Стекло и защитное покрытие циферблата должны быть чистыми и не должны иметь дефектов, препятствующих правильному отсчету показаний.

Основную абсолютную погрешность прибора необходимо определять как разность между показаниями прибора и действительным значением давления по образцовому прибору.

Отсчитывание показаний приборов при их поверке должно проводиться с точностью до 0,1 цены деления. Для устранения параллакса при отсчете показаний направление зрения должно проходить через указательный конец стрелки перпендикулярно поверхности циферблата. Если стрелка имеет ножевой конец, направление зрения должно быть в плоскости лезвия ножа.

Число проверяемых точек шкалы приборов класса точности 0,6 должно быть не менее 8; классов точности 1; 1,6 и 2,5 – не менее 5; класса точности 4 – не менее 3, и включать нижнее и верхнее предельное значение давления. Проверяемые точки должны быть распределены равномерно в пределах всей шкалы.

При поверке давление плавно повышают и проводят отсчитывание показаний. Затем прибор выдерживают в течение 5 мин под давлением, равным верхнему пределу измерений. После чего давление плавно понижают и проводят отсчитывание показаний при тех же значениях давления, что и при

повышении давления. Скорость изменения давления не должна превышать 10 % диапазона показаний в секунду.

Значение основной погрешности прибора на любой отметке шкалы как при прямом, так и обратном ходе стрелки (пера) не должно превышать пределов допускаемой основной погрешности поверяемого СИ, выраженной в процентах от нормирующего значения (шкалы прибора).

*Вариация* показаний для каждой проверяемой отметки шкалы, кроме значений, соответствующих верхнему и нижнему пределам измерений, определяется по формуле:

$$v = \frac{N_2 - N_1}{D} \cdot 100, \quad (6.1)$$

где  $N_1$  и  $N_2$  – показания поверяемого прибора при прямом и обратном ходе соответственно,  $D$  – диапазон показаний поверяемого прибора.

Вариация не должна превышать предела основной допускаемой погрешности.

При снижении давления до нуля после поверки стрелка должна находиться на нулевой отметке шкалы с отклонением, не превышающим допускаемого значения, установленного в техдокументации на прибор. Последний должен быть отсоединен от устройства создания давления и находиться в рабочем положении.

Температура окружающего воздуха должна быть 20 или 23 °С с допускаемым отклонением:  $\pm 2$  °С для приборов классов точности 0,6 и 1 и с допускаемым отклонением  $\pm 5$  °С для приборов классов точности 1,5; 2,5 и 4.

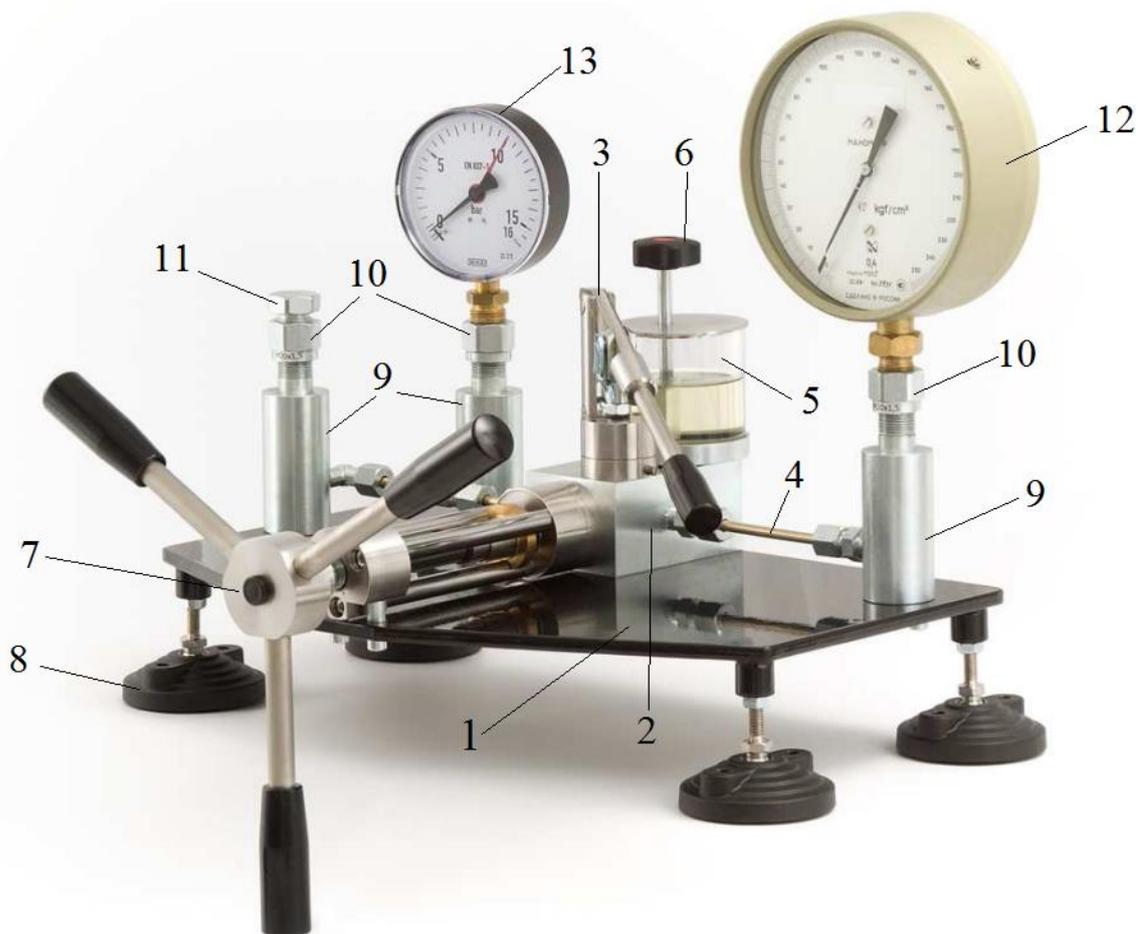
### ***Практическая часть***

Используемое оборудование: поверяемый манометр, эталонный цифровой манометр, гидравлическая установка сравнительной калибровки (ГУСК).

#### *Конструкция и принцип работы ГУСК*

Основание устройства выполнено в виде стальной плиты 1 (рис. 6.1), снабженной четырьмя регулируемыми опорами 8. На блоке создания давления

2 сверху закрепляются ручной насос 3, стакан для рабочей жидкости 5 и вентиль сброса давления 6. С боков от блока создания давления расположены стойки 9 с гайками 10 для присоединения образцового средства измерения 12 (правая стойка) и двух или одного поверяемых 13 (левые стойки). В случае поверки одного средства измерения в свободную стойку устанавливается заглушка 11. Блок создания давления и стойки соединены между собой с помощью фитингов и трубок высокого давления 4.



**Рис. 6.1. Гидравлическая установка для сравнительной калибровки: 1 – основание; 2 – блок создания давления; 3 – ручной насос; 4 – трубка высокого давления; 5 – стакан; 6 – вентиль сброса давления; 7 – штурвал; 8 – опора; 9 – стойки; 10 – присоединительные гайки; 11 – заглушка; 12 – образцовое СИ; 13 – поверяемое СИ.**

С помощью ручного насоса 3 рабочая среда перекачивается из стакана 5 в полости стоек 9 со средствами измерений. Ручной насос необходим для предварительного сжатия воздуха, оставшегося в присоединенных средствах измерений, с целью уменьшения его объема. Далее с помощью вращения штурвала 7 по часовой стрелке плавно создается необходимое давление. Для

уменьшения давления штурвал необходимо вращать в обратную сторону. Для сброса оставшегося давления предусмотрен вентиль сброса давления 6.

*Порядок выполнения работы:*

1) Провести внешний осмотр поверяемого манометра. Как было отмечено выше, не должно быть каких-либо видимых механических повреждений.

2) Определить число и значения поверяемых точек шкалы манометра, учитывая его класс точности.

3) Установить эталонный цифровой и поверяемый манометры в соответствующие стойки 9 путем вращения рукой присоединительных гаек 10 против часовой стрелки до тех пор, пока приборы не прижмутся к уплотнительным кольцам. Присоединительные гайки затягиваются от руки.

4) Закрыть вентиль сброса давления 6. Усилие должно быть небольшим.

5) Плавными движениями произвести накачивание ручным насосом 3. Величина создания давления ручным насосом зависит от диапазона измерения установленных СИ, но не должна превышать 3 МПа. Во время накачивания будет происходить уменьшение уровня рабочей жидкости в стакане 5. Необходимо следить, чтобы уровень жидкости не упал ниже минимальной отметки на стакане.

6) Вращением штурвала 7 по часовой стрелке плавно поднять давление до необходимой величины, отслеживая ее по эталонному цифровому манометру. Записать показания поверяемого манометра. При повышении давления необходимо периодически проверять степень закрытия вентиля сброса давления 6. Таким образом необходимо пройти все поверяемые точки шкалы.

7) Снять показания манометра в поверяемых точках при обратном ходе. Для снижения давления штурвал необходимо вращать против часовой стрелки.

8) Когда штурвал дойдет до состояния упора, снижать давление необходимо с помощью вентиля сброса давления.

9) Снять поверяемое СИ.

10) Рассчитать относительные погрешности показаний поверяемого манометра по формуле:

$$\delta = \frac{x_{изм} - x_{эт}}{x_n} \cdot 100 ,$$

где  $x_{изм}$  и  $x_n$  – показания и верхний предел шкалы поверяемого манометра соответственно;  $x_{эт}$  – эталонное поверяемое значение.

11) Рассчитать вариации по формуле (6.1). Записать результаты измерений в таблицу 6.1.

Таблица 6.1. Результаты поверки манометра.

№	Показания эталонного манометра, кгс/см <sup>2</sup>	Показания поверяемого манометра, кгс/см <sup>2</sup>		Относительные погрешности показаний поверяемого манометра, %	Вариации, %
		Прямой ход	Обратный ход		
1					
...					
n					

12) Сравнить значения погрешностей показаний поверяемого манометра и вариаций с его пределами допускаемой основной погрешности и сделать заключение о результатах поверки.

**Контрольные вопросы:**

1. Что называют поверкой? Какие виды поверки вы можете назвать?
2. При каких условиях проводится внеочередная поверка?
3. Назовите основные методы поверки. В чем их принципиальное различие?
4. Каково должно быть соотношение между допускаемыми погрешностями эталонного и поверяемого СИ? На основании чего они устанавливаются?
5. На основании чего определяется количество поверяемых точек шкалы?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

### ПОСТРОЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ ГРАДУИРОВОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОМЕТРА СОПРОТИВЛЕНИЯ

**Цель работы:** освоить построение линейной градуировочной характеристики (ГХ) методом наименьших квадратов (МНК), научиться расчету погрешности расчетных значений ГХ и погрешностей измерений на основе полученной ГХ.

#### **Теоретические сведения**

Между входной величиной  $x$  и выходной величиной  $y$  измерительного прибора или преобразователя существует определенная функциональная зависимость  $y = f_u(x)$ , которая называется истинной *функцией преобразования*.

Экспериментально определяя зависимость между входными и выходными величинами изучаемого средства измерения, получают функцию

$$y = f(x), \quad (7.1)$$

которая называется *градуировочной характеристикой* средства измерений. Процесс определения ГХ называется градуировкой средства измерения.

Построение ГХ основывается на совместном измерении величин на входе и выходе СИ. В результате получается ряд измеренных значений  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1...N$ , по которому и строят экспериментальную ГХ. Далее полученную ГХ используют для определения входных величин по выходным.

ГХ средства измерений может быть представлена в аналитической, графической или табличной форме. Выбор способа задания ГХ зависит от ее сложности и способа использования СИ. На практике, если это возможно, предпочитают использовать аналитическую форму ГХ. Наиболее распространенными являются линейные ГХ:  $y = a+bx$ . Встречаются также и нелинейные ГХ, например, квадратичная:  $y = ax^2$ , или логарифмическая:  $y = a \lg x$ .

При определении входной величины с помощью ГХ вида (7.1) обычно используют оценку  $x = f^{-1}(y)$ , где  $f^{-1}$  – функция, обратная к  $f$ . В связи с этим предлагается определять вместо обычной прямой ГХ вида (7.1) обратную ГХ

$$x = f(y), \quad (7.2)$$

которую можно было бы прямо использовать для нахождения входной величины.

Выбор вида ГХ должен обосновываться на соотношении погрешностей входной и выходной величин. Если относительные погрешности измерений входной величины пренебрежимо малы по сравнению с погрешностями выходной величины  $\delta_x \ll \delta_y$ , то строят обычную ГХ вида (7.1). В противном случае целесообразнее строить обратную ГХ вида (7.2). Таким образом, при построении ГХ в качестве аргумента следует выбирать ту величину, которая измеряется со значительно большей точностью.

Экспериментально определенная ГХ  $y = f(x)$  будет отличаться от истинной функции преобразования  $y = f_u(x)$ . Погрешность ГХ  $f(x)$  в точке  $x$  будет определяться ее отклонением от  $f_u(x)$ :  $\xi[y(x)] = f(x) - f_u(x)$ . Для ГХ, представленной в аналитической форме, эта погрешность будет обусловлена погрешностями  $\xi_u(x)$  измерений  $x_i$  и  $y_i$ , а также погрешностью аппроксимации  $\xi_a(x)$  истинной зависимости  $f_u(x)$  с помощью функций того класса, в котором мы ищем ГХ (например, погрешность из-за нелинейности  $f_u(x)$  при построении линейной ГХ).

Таким образом для абсолютной погрешности построенной ГХ будем иметь:

$$\xi[y(x)] = \xi_a(x) + \xi_u(x) \quad (7.3)$$

Широко известным методом построения ГХ является *метод наименьших квадратов*. Применение МНК обосновано, если погрешности измерений входных величин пренебрежимо малы или в случае, когда входная величина является контролируемой, т. е. если есть возможность устанавливать заранее выбранные значения  $x_1, \dots, x_N$ .

Рассмотрим построение ГХ по экспериментальным данным  $(x_i, y_{ij})$ , где  $x_i$  известно точно,  $i = 1..N$ ,  $j = 1..n_i$ ,  $N$  – число измеряемых точек,  $n$  – число измерений в  $i$ -ой точке. Предположим, что результаты измерений равноточны, то есть случайные погрешности независимы, имеют равное нулю среднее

значение и одинаковые дисперсии  $\sigma^2$ . Также рассмотрим наиболее распространенный случай равной кратности (одинакового числа) наблюдений во всех точках:  $n_i = n$ . В данном случае ГХ удобно представить в виде:

$$y = a_0 + b(x - \bar{x}), \quad (7.4)$$

где  $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ .

Оценки коэффициентов ГХ по методу наименьших квадратов находят из условия минимума суммы квадратов отклонений экспериментальных точек от прямой (вдоль оси  $y$ ). Оценки наименьших квадратов имеют вид:

$$a_0 = \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i, \quad (7.5)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i (x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (7.6)$$

где  $\bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}$ .

В математической статистике анализ погрешностей построенной ГХ выполняется в предположении, что имеются лишь случайные погрешности наблюдений, а систематические погрешности отсутствуют. В этом случае оценка СКО случайной погрешности расчетного значения построенной ГХ в точке  $x$  имеет вид:

$$S_{сл}(x) = S \sqrt{\frac{1}{Nn} + \frac{(x - \bar{x})^2}{n \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}}, \quad (7.7)$$

где  $S = \sqrt{\frac{1}{N(n-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}$  – СКО результатов наблюдений.

Если случайные погрешности результатов наблюдений имеют нормальные распределения, то доверительные границы случайной погрешности расчетного значения построенной ГХ в точке  $x$  определяются по формуле:

$$\Delta_{cl}(x) = t(P, n)S_{cl}(x) \quad (7.8)$$

В случае линейной ГХ вида (7.4) оценку входной величины  $x$  находят по формуле:

$$x = \bar{x} + \frac{y - a_0}{b} \quad (7.9)$$

Доверительные границы абсолютной погрешности данной оценки будут определяться выражением:

$$\Delta_x(x) = \frac{\Delta(x) + \Delta_y}{b}, \quad (7.10)$$

где  $\Delta(x) = \Delta_{cl}(x)$  при условии отсутствия систематических погрешностей,  $\Delta_y$  – доверительные границы абсолютной погрешности результатов измерения выходной величины  $y$ .

### ***Практическая часть***

Используемое оборудование: термометр сопротивления, термостат, мультиметр, блок питания.

В данной работе необходимо построить ГХ между значениями температуры, устанавливаемой термостатом, и величиной выходного токового сигнала 4-20 мА измерительного преобразователя термометра сопротивления. Измерение токового сигнала необходимо осуществлять с помощью мультиметра по схеме, приведенной на рис. 7.1.

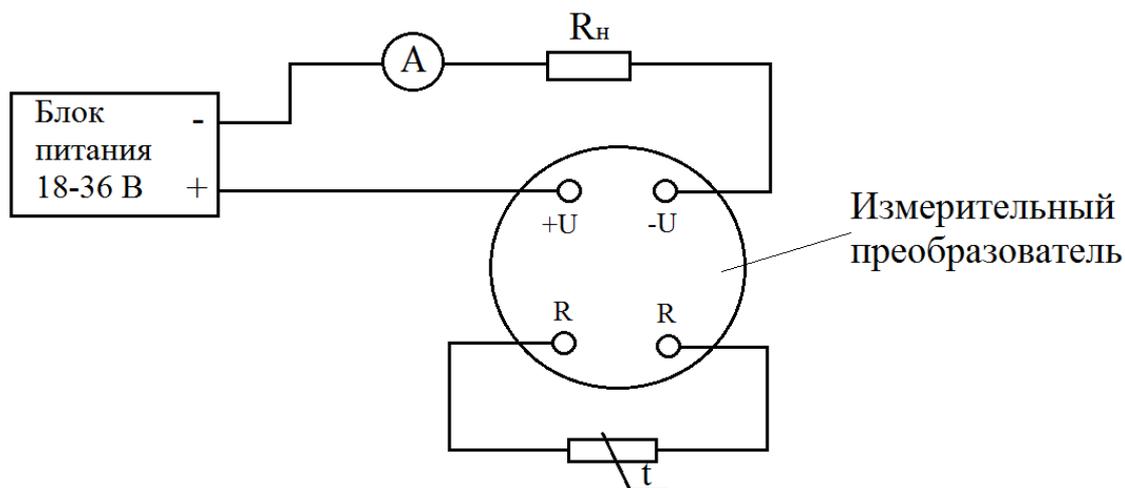


Рис. 7.1. Схема подключения термометра сопротивления.



Рис. 7.2. Общий вид термостата: 1– ванна; 2 – кнопки установки температуры; 3 – индикаторное табло; 4 – кнопка включения сети.

*Порядок выполнения работы:*

1) Собрать измерительную цепь согласно рис. 7.1. Включить термостат и блок питания в сеть. Уровень воды в ванне должен быть примерно на 20 мм ниже ее краев.

2) Установить термометр в отверстие 6 на крышке термостата 7 (рис. 7.2).

3) Включить термостат кнопкой включения сети 4. С помощью кнопок 2 установить температуру 30 °С. Дождаться установления заданной температуры, текущее значение которой отображается на индикаторном табло 3.

4) После установления температуры произвести 10 измерений величины тока в цепи с помощью мультиметра. Осуществить аналогичные измерения для температур 40-90 °С с шагом 10 °С. В каждой серии также произвести по 10 измерений.

5) Найти средние значения  $\bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}$ .

6) Найти коэффициенты ГХ по формулам (7.5) и (7.6).

7) Получить расчетные значения  $y_{i,расч}$  по полученной ГХ, подставляя в аналитическую формулу ГХ используемый при измерениях ряд значений  $x_i$ . Свести полученные результаты в таблицу 7.1.

Таблица 7.1. Результаты измерений и расчетных значений ГХ.

№	$x_i$	$\bar{y}_i$	$y_{i,расч}$
1			
2			
...			
N			

8) Построить на одном графике с помощью Microsoft Office Excel измеренные точки  $(x_i, y_i)$  и полученную ГХ по точкам  $(x_i, y_{i,расч})$ . На основе графического анализа сделать вывод о правильности выбора линейной ГХ.

9) Установить на термостате произвольную температуру в диапазоне 30÷90 °С и произвести 10 измерений выходной величины  $y$ .

10) С помощью полученной ГХ рассчитать температуру, используя формулу (7.9).

11) Рассчитать погрешность полученного значения температуры по формулам (7.7) – (7.10).

***Контрольные вопросы:***

1. Что называется градуировочной характеристикой СИ?
2. Каков принцип построения ГХ?
3. В каких формах может быть представлена ГХ средства измерения?
4. На чем основывается выбор прямого или обратного вида ГХ?
5. В каких случаях обоснован метод наименьших квадратов при построении ГХ?
6. Чем обусловлено отклонение значений построенной ГХ от истинной функции преобразования?
7. Напишите формулу расчета границ абсолютной погрешности измерений при использовании построенной ГХ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. М.: Стандартиформ, 2014. 56 с.
2. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. М.: Стандартиформ, 2013. 20 с.
3. ГОСТ 166-89. Штангенциркули. Технические условия. М.: ИПК издательство стандартов, 2003. 11 с.
4. ГОСТ 6507-90. Микрометры. Технические условия. М.: ИПК издательство стандартов, 2004. 12 с.
5. ГОСТ 8074-82. Микроскопы инструментальные. Типы, основные параметры и размеры. Технические требования. Государственный комитет СССР по стандартам. М.: Издательство стандартов, 1986. 23 с.
6. МИ 2124-90. Государственная система обеспечения единства измерений. Манометры, вакуумметры, мановакуумметры, напорометры, тягомеры и тягонапорометры показывающие и самопишущие. Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. М.: ВНИИМС, 1990. 24 с.
7. Бикулов А. М. Поверка средств измерений давления и температуры. М.: АСМС, 2005. 405 с.
8. Зайцев С. А., Куранов А. Д., Толстов А. Н. Допуски и технические измерения. М.: Издательский центр "Академия", 2013. 304 с.
9. Радкевич Я. М., Схиртладзе А. Г., Лактионов Б. И. Метрология, стандартизация и сертификация. М.: "Высшая школа", 2006. 800 с.
10. Семенов Л. А., Сирая Т. Н. Методы построения градуировочных характеристик средств измерений. М.: Издательство стандартов, 1986. 128 с.
11. Сергеев А. Г., Латышев М. В., Терегеря В. В. Метрология, стандартизация и сертификация. М.: Логос, 2003. 536 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ПОДБОР СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ ЗАДАНИЮ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ.....	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ .....	8
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	17
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ С ПОМОЩЬЮ ШТАНГЕНЦИРКУЛЯ И МИКРОМЕТРА.....	21
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ НА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ МИКРОСКОПЕ .....	27
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. ПОВЕРКА ТЕХНИЧЕСКОГО МАНОМЕТРА.....	36
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7. ПОСТРОЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ ГРАДУИРОВОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОМЕТРА СОПРОТИВЛЕНИЯ.....	43
ЛИТЕРАТУРА .....	50

Борис Владимирович ГРИГОРЬЕВ

Евгений Вячеславович ЗАЙЦЕВ

## МЕТРОЛОГИЯ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Учебно-методическое пособие  
к лабораторным работам для студентов II курса  
направлений 16.03.01 Техническая физика, 15.03.06 Мехатроника и  
робототехника, 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника

Подписано в печать \_\_\_\_\_ г. Тираж \_\_\_\_\_ экз  
Объем \_\_\_\_\_ усл. печ. л. Формат 60x84/16. Заказ № \_\_\_\_\_.  
Издательство Тюменского государственного университета  
625003, г. Тюмень, ул. Семакова, 10