

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Кафедра общей физики

**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ
В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ
ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ**

**ПРИЛОЖЕНИЕ
К СБОРНИКУ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Учебно-методическое пособие

Составитель

К.А. Овчинников

МОСКВА 2003

УДК 531.7:53.082(2-5):621.317

ИЗ7

Рецензент Д.А. Александров

**Измерительные приборы в лабораторном практикуме
ИЗ7 по общей физике. Приложение к сборнику лабораторных
работ: Учебно-методическое пособие / Сост.: К.А. Овчинников.
М.: МФТИ, 2003. — 48 с.**

Предлагаемое учебно-методическое пособие представляет собой краткое систематизированное описание измерительных приборов, используемых в лабораторном практикуме. Приводятся основные сведения об измерительных приборах, правила работы с ними и технические характеристики с указанием способов включения.

Пособие является приложением к «Лабораторному практикуму по общей физике» для студентов первого курса.

УДК 531.7:53.082(2-5):621.317

© Московский физико-технический институт
(государственный университет), 2003
© Овчинников К.А., составление, 2003

Оглавление

1. Приборы для измерения линейных размеров	4
1.1. Линейка.....	4
1.2. Штангенциркуль	6
1.3. Микрометр.....	8
1.4. Оптические приборы для измерений длин	10
2. Приборы для измерения массы	13
3. Приборы для измерения давления и вакуума.....	18
3.1. Манометр и вакуумметр образцовые	18
3.2. Мембранный манометр	20
3.3. Жидкостный U-образный манометр.....	21
3.4. Микрометрический манометр	22
3.5. Термопарный манометр	23
3.6. Ионизационный манометр.....	26
4. Приборы для измерения температуры	29
4.1. Жидкостный термометр	30
4.2. Термопара.....	31
4.3. Терморезистор	31
5. Приборы для измерения расхода газа.....	32
5.1. Газовый счётчик	32
6. Приборы для измерения силы тока и напряжения в электрических цепях	33
6.1. Стрелочные приборы	34
6.2. Цифровые приборы	37
7. Приборы для измерения сопротивления, индуктивности и ёмкости – измерительные мосты	41
7.1. Универсальный измерительный прибор Р4833	42
8. Приборы для измерения времени, частоты и визуализации быстропротекающих процессов	43
8.1. Электронно-лучевые приборы	46

1. Приборы для измерения линейных размеров

Для абсолютных измерений линейных размеров применяют приборы, работа которых основана на непосредственном сравнении измеряемой величины с эталоном. Отличительным признаком таких приборов является наличие у них шкал (штриховых мер), с которыми сравнивается измеряемая линейная величина. Точность отсчёта, связанную с оценкой доли делений шкалы, повышают с помощью нониусов. Точность измерительных средств ограничена точностью изготовления штриховых мер. Для оценки достоверности результата измерения учитывают погрешности нанесения штриховых шкал. Эти погрешности указываются в аттестатах на приборы.

Наиболее распространенными измерительными средствами для абсолютных измерений являются штриховые линейки, различные штангенинструменты, измерительные микроскопы.

1.1. Линейка

Для определения линейных размеров (длин или расстояний между предметами) применяют линейки (рис. 1.1) с пределом измерения до 1000 мм и ценой деления 1 мм. При измерениях, не требующих высокой точности, используют деревянные и пластмассовые линейки. Как правило, погрешность нанесения делений у таких линеек не превышает половины цены деления шкалы, что составляет $\pm 0,5$ мм. Для более точных измерений применяют металлические линейки, точность которых определяется стандартом (ГОСТ 427-78), согласно которому отклонения значений сантиметровых делений не должны превышать $\pm 0,10$ мм, а миллиметровых — $\pm 0,05$ мм. Такую точность можно реализовать, используя для отсчёта, например, лупу с десятью равноотстоящими друг от друга делениями, приходящимися на одно миллиметровое деление линейки. Это позволяет проводить отсчёт при измерении по делениям лупы с ценой 0,1 мм.

Обычно при однократных измерениях отсчёт делают «на глаз». Если предположить, что при этом можно отсчитать примерно 0,2 миллиметрового деления, то 0,2 мм окажется той величиной погрешности, которая допускается при отсчёте. Вопрос о том, какая часть деления может быть отмечена (отсчитана) «на глаз», зависит от остроты зрения. В свою очередь острота зрения характеризуется тем минимальным промежутком между двумя объектами (точками), которые глаз экспериментатора в состоянии видеть раздельно. Для нормального зрения такой промежуток (на расстоянии наибольшего зрения – 25 см) равен примерно 0,1 мм, что отвечает дифракционному и физиологическому пределу разрешения глаза. Так как этот предел не одинаков для всех экспериментаторов, то критерий отсчёта, зависящий от индивидуальной особенности зрения, не может быть общепризнанным. Поэтому принято производить отсчёт делений по ближайшему штриху шкалы. Тогда в первом приближении наибольшую погрешность при измерениях с общим упором принимают равной половине миллиметрового деления шкалы линейки. Это вполне оправдано, если учесть, что в такую погрешность входят ошибка параллакса (0,1–0,2 мм), погрешность в нанесении сантиметровых делений (0,2 мм), а также неодинаковая толщина штрихов. Относительный вклад перечисленных ошибок нельзя заранее предсказать и установить закон их распределения. Поэтому приходится ограничиваться указанием только области существования инструментальной погрешности прибора, которая определяется пределом допустимой погрешности и всегда рассматривается как его систематическая погрешность. Величина предельной допустимой погрешности с использованием общего упора, как изображено на рисунке 1.1, будет равна $\pm 0,5$ мм, и результат измерения будет записан $81,0 \pm 0,5$ мм.

На практике торцевые грани измеряемого объекта совмещают «на глаз» с нулевым и отсчитываемым штрихами линейки, т. е. производят отсчёт два раза с величинами погрешности, как отмечалось выше, по $\pm 0,5$ мм. Тогда величина наибольшей допустимой погрешности без использования об-

щего упора (в отличие от рис. 1.1) будет равна $\pm 1,0$ мм, и результат измерения будет записан $81,0 \pm 1,0$ мм.

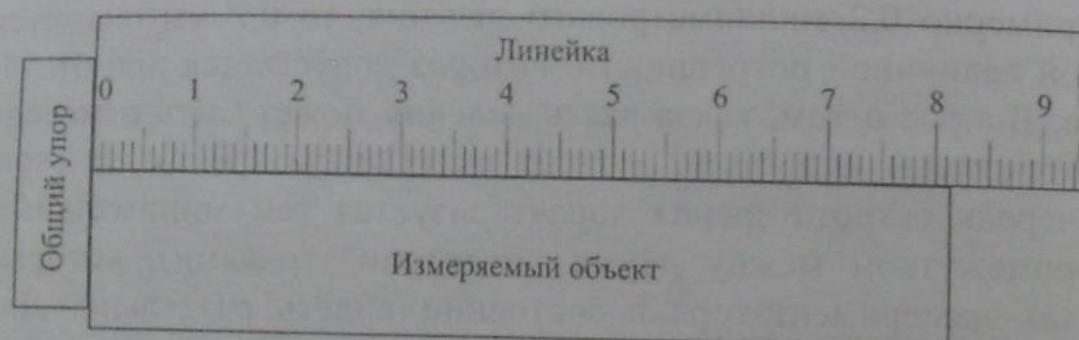


Рис. 1.1. Линейка

В случаях, когда точность измерения линейкой не достаточно, применяют штангенинструменты, в которых используется дополнительная шкала – нониус. В основе отсчёта по нониусу лежит способность глаза более точно определять совпадение или несовпадение делений двух совмещённых шкал, чем оценивать долю деления шкалы линейки на глаз.

1.2. Штангенциркуль

Штангенциркуль предназначен для измерения наружных и внутренних линейных размеров тел, внешних и внутренних диаметров цилиндров с величинами отсчёта 0,1; 0,05 или 0,02 мм. Его внешний вид показан на рисунке 1.2.

Он состоит из штанги и подвижной части (ползунка). Штанга и подвижная часть изготавливаются из высококачественной инструментальной стали и имеют специальные выступы ("губки") для фиксации их у начала и конца измеряемого тела. На штанге нанесена миллиметровая шкала, штрихи которой имеют строго одинаковую толщину и составляют 0,05 мм. На подвижной части штангенциркуля нанесена вспомогательная шкала (нониус), позволяющая определять размер с соответствующей точностью. Вспомогательная шкала имеет десять делений, каждое из которых на 0,1 мм меньше 2 мм. Если толщина предмета равна нулю, то начала основной и вспомогательной шкал, а также 10-е деление вспомогательной и 19-е деление основной шкалы совпадают.

Сдвиг подвижной части на 0,1 мм обеспечивает совпадение первого деления вспомогательной шкалы со вторым делением основной, сдвиг на 0,2 мм – совпадение второго деления вспомогательной шкалы с четвёртым делением основной и т. д. Таким образом, измеряемая величина равна целому числу миллиметров основной шкалы, расположенных слева от нулевого деления вспомогательной шкалы, плюс число десятых, равное номеру совпадающего деления вспомогательной шкалы с делением основной шкалы.

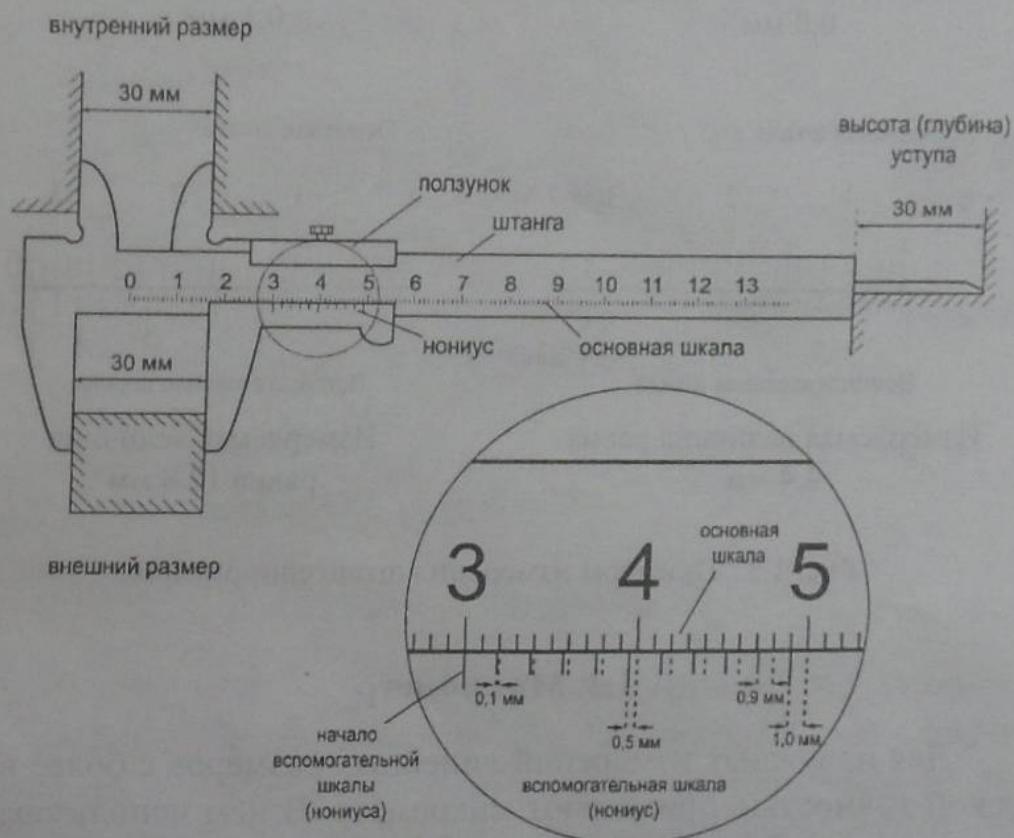


Рис. 1.2. Штангенциркуль

Допустимую погрешность при измерении штангенциркулем принимают равной величинам отсчетов, т. е. цене деления по нониусу. Например, при цене деления по нониусу 0,1 мм допустимая погрешность составляет $\pm 0,1$ мм.

На рисунке 1.3 приведены примеры расположения шкал на штангенциркуле при различных значениях измеряемых в-

личин. Стрелками указаны совпадающие штрихи основной и вспомогательной шкал.

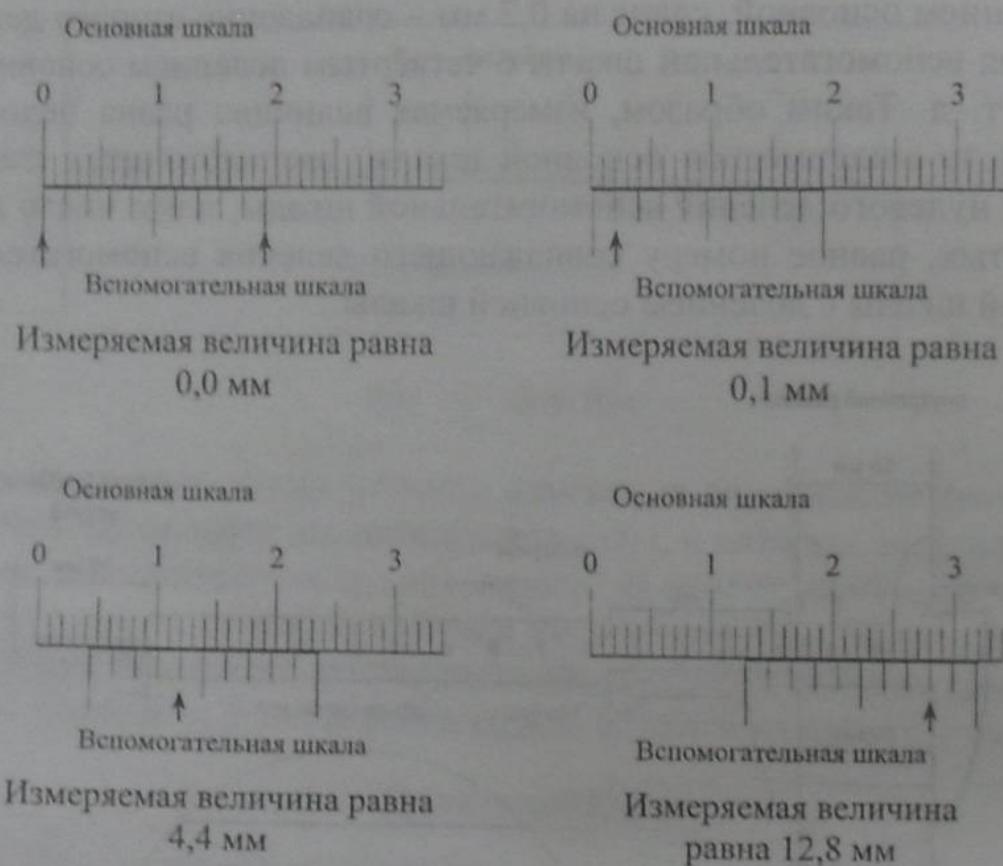


Рис. 1.3. Примеры измерения штангенциркулем

1.3. Микрометр

Для наружных измерений линейных размеров с более высокой точностью применяют микрометр. В нём использована связь угла поворота винта и его перемещения вдоль оси вращения. Для получения хорошей точности используются винты с малым, точно выдержаным шагом. Обеспечить такую точность оказывается возможным на длине не больше 25 мм, поэтому диапазон измерения микрометром ограничен этой величиной. Микрометры изготавливаются на диапазоны 0–25 мм, 25–50 мм и т. д. На рисунке 1.4 показан микрометр, зафиксированный на величину 6,85 мм.

Корпус микрометра состоит из жёстко связанных стебля и скобы. На поверхности стебля имеется двойная шкала для определения осевого смещения винта. Деления шкалы нанесены через 1 мм вдоль оси стебля снизу и со сдвигом на 0,5 мм сверху от продольной линии в сторону барабана. Барабан жёстко связан со стеблем микрометрическим винтом. При вращении барабана вращается микрометрический винт, перемещаясь вдоль оси стебля. Шаг винта равен 0,5 мм. На сужающейся поверхности барабана по окружности нанесена

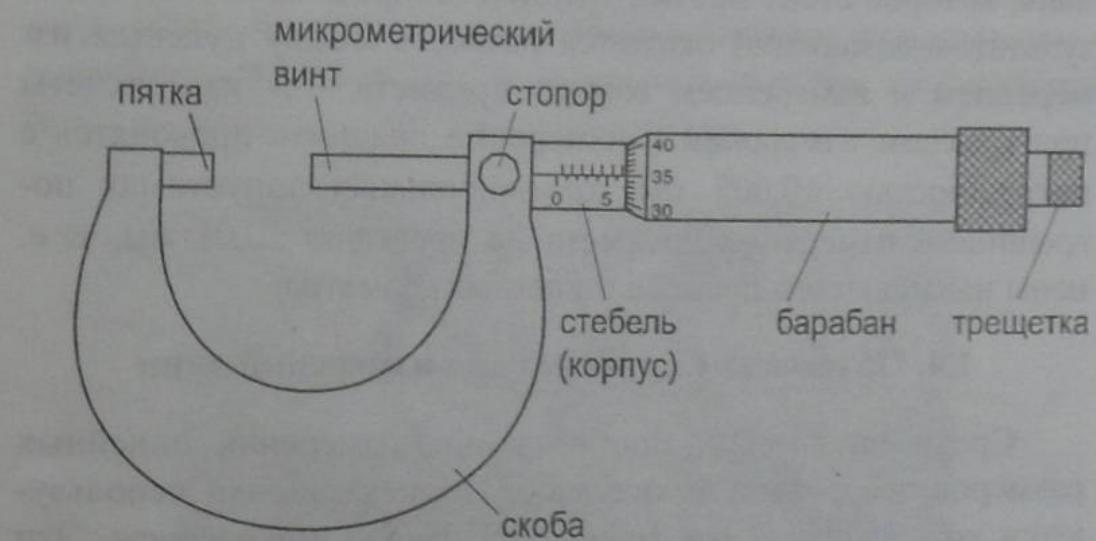


Рис. 1.4. Микрометр

шкала, имеющая 50 делений. Таким образом, при повороте барабана на одно деление винт смещается на 0,01 мм с допустимой погрешностью до $\pm 0,005$ мм. Измеряемый объект помещается внутри скобы между пяткой и торцом винта, поверхности которых плоскопараллельны и полированы. Перемещение микрометрического винта производится вращением трещотки, а не барабаном. Она соединена с барабаном через пружинный механизм, который ограничивает силу давления 7 ± 2 Ньютона на измеряемый предмет. Этим обеспечивается сохранность микрометра и предмета от деформаций в местах их непосредственного касания. Стопор служит для фиксации установленного размера.

Перед началом работы с микрометром необходимо убедиться, что шкала не сбита. Для этого проводят нулевое измерение: при помощи трещотки винт приводят в контакт с пяткой и записывают значение, соответствующее шкале барабана. Часто оно не равно нулю. Для надёжности проводимых измерений необходимо несколько раз при помощи трещотки привести предмет в контакт с рабочими поверхностями. Размером предмета будет являться величина, состоящая из открытых делений на шкале стебля и значения на шкале барабана, которое стоит против средней линии шкалы стебля. Результатом измерений окажется разность между нулевым измерением и измерением самого предмета. Так как отсчёты при нулевом измерении и измерении предмета проводятся с погрешностью $\pm 0,005$ мм, то наибольшая допустимая погрешность измерения предмета не превысит $\pm 0,01$ мм, т. е. цены наименьшего деления шкалы микрометра.

1.4. Оптические приборы для измерений длин

Среди оптических приборов для измерения линейных размеров тел в физических лабораториях широко используются *компараторы для измерений длин* и *микроскопы*. Эти приборы позволяют получать увеличенные изображения мелких предметов, расположенных на близком расстоянии от наблюдателя. Микроскопы снабжаются окулярными микрометрами. Их градуировка производится при помощи стеклянных пластинок с образцовыми шкалами. Устройство, принцип работы и градуировка таких приборов подробно описана в учебном пособии «Лабораторный практикум по общей физике» (работа 1.1.2).

При помощи компараторов для измерений длин линейные размеры тел сравнивают с расстоянием между штрихами образцовой шкалы (или с концевыми мерами длины). В качестве измерительных устройств в компараторах применяют интерферометры, микроскопы с окулярным винтовым, шкаловым или оптическим микрометрами и др. В качестве примера приведём описание и метод работы с компаратором

ИЗА-2 (горизонтальный измеритель длин). Общий вид этого прибора изображен на рисунке 1.5.

Горизонтальный измеритель длин ИЗА-2 предназначен для измерения линейных размеров тел с допустимой погрешностью $\pm 0,001$ мм. Он представляет собой литую станину с жестко связанным кронштейном (1) и подвижным предметным столом (2). На кронштейне укреплены два микроскопа: слева – визирный (7), для наводки на граничные точки измеряемого образца, расположенного вдоль оси смещения стола; справа – отсчетный (4), для наводки на шкалу. Предметный стол имеет горизонтальную плексигласовую поверхность с желобом для установки измеряемого образца, под которой располагается зеркало для его подсветки.

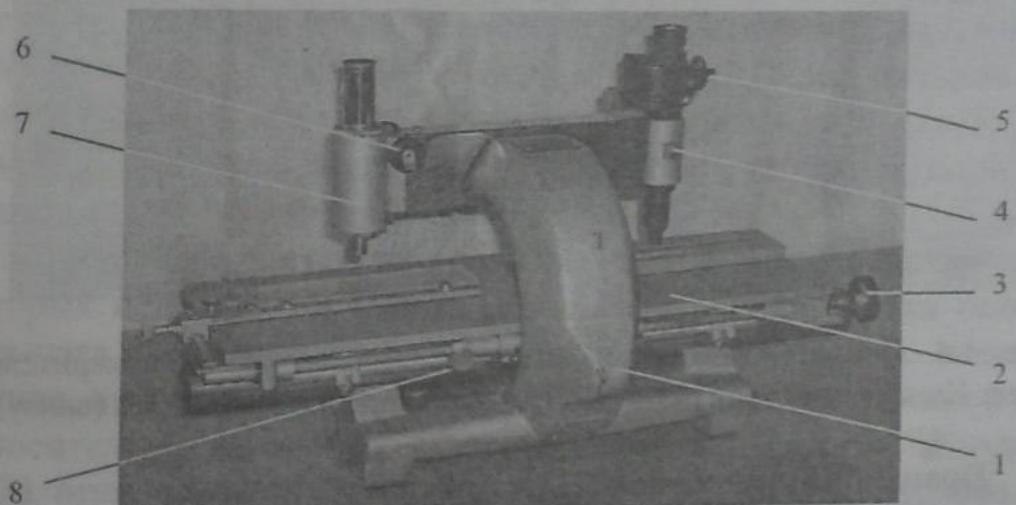


Рис. 1.5. Горизонтальный измеритель длин

Работа с прибором начинается с настройки микроскопов. В желоб плексигласовой поверхности предметного стола, примерно симметрично оптической оси визирного микроскопа, устанавливают образец. Поворотом оправ наружных линз окуляров добиваются чёткого изображения перекрестья нитей окуляра на визирном и окулярной шкалы на отсчётном микроскопах. (Такая настройка окуляров производится каждым наблюдателем индивидуально). Вращением маховичка (6) на визирном микроскопе добиваются чёткого изображения образца.

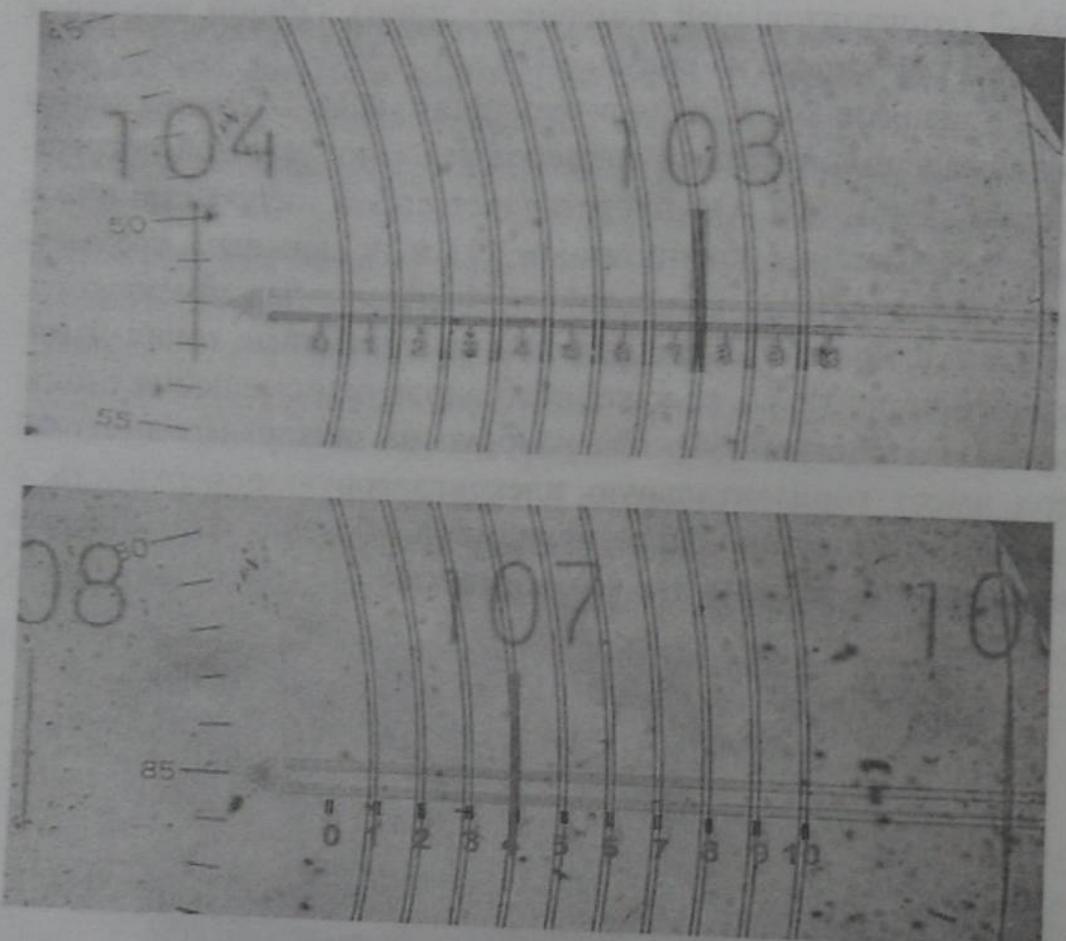


Рис. 1.6. Примеры показаний шкал на горизонтальном измерителе длин. Измеряемые величины 103,752 мм (вверху) и 107,385 мм (внизу)

Вращением маховика (3) при закреплённом винте (8) перемещают предметный стол, совмещая одну из границ образца с перекрестьем нитей окуляра визирного микроскопа. При настройке резкости необходимо следить за тем, чтобы не было параллакса, т. е. смещения границы образца относительно перекрестья при небольшом смещении глаза в горизонтальной плоскости. Для замера положения этой границы, вращением маховика (5) на отсчётном микроскопе добиваются совмещения видимого в поле зрения оцифрованного штриха шкалы предметного стола с любым из витков двойной спирали окулярной шкалы (см. рис. 1.6). При этом целому числу миллиметров будет соответствовать показание над таким штрихом. Десятым долям миллиметров будет соответ-

ствовать цифра, расположенная слева от штриха (целочисленного значения) под горизонтальным указателем, направленным на окулярную круговую шкалу. Каждый совпавший с указателем штрих соответствует сотым и тысячным долям миллиметров.

Аналогично производится замер положения второй границы того же образца. Его линейным размером будет величина, равная модулю разности между полученными замерами.

2. Приборы для измерения массы

В качестве приборов для определения массы тел по действующей на них силе тяжести используют весы. В зависимости от принципа действия весы подразделяются на рычажные, пружинные, крутильные, токовые и т. д. Перед началом их эксплуатации проверяют наличие установки на нулевую отметку. Для этого их снимают с арретира (стопора) и, по необходимости, производят настройку на «нуль».

Наиболее распространены рычажные весы, действие которых основано на законе равновесия рычага. Точка опоры рычага («коромысла» весов) может находиться либо посередине, в случае равноплечих весов, либо быть смещенной относительно середины, в случаях неравноплечих и одноплечих весов. Опорами рычагов служат обычно призмы и подушки из специальных сталей или твёрдого камня (агат, корунд). На равноплечих рычажных весах взвешиваемое тело уравновешивается гирями, а некоторое превышение (обычно на 0,05–0,1%) массы гирь над массой тела компенсируется моментом, создаваемым коромыслом (со стрелкой) из-за смещения его центра тяжести относительно первоначального положения (см. рис. 2.1). Нагрузка, компенсируемая смещением центра тяжести коромысла, измеряется с помощью отсчётной шкалы.

Цена деления s рычажных весов определяется формулой

$$s = k \frac{P_0 c}{gl},$$

где P_0 – вес коромысла со стрелкой, g – ускорение свободного падения, l – длина плеча коромысла, c – расстояние между центром тяжести коромысла и осью его вращения, k – коэффициент, пропорциональный углу φ (в радианах), который соответствует смещению стрелки на одно деление и зависит только от разрешающей способности отсчётного устройства. Цена деления, а следовательно, и чувствительность весов, можно в определённых пределах изменять за счёт перемещения специально установленных грузиков на каждом из плеч, меняя при этом расстояние c между центром подвеса (Ц.П.) и центром тяжести (Ц.Т.).

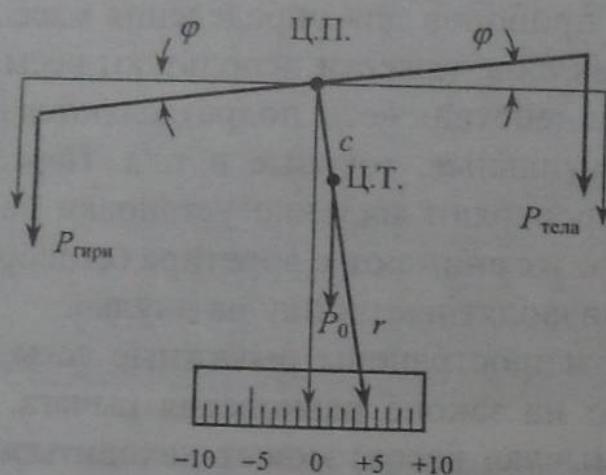


Рис. 2.1. Схема равноплечих рычажных весов

В лабораторном практикуме используются *аналитические* весы (рис. 2.2) со встроенным гириями на нагрузку. Принцип действия таких весов был предложен Д.И. Менделеевым. Гири специальной формы подвешиваются к плечу, на котором находится чашка для нагрузки.

Такие одноплечные весы полностью исключают погрешность из-за неравноплечности коромысла. Также они снабжены устройствами для повышения точности и скорости взвешивания: успокоителями колебаний коромысла, проекционными шкалами, повышающими точность отсчёта при малых углах отклонения коромысла, механизмами наложения и снятия встроенных гирь, дверцами, при открытии которых не возникает воздушных потоков и т. д.

Наряду с аналитическими весами, для взвешивания грузов с малыми массами, используются *пружинные* весы. В основу действия таких весов положен закон Гука. Их чувствительным элементом является пружина, деформирующаяся под действием веса груза. Показания пружинных весов отсчитывают по шкале, вдоль которой перемещается соединённый с пружиной указатель. После снятия нагрузки указатель возвращается в нулевое положение, т. е. в пружине не возникает остаточных деформаций. При помощи таких весов измеряют не массу, а вес. Однако в большинстве случаев шкала пружинных весов градуируется в единицах массы.

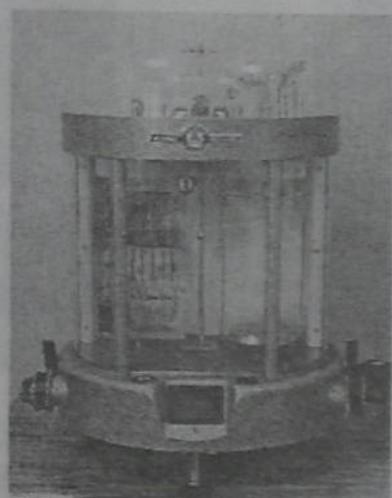


Рис. 2.2. Аналитические весы

В *крутильных* или *торсионных* весах (рис. 2.3) чувствительным элементом служит упругая нить или спиральные пружины. Нагрузка определяется по углу закручивания нити (пружины), который пропорционален создаваемому нагрузкой крутильному моменту. Поэтому такие весы предназначены для взвешивания малых масс различного вида веществ. Их настройка и эксплуатация производится следующим образом. С помощью регулировочных винтов ножек весы устанавливаются по уровню так, чтобы пузырёк воздуха находился в пределах наружной окружности.

В весах, изображённых на рисунке 2.3 слева, предусмотрен арретир (2), которым фиксируют рычаг подвеса в процесс-

се помещения или изъятия грузиков на чашечку (3), а также по окончании взвешивания. Регулировочная ручка (1) даёт возможность привести весы в «нулевое» положение. Для этого снимают арретир и ручкой настройки (4) устанавливают стрелку (5) (см. рис. 2.4) напротив красной черты циферблата. Вращением ручки (1) стрелку (7) (рис. 2.4) устанавливают на нулевую отметку шкалы.

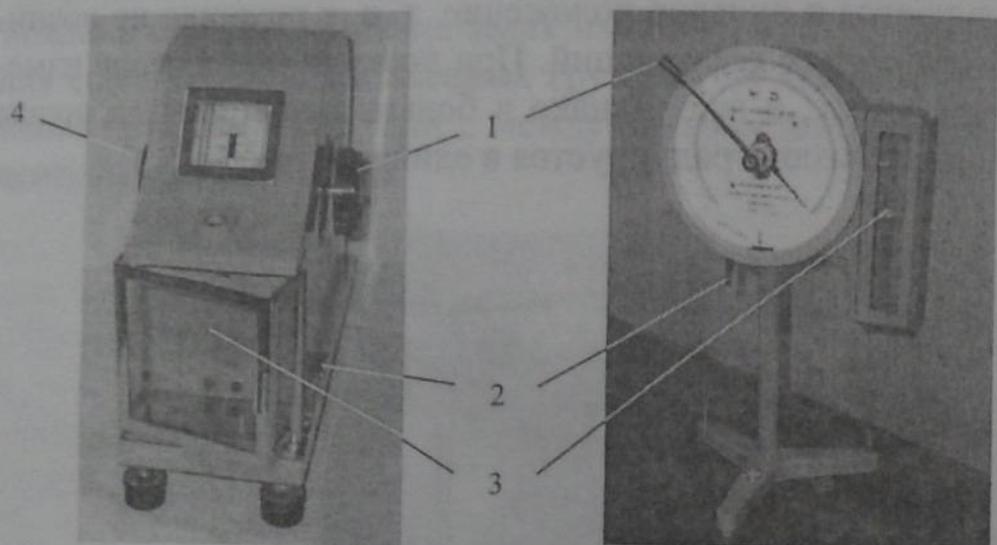


Рис. 2.3. Торсионные весы

В дальнейшем регулировочную ручку (1) не трогают, чтобы не сбить настройку весов в процессе измерений. Приступая к взвешиванию, ставят весы на арретир, открывают дверку предметного шкафа, а подготовленный к взвешиванию груз берут пинцетом и помещают на подвешенную чашечку (3) (либо подвешивают на крючок рычага подвеса). После закрытия дверки снимается арретир и вращением подвижной шкалы (8) ручкой (4) влево (от себя) устанавливают стрелку (5) на красной риске (6). Массу взвешиваемого груза считывают по шкале (8) в месте, указанном стрелкой (7). После отсчёта результата приводят шкалу в исходное («нулевое») положение вращением ручки (4) вправо (на себя).

Весы, изображённые на рисунке 2.3 справа, снимают с арретира передвижением рычага (2) вправо. Установка отсчётной стрелки на нулевое деление шкалы циферблата производится регулировочным поводком (1). Если контрольная

стрелка не совпадает с контрольным штрихом (в нижней части циферблата), необходимо провести тарировку весов. Для этого открывают дверку предметного шкафа и вращением тарировочного винта на рычаге подвеса чашечки для груза (3) совмещают стрелку с контрольным штрихом. Во время взвешивания установленного груза в чашечке плавно поворачивают поводок (1) до полного совмещения контрольной стрелки с контрольным штрихом. Результатом взвешивания являются показания отсчётной стрелки.

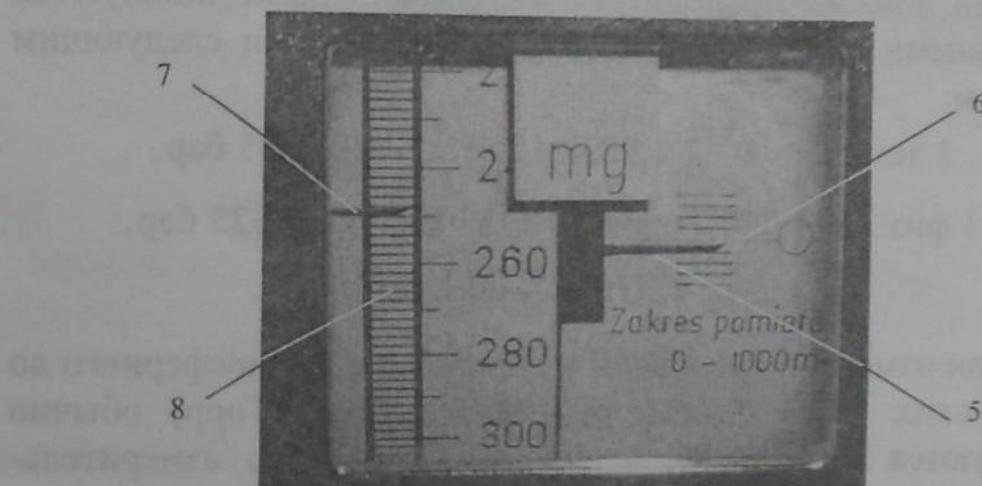


Рис. 2.4. Циферблат торсионных весов

Величина систематической погрешности при измерениях может оказаться больше нормативной, если не соблюдать требуемые условия эксплуатации. Так, например, весы торсионные ВТ-500 (рис. 2.3 справа) имеют пределы взвешивания от 10 до 500 мг и должны эксплуатироваться в пределах температур от 10 до 35 °С при относительной влажности не более 80% при 25 °С. Градуированы они при температуре $20,0 \pm 1,5$ °С и ускорении силы тяжести $9,81 \text{ м/с}^2$. Цена наименьшего деления шкалы составляет 1 мг. Пределы допускаемой погрешности весов при таких условиях эксплуатации не превышают ± 1 мг. Чувствительность: при перемещении отсчетной стрелки на одно наименьшее деление шкалы контрольная стрелка должна отклониться от контрольного штриха циферблата не менее чем на 0,5 мм.

3. Приборы для измерения давления и вакуума

В физической лаборатории используются различные типы приборов для измерений давлений. Это объясняется как физическими, так и технологическими причинами. Каждый такой прибор рассчитан на измерения в определённом диапазоне давлений, что связано с выбором подходящего для этого диапазона принципа его действия.

Диапазоны измерений обуславливают точность, с которой они должны проводиться. По этой причине пользуются различными единицами измерения, связанными следующим образом:

$$1 \text{ тех. атм} = 1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} = 98,0665 \text{ кПа} = 0,980665 \text{ бар},$$

$$1 \text{ физ. атм} = 760 \text{ Торр} = 101,325 \text{ кПа} = 1,01325 \text{ бар},$$

$$1 \text{ бар} = 10^6 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2} = 0,1 \text{ МПа}.$$

При измерении давлений в диапазоне от атмосферного до нескольких миллиметров ртутного столба (Торр) обычно пользуются *механическими манометрами*. Это измерительные приборы, в основу действия которых положено перемещение чувствительного элемента непосредственно под действием силы, вызываемой давлением. К ним относятся манометр и вакуумметр образцовые (манометр Бурдона), мембранный манометр (барометр-анероид), различные типы жидкостных манометров и другие.

Для измерений давлений в диапазоне от 1 до 10^{-3} Торр используются вакуумметры с термопарными датчиками. При измерении вакуума от 10^{-3} до 10^{-12} Торр применяют вакуумметры, датчиками которых являются ионизационные манометры.

3.1. Манометр и вакуумметр образцовые

Манометр и вакуумметр образцовые (рис. 3.1) предназначены для измерения избыточного или вакуумметрического давления и перепада давлений. Действие этих приборов осно-

вано на использовании зависимости между измеряемыми давлениями и упругой деформацией одновитковой трубчатой пружины, перемещение свободного конца которой передаточным механизмом преобразуется в угловое перемещение стрелки (манометр Бурдона). При увеличении давления в исследуемом объёме трубчатая пружина прибора будет раскручиваться и, наоборот, при уменьшении давления – скручиваться.

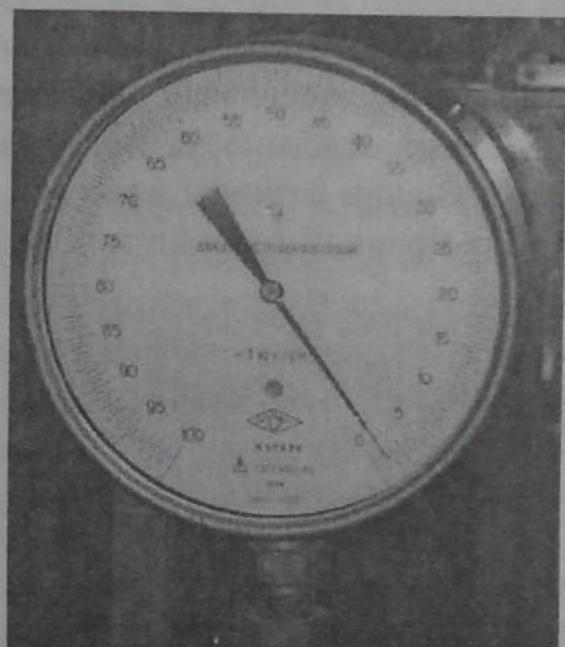


Рис. 3.1. Вакуумметр образцовый

Шкала вакуумметра круговая и имеет 100 условных единиц, что соответствует 1 технической атмосфере. Кроме того, она может быть продолжена за конечные отметки дополнительными делениями, которые служат для отсчёта отклонений показаний поверяемых рабочих приборов на нуле и верхнем пределе измерений.

Когда давление внутри и снаружи полости установки одинаково (например, атмосферное), стрелка вакуумметра должна указывать на нуль. Если в полости создать вакуум, стрелка отклонится влево и укажет на соответствующее значение шкалы. Результирующая разность давлений внутри и снаружи полости установки будет соответствовать давлению

$$P = \frac{n}{100} \cdot P_{\text{тех. атм}},$$

где $P_{\text{тех. атм}}$ – атмосферное давление (98,1 кПа), n – показание прибора.

Пределы допускаемой основной погрешности приборов составляют $\pm 0,4\%$ верхнего предела измерений при температуре окружающей среды $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$.

3.2. Мембранный манометр

Мембранный манометр (барометр-анероид) используется при измерении малых перепадов давлений (вплоть до 10^{-2} Торр). Его действие основано на деформации мембранный коробки при изменении разницы давлений внутри и снаружи её. Полость мембранный коробки может быть связана с

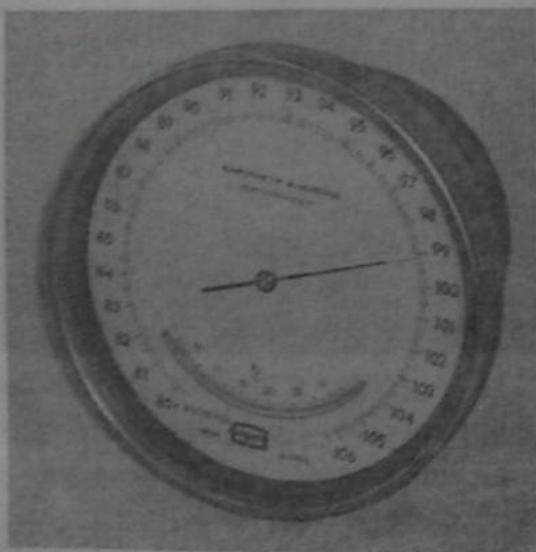


Рис. 3.2. Барометр-анероид метеорологический

полостью исследуемого объёма. Линейные перемещения мембран преобразуются передаточным рычажным механизмом в угловые перемещения указывающей стрелки прибора.

Беспружинный барометр-анероид метеорологический типа БАММ, изображенный на рисунке 3.2, предназначен для измерения перепадов атмосферного давления. Рабочее положение прибора – горизонтальное. Его шкала градуирована в мм рт. ст. (или кПа). К шкале прибора с его внутренней сто-

роны прикреплён ртутный термометр, по которому отсчитывается температура. Погрешность измерения атмосферного давления составляет не более 2,5 мм рт. ст.

3.3. Жидкостный U-образный манометр

При измерении разности давлений от 1 до 50 Торр пользуются жидкостными U-образными манометрами сравнения (рис. 3.3). В качестве показателя давления используют величину разности уровней рабочей жидкости в трубках манометра. Разность давлений определится как

$$\Delta P = (P_2 - P_1) = \rho g \cdot \Delta x,$$

где ρ – плотность жидкости в манометре, g – ускорение свободного падения, Δx – разность высот между уровнями. В зависимости от постановки задачи в качестве рабочей жидкости используют дистиллированную воду, спирт, вакуумное масло (ртуть использовать в негерметичных сосудах запрещено по критериям безопасности) и др. Тогда разность давлений будет равна величине, выраженной в миллиметрах водяного, масляного и т. п. столба. При использовании таких манометров необходимо позаботиться о том, чтобы пары рабочей жидкости не могли повлиять на изучаемые физические процессы. Для перевода таких результатов в Торры их необходимо умножить на отношение плотности жидкости к плотности ртути.

В вакуумных установках при малых перепадах давлений используют масляные манометры. Масло обладает низким давлением насыщенных паров. Ввиду низкой плотности масла ($\rho = 0,9 \text{ г}/\text{см}^3$), можно измерить только небольшие разности давлений (до нескольких Торр). Такие манометры в верхней части снабжаются соединительной трубкой с краном. Во время откачки и заполнения вакуумной установки воздухом атмосферного давления кран, соединяющий оба колена манометра, должен быть открыт. Этот кран закрывается только при измерении давления во время откачки либо напуске газа (воздуха) в малых порциях. Во избежание выброса масла из манометра и загрязнения установки одна из трубок оканчивается балластным баллоном, как это изображено на рисунке

3.3 слева. Следует учесть, что из-за большой вязкости масла уровни в манометре устанавливаются не сразу.

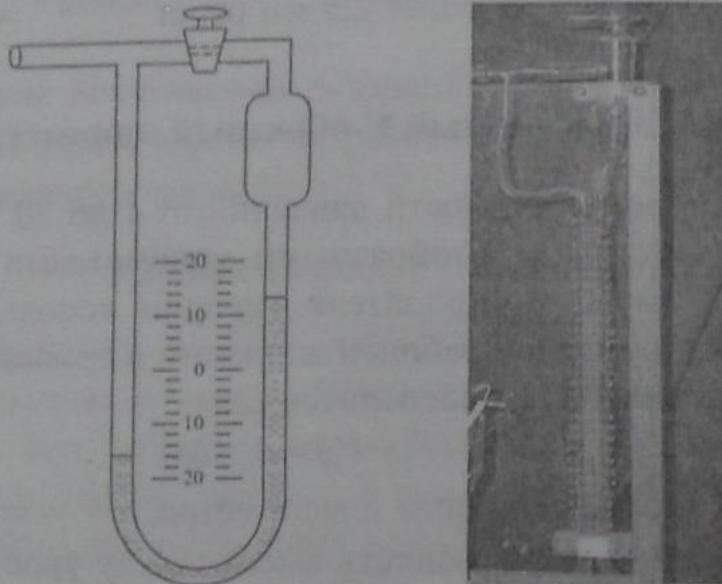


Рис. 3.3. Жидкостный U-образный манометр

3.4. Микрометрический манометр

Микрометрический манометр предназначен для измерения малых изменений давлений. В лабораторном практикуме используется микроманометр типа ММН (рис. 3.4), который позволяет измерять разность давлений до 200 мм вод. ст. Прибор устанавливается на горизонтальную поверхность. Точность установки горизонтали проверяется с помощью двух перпендикулярно расположенных на корпусе манометра уровней, а её настройка производится с помощью двух регулировочных ножек (3), расположенных в углах основания манометра, имеющего вид прямоугольного треугольника.

Для повышения чувствительности трубке (1) манометра придано наклонное положение. Изменение величины наклона приводит к изменению показаний на градуировочной шкале. Цифры 0,2; 0,3; 0,4; 0,6 и 0,8, нанесенные на стойке (2), имеющей вид дуги, обозначают коэффициент, на который должны быть умножены показания манометра при выбранном наклоне трубки (1). Трубка имеет шкалу с градуировкой

в миллиметрах водного столба, хотя рабочей жидкостью микроманометра является этиловый спирт. Разность давлений ΔP , выраженная в Паскалях, будет определяться как

$$\Delta P = 9,81 \cdot k \cdot N,$$

где k – коэффициент наклона трубы, N – количество отсчитанных по ней делений. Установка мениска рабочей жидкости на нуль шкалы производится с помощью изменения её уровня благодаря вращению винта (6), смещающего пробку (5) внутри сосуда (4) по вертикали. В силу того, что диаметр сосуда (4) много больше диаметра трубы (1), нуль отсчёта практически не зависит от высоты поднятия жидкости в ней.

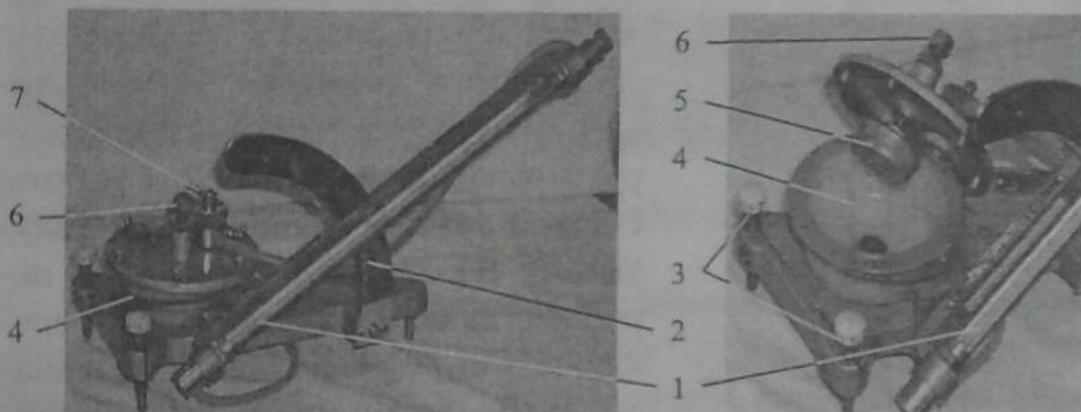


Рис. 3.4. Микрометрический манометр типа ММН

На крышке прибора установлен кран (7), ручка которого имеет два положения: рабочее «+» для проведения измерений разности давлений в лабораторной установке и нейтральное «0» – на атмосферу. Второе из них препятствует перетеканию рабочей жидкости в лабораторную установку, а также утечке из манометра при изменении атмосферного давления в нерабочее время.

3.5. Термопарный манометр

Для определения величины вакуума в объеме после откачки газа форвакуумным насосом (до 10^{-3} Торр) пользуются термопарными манометрами.

Такой манометр представляет собой стеклянный баллон (лампа¹ ПМТ-2), имеющий патрубок, соединяющий лампу с содержащимися в ней элементами с вакуумной установкой. Чувствительным элементом манометра является платино-платинородиевая термопара. Устройство термопары приведено на рисунке 3.5.

Спай 1 термопары T нагревается через тонкую проволочку, соединённую с никелевой нитью накала H , нагрев которой осуществляется током постоянной величины. Температура нити накала может изменяться в зависимости от давления газа в лампе. Вторые концы 2 и 2' термопары T соединены с массивными электрическими вводами лампы, имеющими температуру окружающей среды. Для работы с такой лампой используется вакуумметр ВТ-2А (рис. 3.6). На его передней панели расположены переключатели режима работы и диапазонов измерений и стрелочный прибор, используемый как для измерения тока через нить накала, так и для измерения термоэдс, возникающей из-за разности температур спая и окружающей среды.

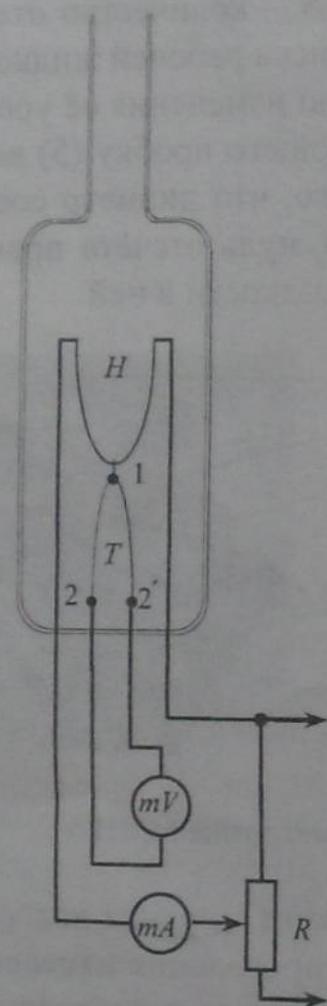


Рис. 3.5. Устройство и схема подключения термопарной лампы.

бботы «ТОК НАКАЛА», и с помощью ручки «РЕГУЛИРОВКА ТОКА НАКАЛА» (рис. 3.5, потенциометр R) устанавливают указанное на планшете для данной лампы значение тока по нижней шкале прибора. Диапазон измерений выставляется в

¹Старая маркировка лампы – ЛТ-2.

положение « $2 \cdot 10^{-1}$ – 10^{-3} » мм рт. ст., а режим работы – в положение «ИЗМЕРЕНИЕ». Прибор готов к измерениям.

В диапазоне давлений газа в лампе от атмосферы до ~1 мм рт. ст. показания вакуумметра практически не меняются и остаются на значении ~5 делений по средней шкале. Это нормально, т. к. коэффициент теплопроводности газа в этом



Рис. 3.6. Вакуумметр типа ВТ-2А

диапазоне от его давления не зависит. С приближением давления газа к ~1 мм рт. ст. стрелка начинает слабо реагировать. Зависимость показаний от величины давления в диапазоне измерений от $2 \cdot 10^{-1}$ до 10^{-3} мм рт. ст. достаточно велика. Параметры нити накала выбраны так, что именно в этом диапазоне длина свободного пробега соизмерима с диаметром нити накала, а поэтому на границе между нитью накала и газом величина температурного скачка¹ вносит основной вклад в теплоотвод. Он и вызывает зависимость термоэдс от давления газа. Величина термоэдс отсчитывается по средней шкале прибора (рис. 3.6 справа), а давление газа, соответствующее этим показаниям термоэдс, – по верхней шкале. С дальнейшим улучшением вакуума до 10^{-4} мм рт. ст., когда длина свободного пробега соизмерима с радиусом цилиндрического коллектора, все виды теплопотерь, связанные с газом, становятся много меньше потерь на теплопроводность клемм лам-

¹ Более подробное описание температурного скачка можно найти в учебном пособии «Лабораторный практикум по общей физике» (работа 2.2.2).

пы и излучения. По этой причине прибор перестаёт реагировать на дальнейшее улучшение вакуума.

Давление меньшее 10^{-4} мм рт. ст. используется для калибровки манометрической лампы. В режиме измерения при таком давлении через нить накала нужно установить ток, соответствующий отклонению стрелки на 100 делений шкалы вакуумметра.

3.6. Ионизационный манометр

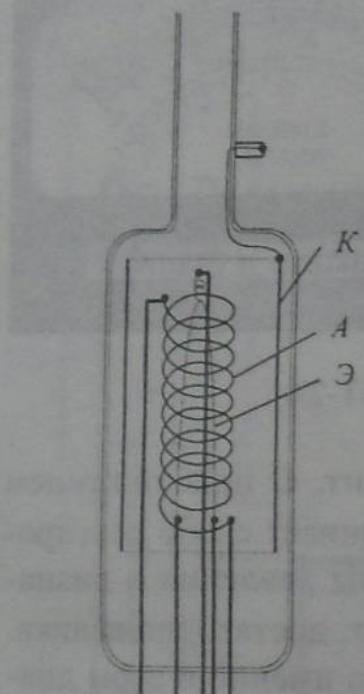


Рис. 3.7. Устройство ионизационной манометрической лампы

Вывод коллектора K осуществлён вдали от остальных электрических выводов для исключения токов утечки.

Принцип работы лампы следующий. Электроны вылетают из раскалённого катода. Прежде чем осесть на аноде, они успевают много раз пересечь пространство между катодом и коллектором. На своем пути электроны ионизируют молекулы газа. Образовавшиеся между анодом и коллектором ионы притягиваются полем коллектора и определяют его ток. Ионный ток в цепи коллектора пропорционален концентрации

молекул газа, а значит, и давлению остаточного газа, и поэтому может служить мерой давления. Вероятность ионизации зависит от рода газа, заполняющего лампу (а значит, и откачиваемый объем). Заводская калибровка вакуумметров ВИТ-1 и ВИТ-2 (рис. 3.8) соответствует остаточному давлению при откачке сухого воздуха при чувствительности манометрической лампы 10^{-1} А/Торр. При токе анода 5 мА, который является номинальным для работы манометра, вклад тока вторичных электронов, появляющихся за счет ионизации газа, пре-небрежимо мал.

Включение лампы ПМИ-2 при давлении выше 10^{-3} Торр может привести к преждевременному выходу её из строя ввиду быстрого окисления раскалённого катода и его перегорания. Поэтому категорически запрещается включать ионизационный манометр без контроля вакуумного пространства термопарным манометром с тем, чтобы иметь возможность включать измерение ионизационным манометром только при давлении меньшем 10^{-3} Торр.

Давление ниже 10^{-7} Торр не может быть измерено, так как фотоэлектронный ток с коллектора, который всегда существует из-за облучения коллектора рентгеновскими квантами и практически не зависит от давления, становится при таком малом давлении сравним с ионным током. То есть при дальнейшем уменьшении давления нарушается пропорциональность между давлением газа в приборе и величиной коллекторного тока.

Методика проведения измерений вакуумметром ВИТ-1А следующая. Перед включением сетевого питания необходимо поставить правый верхний тумблер в положение «ПРОГРЕВ», тумблер, расположенный посередине лицевой панели ВИТ-1А, – в положение «УСТАНОВКА НУЛЯ», тумблер под правым стрелочным прибором – в положение «ЭМИССИЯ» и тумблер «НАКАЛ» в нижнее положение (выключено). Включив сетевое питание, прибор прогревают в течение 2–3-х минут. После прогрева производятся настройка и измерения термопарной (левой) частью вакуумметра, которая описана в разделе «Термопарный манометр». По достижении вакуума

10^{-3} Торр переходят к работе с ионизационным манометром (правая часть вакуумметра), которая заключается в настройках усилителя ионного тока, тока эмиссии, калибровки чувствительности усилителя и самих измерений.

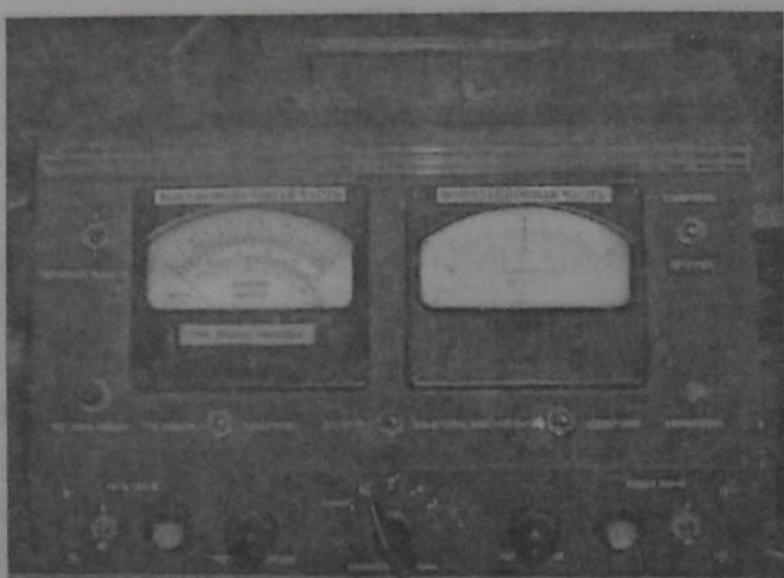


Рис. 3.8. Вакуумметр типа ВИТ-1А

Регулировка усилителя ионного тока производится с помощью потенциометра «РЕГУЛИРОВКА НУЛЯ» установлением стрелки измерительного (правого) прибора на нуль шкалы. Для этого тумблер из положения «ЭМИССИЯ» переводят в положение «ИЗМЕРЕНИЕ», а переключатель множителя шкалы – в положение « 10^{-4} ». Стрелку прибора устанавливают на нуль шкалы. После этого тумблер под прибором ставят в положение «ЭМИССИЯ», тумблер «УСТАНОВКА НУЛЯ» – в положение «ИЗМЕРЕНИЕ», а тумблером «НАКАЛ» включают накал ионизационной манометрической лампы ПМИ-2. При этом должна загореться сигнальная лампа, расположенная около переключателя, а стрелка прибора установится посередине шкалы возле риски с индексом «А».

Во время работы ионизационной манометрической лампы следует иметь в виду, что её нить сильно греется, а при этом она сама, окружающие её электроды и стеклянные стенки баллона лампы могут десорбировать поглощенные ранее га-

зы. Выделяющиеся газы изменяют давление в лампе и приводят к неверным показаниям. Поэтому перед измерениями ионизационный манометр прогревают (обезгаживают) в течение 10–15 минут.

После прогрева сетки лампы ПМИ-2 надо правильно установить ток эмиссии. Для этого необходимо переключить тумблер из положения «ПРОГРЕВ» в положение «ИЗМЕРЕНИЕ» и потенциометром «РЕГУЛИРОВКА ЭМИССИИ» перевести стрелку прибора на риску с индексом «А», что соответствует току эмиссии 5 мА.

Для калибровки чувствительности усилителя необходимо поставить переключатель шкалы в положение «КАЛИБРОВКА», тумблер из положения «ЭМИССИЯ» – в положение «ИЗМЕРЕНИЕ» и установить стрелку прибора на конец шкалы потенциометром «КАЛИБРОВКА».

После того как стрелка прибора установлена на нуль шкалы, правильно установлена калибровка прибора, прогрета сетка ионизационной манометрической лампы и правильно установлена величина тока эмиссии лампы (равная 5 мА), можно производить измерения вакуума в исследуемом объёме. Переключатель множителя шкалы устанавливают в такое положение, при котором отсчёт по измерительному прибору будет лежать в пределах от 10 до 100% шкалы. Давление в измеряемом объёме равно отсчёту по измерительному прибору, умноженному на соответствующий множитель переключателя шкалы.

4. Приборы для измерения температуры

Приборами для измерения температуры посредством контакта с исследуемой средой являются термометры. Их действие основано на различных физических явлениях, зависящих от температуры: на тепловом расширении жидкостей, газов или твердых тел, изменении давления газа или насыщенных паров, изменении электрического сопротивления и др. Наиболее распространены жидкостные, манометрические и термоэлектрические термометры. Последние являются со-

чтанием электроизмерительных приборов с датчиками температуры, такими, как термопары и терморезисторы.

4.1. Жидкостный термометр

Жидкостный термометр представляет собой герметично запаянный капилляр с рабочей жидкостью, вдоль которого имеется градуировочная шкала. Один конец этого капилляра имеет уширение, где собирается избыток рабочей жидкости. Именно эта часть прибора и является рабочей – её непосредственный контакт с исследуемым объектом или средой приводит рабочую жидкость к тепловому расширению или сжатию. В качестве рабочей жидкости часто используются подкрашенные спирты или ртуть.

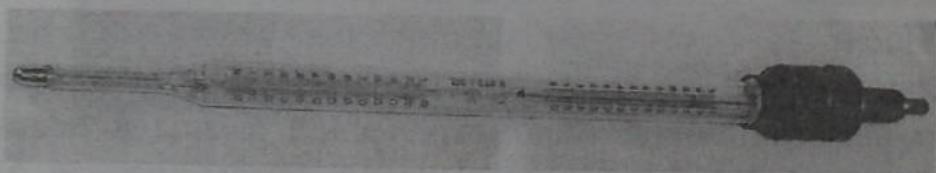


Рис. 4.1. Контактный (ртутный) термометр

Одна из разновидностей таких приборов – управляемый или контактный (ртутный) термометр (рис. 4.1), используемый для автоматического включения и выключения нагрева жидкости в терmostате. Он представляет собой сдвоенный термометр, нижняя часть которого содержит ртуть и показывает фактическую температуру. Верхняя часть имеет полый капилляр с плоской гайкой-указателем, расположенной с его внешней стороны. Положение перемещаемой внутри капилляра с ртутью кончика металлической проволоки жестко связано с плоской гайкой-указателем. Для такого перемещения на термометр сверху одета магнитная головка, вручную свободно приводимая во вращение относительно оси термометра. Вращением магнитной головки по (против) часовой стрелке осуществляется подъём (опускание) проволоки относительно уровня ртути в капилляре. Пока контакта ртути и проволоки нет, электронагреватель включен. Касание проволокой ртути приводит к отключению электронагревателя.

4.2. Термопара

Термопара представляет собой датчик температуры, состоящий из двух соединенных между собой разнородных электропроводящих элементов. В качестве таких проводников обычно используются проволоки из различных материалов (сплавов), которые за счет спаев на своих концах организуются в замкнутую цепь. Схема такой цепи, с проволоками из меди и константана, показана на рисунке 4.2.



Рис. 4.2. Термопара медь-константан

Спай являются рабочими элементами термопары и называются термоэлектродами. Если термоэлектроды находятся при разных температурах (T_1 и T_2 на рис. 4.2), то в цепи возникает ЭДС (термоэдс), величина которой однозначно определяется температурой горячего и холодного контактов и природой материалов, примененных в качестве термоэлектродов.

4.3. Терморезистор

Как и термопара, терморезистор является датчиком температуры, однако имеет иной принцип действия, основанный на зависимости от температуры электрического сопротивления металлов, сплавов и полупроводников. При повышении температуры сопротивление металлодатчика увеличивается, у полупроводникового – уменьшается. Широкое распространение получили терморезисторы из чистых металлов, таких, как Pt и Cu, которые конструктивно представляют собой металлическую проволоку или ленту, намотанную на жесткий каркас из электроизолирующего материала и применяющиеся в широких температурных интервалах. Так платиновые термо-

резисторы применяют для измерения температур в пределах от -263 до 1064 $^{\circ}\text{C}$, а медные – от -50 до 180 $^{\circ}\text{C}$. Полупроводниковые терморезисторы (углеродные, германиевые и др.) применяют для измерения низких температур, так как при высоких (выше 100 $^{\circ}\text{C}$) начинают сказываться их нестабильность и разброс индивидуальных характеристик.

5. Приборы для измерения расхода газа

5.1. Газовый счётчик

Газовый счётчик служит для измерения небольших количеств протекающего газа. Внешний вид прибора изображен на рисунке 5.1. Его корпус представляет собой цилиндрический баллон, на передней торцевой стенке которого находится счетно-суммирующий механизм и шкала со стрелкой. Один оборот стрелки соответствует 5 л газа, прошедшего через счётчик. Газовый счётчик заливается водой до уровня, определяемого по водомерному устройству (1). Трубка для входа газа расположена сзади счётчика, а для выхода – наверху.

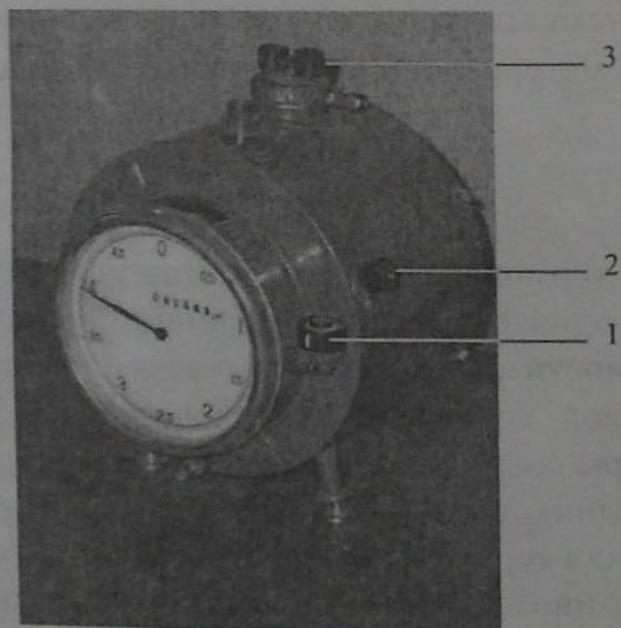


Рис. 5.1. Газовый счётчик

Патрубок (2) предназначен для установки термометра, а патрубки (3) – для присоединения U-образного манометра. На передней стенке, под циферблатом, расположен кран для слива воды. Счётчик снабжен уровнем. Настройка горизонтального положения производится с помощью регулировочных ножек, расположенных в основании прибора. Принцип его работы следующий: на оси цилиндра жестко укреплены легкие чаши. В верхнюю чашу, расположенную над входной трубкой, поступает воздух. Входная трубка находится ниже уровня воды. Когда чаша наполняется воздухом, она всплывает, её место занимает следующая и т. д. Вращение оси передается счетно-суммирующему устройству.

6. Приборы для измерения силы тока и напряжения в электрических цепях

Для измерения силы тока в цепи служат амперметры, которые включают в цепь последовательно, а для измерения разности потенциалов пользуются вольтметрами, которые включают параллельно исследуемому участку цепи. Несмотря на различное включение приборов в исследуемую цепь, принципиальной разницы в их устройстве нет. Отличие в способах включения амперметров и вольтметров в электрическую цепь приводит к совершенно разным требованиям, которым должно удовлетворять сопротивление этих приборов. Из-за возникающего перераспределения токов и напряжений при включении измерительного прибора в исследуемую цепь, необходимо, чтобы амперметр обладал малым сопротивлением, а вольтметр – большим по сравнению с сопротивлением исследуемой цепи или ее участка. Различие в сопротивлении приборов достигается путем подбора дополнительных сопротивлений или шунтов. Амперметры и вольтметры эти сопротивления и шунты содержат внутри кожуха.

Приборы, предназначенные для измерений величин силы тока и разности потенциалов, могут быть как стрелочными (рис. 6.1), так и цифровыми. Принципы их работы различны, однако используются они одинаково. Общие принципы рабо-

ты цифровых приборов описаны в разделе «Цифровые приборы».

6.1. Стрелочные приборы

Отклонение подвижной части обусловлено прохождением электрического тока (исключение составляют электростатические приборы). Например, гальванометр может применяться в качестве амперметра или вольтметра в зависимости от того, как отградуирована его шкала: в единицах падающего на нем напряжения или в единицах протекающего через него тока.

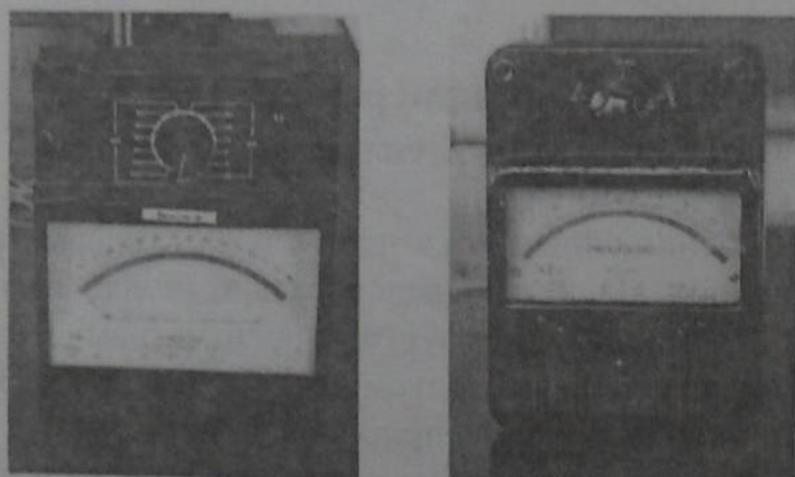


Рис. 6.1. Стрелочные вольтамперметр типа М2020 (слева) и миллиамперметр типа Э59/7 (справа)

В основу действия стрелочного прибора могут быть положены различные физические явления, которые определяют использование необходимой системы. Приборы магнитоэлектрической системы используются для измерений в цепях постоянного тока. Достоинствами приборов этой системы являются высокие точность и чувствительность, низкие потребляемая мощность и чувствительность к внешним магнитным полям, устойчивость к перегрузкам и равномерность шкалы. Приборы электромагнитной системы используются для измерений в цепях переменных токов, однако они могут использоваться и для измерений в цепях постоянных токов. Приборы этой сис-

темы устойчивы к перегрузкам и имеют простую и надежную конструкцию. Их недостатками являются непригодность для измерения малых токов и низких напряжений, чувствительность к внешним магнитным полям, низкая точность и нелинейность шкалы.

Основными характеристиками электроизмерительных приборов являются система, класс точности, чувствительность и предел измерения. Систему и класс точности обычно обозначают на шкале прибора условными знаками (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Магнитоэлектрический прибор	
Электромагнитный прибор	
Электродинамический прибор	
Электростатический прибор	
Прибор работает в горизонтальном положении	
Прибор работает в вертикальном положении	
Класс точности	1,0
Прибор для измерения постоянного тока (напряжения)	—
Прибор для измерения переменного тока (напряжения)	~

Класс точности указывает, какой процент абсолютной погрешности составляет величина от полной шкалы прибора:

$$\Delta x_M = \pm \frac{\gamma \cdot x_p}{100\%},$$

где γ – класс точности стрелочного прибора, x_p – значение измеряемой величины, соответствующее перемещению стрелки на всю шкалу, Δx_M – максимальная погрешность прибора.

Следует отличать класс точности прибора γ от его относительной погрешности

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta x_m}{x} \cdot 100\%,$$

где x – текущее значение измеряемой величины. В качестве примера рассмотрим миллиамперметр класса точности 0,5 со шкалой на 100 мА (рис. 6.1 справа). При измерении тока в пределах от 0 до 100 мА максимальная погрешность не превысит величины

$$\Delta I_m = \frac{I_p}{100\%} = \pm \frac{0,5\% \cdot 100 \text{ мА}}{100\%} = \pm 0,5 \text{ мА}.$$

Следовательно, если величина измеряемого тока составляет 25 мА, то относительная погрешность измерения составит

$$\varepsilon = \frac{\Delta I_m}{I} \cdot 100\% = \pm \frac{0,5}{25} \cdot 100\% = \pm 2\%.$$

Из приведенного примера видно, что при измерениях в начале шкалы стрелочного прибора относительная погрешность результата сильно возрастает. Поэтому для измерений с высокой точностью следует подбирать такой прибор (или предел измерений, в случае многошкальных приборов), чтобы измеряемая величина вызывала отклонение указателя (стрелки) больше чем на половину шкалы.

Пределом измерения прибора называют то значение измеряемой величины, при котором стрелка прибора отклоняется до конца шкалы. На практике широко используются многошкальные приборы, т. е. приборы, имеющие несколько пределов измерений. Цена деления прибора равна значению измеряемой величины, которое вызывает отклонение указателя на одно деление шкалы прибора. Так, например миллиамперметр (рис. 6.1 справа) имеет три предела измерений: 50, 100 и 200 мА. Шкала имеет 100 делений. Цена деления для предела 50 мА равна 0,5 мА/дел, для предела 100 мА равна 1 мА/дел, а для предела 200 мА она составляет 2 мА/дел.

Чувствительностью стрелочного прибора называется отношение линейного или углового перемещения указателя (стрелки) прибора к измеряемой величине, вызвавшей это перемещение:

$$S = \frac{\Delta}{x},$$

где Δ – линейное или угловое перемещение, x – измеряемая величина. Так при токе 30 мА стрелка прибора сместилась на 36 делений. Чувствительность данного прибора к току составляет 1,2 дел/мА.

6.2. Цифровые приборы

Цифровой электроизмерительный прибор – средство измерений, в котором значение измеряемой электрической величины представляется в численном виде на отсчетном устройстве – индикаторном табло. Применяются такие приборы для измерений практически всех электрических величин (напряжения, тока, сопротивления, емкости, индуктивности и др.), а также неэлектрических величин (давления, температуры, скорости и др.), предварительно преобразованных в электрические. Как правило, цифровые электроизмерительные приборы одновременно выполняют функцию аналого-цифрового преобразователя, преобразуя измеряемую величину в выходной код – совокупность дискретных (импульсных) электрических сигналов, что позволяет регистрировать показания этих приборов различными вычислительными, печатающими, передающими и другими устройствами. Измерение при помощи таких приборов сопровождается дискретизацией измеряемой величины по её уровню и по времени. Дискретизация определяется значением наименьшего десятичного разряда представляемого числа и длительностью цикла одного преобразования.

Структурно большинство цифровых приборов состоят из измерительной цепи, выполняющей необходимые аналоговые преобразования измеряемой величины, аналого-цифрового преобразователя и отсчетного устройства, в котором кодированный сигнал преобразуется в соответствующее ему число. Различают их по принципу аналого-цифрового преобразования. Наиболее распространены цифровые электроизмерительные приборы *последовательного счета*, в которых аналоговая измеряемая величина преобразуется в пропорциональ-

ное число импульсов и затем в другой (обычно двоично-десятичный) код, и *поразрядного уравновешивания*, в которых код формируется на основе сравнения измеряемой величины с известной однородной величиной, изменяющейся ступенчато неравномерно по определению заданному закону.

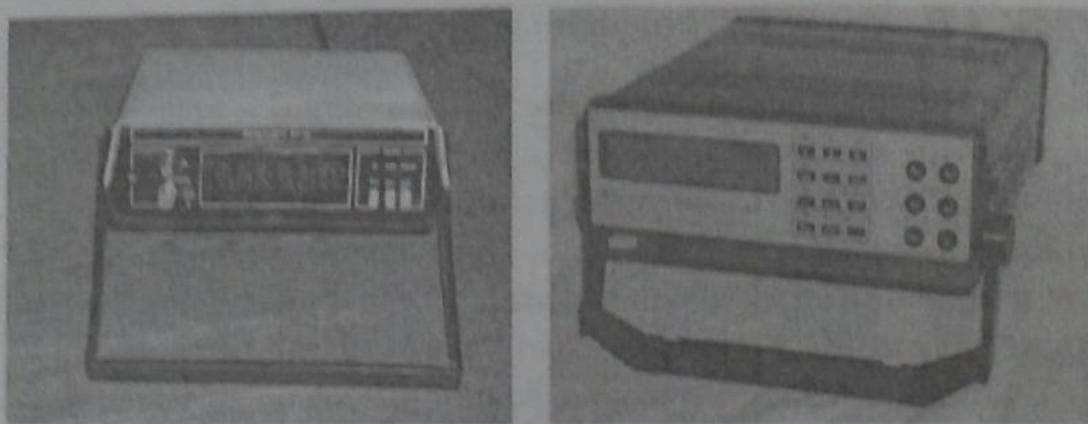


Рис. 6.2. Цифровые вольтметры В7-38 (слева) и В7-65/2 (справа)

В лабораторном практикуме используются такие цифровые вольтметры, как В7-38 (рис. 6.2 слева), В7-65/2 (рис. 6.2 справа) и другие.

Не допускается подача измеряемого напряжения на клеммы приборов во время их отключения от сети питания. Нарушение этих требований может вывести прибор из строя.

Вольтметр В7-38 имеет чувствительность 10 мкВ. Его входное сопротивление превышает 2 МОм, поэтому поправками на сопротивления подводящих к клеммам проводов можно пренебречь. На задней панели имеется регулировочная ручка установки нуля для режимов измерения напряжений. Работа с прибором производится следующим образом. После включения прибора в сеть высвечивается 6 разрядов цифр. Нажатием одной из трёх кнопок выбирается необходимая измерительная функция: измерение постоянного «V=» или переменного «V~» напряжения или измерение сопротивления постоянному току «KΩ». Пределы измеряемых величин не должны превышать допустимые значения, указанные над кнопками. Так, максимальное измеряемое постоянное напряжение не

должно быть выше 1 кВ, переменное – не выше 300 В, а резистивное сопротивление – свыше 20 МОм. Прибор переключает разряды по пределам измеряемой величины автоматически, поэтому при расчётах погрешностей, пределы измерений напряжений V_i и сопротивлений R_i выбираются наименьшими, чтобы величины показаний прибора V_n и R_n их не превышали. Зависимость величин погрешностей от выбираемых пределов измерений представлена в таблице 6.2.

Таблица 6.2

Измеряемая величина	Диапазон измеряемых величин	Пределы измерения	Пределы допускаемых погрешностей, %
Напряжение постоянного тока, В	$10^{-5}+10^3$	0,2; 2	$\pm \left(0,04 + 0,02 \cdot \frac{V_i}{V_n} \right)$
		20; 200; 1000	$\pm \left(0,07 + 0,02 \cdot \frac{V_i}{V_n} \right)$
Напряжение переменного тока, В	$10^{-5}+300$	0,2+300	$\pm \left(0,4 + 0,05 \cdot \frac{V_i}{V_n} \right)$
Сопротивление, кОм	$10^{-5}+2 \cdot 10^4$	0,2	$\pm \left(0,07 + 0,1 \cdot \frac{V_i}{V_n} \right)$
		2; 20; 200	$\pm \left(0,07 + 0,02 \cdot \frac{V_i}{V_n} \right)$
		2000	$\pm \left(0,15 + 0,02 \cdot \frac{V_i}{V_n} \right)$
		$2 \cdot 10^4$	$\pm \left(0,5 + 0,1 \cdot \frac{V_i}{V_n} \right)$

Цифровой вольтметр В7-65/2 предназначен для измерения постоянного напряжения, среднеквадратичного значения переменного напряжения произвольной формы, сопротивления постоянному току, постоянного и переменного токов, частоты и периода синусоидального и импульсного сигналов. Благодаря заложенным в нём программам, имеется возможность проводить математическую и логическую обработку результатов измерений. Прибор снабжён автоматическим и

ручным режимами переключения диапазонов измерений, а также автоматической калибровкой «нуля».

Работа с вольтметром В7-65/2 начинается с включения сетевого питания, после чего на цифровом индикаторе последовательно высвечиваются следующие сообщения: «АВТОТЕСТ», «АВК1», «АВК2» и «АВК3». По завершении сигнализации о проведении автоматических процедур, прибор необходимо прогреть в течение 10 минут. Это связано с тем, что его чувствительность составляет 1 мкВ, а величина температурного отклонения – порядка нескольких микровольт на градус. В дальнейшем коррекция дрейфа нуля измерительного тракта производится автоматически один раз в 13 секунд. При этом происходит прерывание считывания на 0,5–1 секунду. В процессе измерений при нажатии кнопки «<>0<>», на индикаторе появляется сообщение «НУЛЬ» и величина в нуле. Повторное нажатие этой кнопки снимает сообщение, и на индикаторе высвечивается величина измеряемого сигнала.

Для подготовки прибора к измерению постоянных или переменных напряжений и токов, а также сопротивления постоянному току, необходимо нажать одну из кнопок «U», «I» или «R» соответственно. Выбор режима измерения переменной или постоянной составляющих производится нажатием кнопки «~/=», при этом на индикаторе высветится знак («~» или «=») выбранного режима.

Необходимый диапазон измерений выставляется с помощью кнопок «<», «>» и «Ø». Нажатием кнопок «<» или «>» осуществляют ручную установку диапазона измерения, кнопкой «Ø» – выбор поддиапазонов автоматически. При установке диапазонов измерений вручную, в случае превышения допустимого предела измеряемой величины, на индикаторе появится сообщение «OLL» об ошибке. В этом случае необходимо изменить диапазон измерения или переключить прибор в режим автоматического выбора поддиапазонов.

Необходимое количество разрядов, высвечивающихся на индикаторе, можно изменить нажатием кнопки «РАЗРЕШ». При повторном нажатии этой кнопки количество разрядов восстанавливается.

7. Приборы для измерения сопротивления, индуктивности и ёмкости – измерительные мосты

Для измерения параметров элементов электрических цепей (сопротивлений, индуктивностей, ёмкостей и т. п.) используются измерительные мосты. В их основе лежит метод сравнения с мерой пассивных параметров электрических цепей, а также величин, функционально с ними связанных. Частным случаем такого устройства для измерения величин сопротивлений является мост Уитстона, принципиальная схема которого изображена на рисунке 7.1.

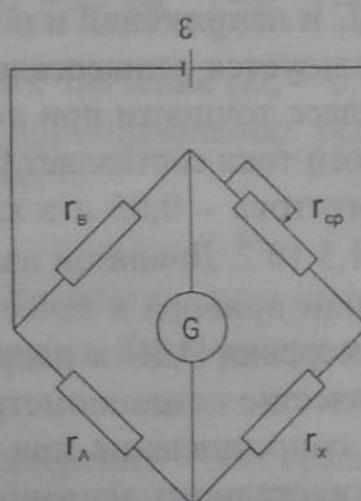


Рис. 7.1. Мост Уитстона

Измерительный мост представляет собой замкнутую цепь из четырех последовательно соединенных сопротивлений, в одну из диагональных ветвей которой включается чувствительный гальванометр G , а в другую источник питания E . Регулируя сопротивление одного из плеч, добиваются равновесия моста, при котором ток в диагонали с гальванометром равен нулю. Зная величину сопротивления r_A и отношение сопротивлений r_B и r_{cp} , соответствующие условию равновесия, можно вычислить величину сопротивления r_x . В мостах постоянного тока для достижения равновесия достаточно регулировать один элемент моста. В мостах переменного тока, сопротивление плеч которого имеет не только активную, но и

реактивную составляющую, для достижения той же цели необходима регулировка не менее двух элементов. Измерительные мосты переменного тока различают как частотно-независимые, у которых условие равновесия достигается при любой частоте питающего напряжения, и частотно-зависимые, достижение равновесия в которых возможно лишь при определенных частотах напряжения питания.

7.1. Универсальный измерительный прибор Р4833

В лабораторном практикуме для измерения сопротивлений, постоянных ЭДС и напряжений и поверки теплотехнических приборов используется универсальный измерительный прибор Р4833. Его класс точности при использовании в качестве моста постоянного тока составляет 0,1; в качестве потенциометра постоянного тока – 0,05 и в качестве магазина сопротивлений – $0,02/1,5 \cdot 10^{-4}$. Диапазон измерения сопротивлений при использовании прибора в качестве моста от 10^{-4} до 10^6 Ом; диапазон измерения ЭДС и напряжений при использовании прибора в качестве потенциометра от 0 до 111,10 мВ; диапазон показаний сопротивления при использовании прибора в качестве пятидекадного магазина сопротивления от начального ($\leq 0,015$ Ом) до 1111,10 Ом.

Таблица 7.1

Диапазон, Ом	$10^{-1} + 10^{-2}$	$10^{-1} + 10^{-2}$	$10^{-2} + 10^{-1}$	$10^{-1} + 1$	$1 + 5$	$5 + 10^2$	$10^2 + 10^3$	$10^3 + 10^4$	$10^4 + 10^5$	$10^5 + 10^6$
Погрешность, %	-	$\pm 2,0$	$\pm 0,5$	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,5$	$\pm 5,0$

Основная погрешность при использовании прибора в качестве моста выражается в единицах Ом и определяется выражением

$$\Delta = \pm 10^{-2} \cdot C \cdot X,$$

где C – значение класса точности, установленного для данного диапазона измерения (табл. 7.1), X – показание, отсчитанное с лимбов переключателей декад выраженное в омах.

Предел допускаемой основной погрешности должен соответствовать значениям, указанным в таблице 1 при следующих условиях эксплуатации: температуре воздуха $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности от 25 до 80%.

Основная погрешность при использовании прибора в качестве потенциометра для измерения ЭДС и напряжений выражается в вольтах и определяется выражением

$$\Delta U = \pm 5 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{U_n}{10} + U \right),$$

где U_n – нормирующее значение ($U_n = 0,1$ Вольт), U – показание потенциометра, при нормальных условиях эксплуатации, выраженное в вольтах.

8. Приборы для измерения времени, частоты и визуализации быстропротекающих процессов

Как известно, измерение – это сравнение одной физической величины с другой, однородной ей величиной, принятой за единицу. К выбранному эталону предъявляются определенные требования, основным из которых является его устойчивость во времени и пространстве. Для времени таким эталоном всегда является некоторый периодический процесс в какой-либо колебательной системе. В механических приборах таким процессом могут являться, например, колебания пружинного крутильного маятника, а в электронных – изменения тока в LC -контуре или упругие стоячие волны в пластинке кварцевого резонатора.

Для измерения временных интервалов можно использовать практически любой прибор, в котором имеется какой-либо высокостабильный периодический колебательный процесс. В данном разделе будут рассмотрены только приборы, специально предназначенные для измерения времени, объединенные под названием «секундомеры» (рис. 8.1).

Функциональная схема секундомера включает в себя образцовый генератор, счетчик импульсов с индикатором, схемы сброса, запуска и остановки. Период выходного сигнала генератора определяет разрешение секундомера, т. е. минимальный временной интервал, который может быть зарегистрирован данным прибором. На индикаторе счетчика отображается число импульсов генератора, прошедших с момента последнего сброса счетчика, и тем самым время в произвольных единицах, соответствующих длительности периода генератора. Схемы сброса, запуска и остановки счетчика управляют его режимами, вырабатывая сигнал сброса, разрешая или запрещая работу счетчика при наступлении событий, интервал времени между которыми надо измерить.

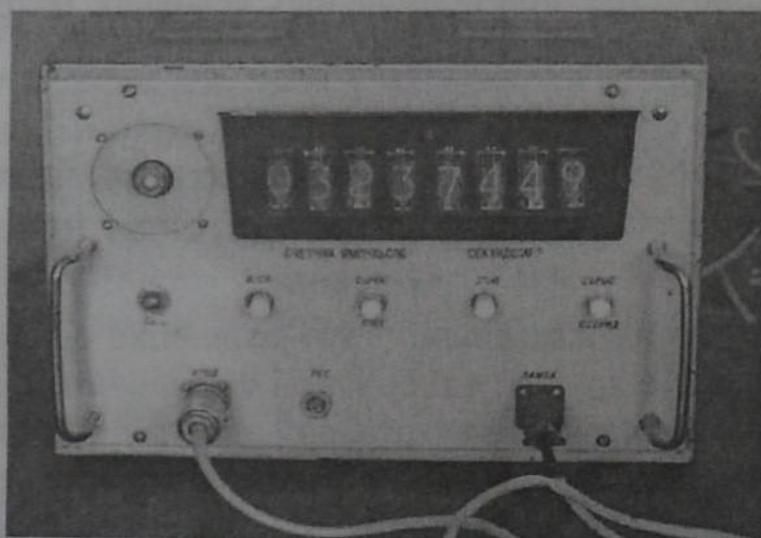


Рис. 8.1. Лабораторный секундомер/счётчик импульсов

Изменяя логику работы схем сброса, запуска и остановки, мы можем получить самые разные приборы, предназначенные для решения разнообразных задач. Например, используя в качестве таких схем ручное управление, можно получить спортивный секундомер, который также очень широко используется в лаборатории. Соединив эти схемы с датчиком, фиксирующим движение математического маятника, получим прибор, измеряющий период его колебаний.

Следует отметить высокое качество современных цифровых приборов измерения времени. Так как их погрешность полностью определяется точностью настройки задающего генератора, а создание точного и стабильного генератора – задача технологически весьма простая (во всяком случае, создать такой генератор намного проще, чем эталон любой другой электрической величины), то большинство существующих секундомеров обеспечивают систематическую погрешность порядка 0,01%.

Другим устройством, часто используемым при измерении времени, является электронный осциллограф. Осциллограф – многофункциональный прибор и не предназначен специально для измерения времени. Но наличие в нем высокостабильного калиброванного колебательного процесса, которым является его генератор строчной развертки, позволяет осуществлять и такие измерения. В качестве же схем сброса, запуска и остановки выступают блоки синхронизации и вертикального отклонения луча осциллографа.

Конкретная схема включения прибора зависит от цели выполняемого измерения, но, как правило, задача сводится к определению временного интервала между фронтами двух коротких импульсов или периода сигнала. Во втором случае можно просто получить его осциллограмму и выполнить измерение по шкале, нанесенной на экран электронно-лучевой трубы (ЭЛТ). Для первого же случая следует подать один из сигналов, соответствующий началу временного интервала, на вход внешней синхронизации, а второй – на вход Y усилителя горизонтального отклонения. Установив развертку осциллографа в ждущий режим, производится подстройка уровня синхронизации до появления изображения на экране ЭЛТ. Усиление по горизонтали устанавливается таким, чтобы на экране был хорошо различим импульс, поданный на вход Y . При этом временной интервал определяется по экранной шкале и равен расстоянию от начала линии развертки до фронта второго импульса.

Погрешность измерения временных интервалов осциллографическим методом довольно велика – не меньше 5%, и

измерение носит скорее оценочный характер, но благодаря наглядности, простоте и универсальности метода его часто употребляют, когда высокая точность не требуется.

Среди всех видов электротехнических измерений измерение частоты занимает особое место. Если для большинства других электрических величин в обычной практике достаточно обеспечить относительную погрешность порядка 2–3%, то для частоты требуется, как правило, значительно более высокая точность (0,1–0,2%). Это обусловлено довольно высокой добротностью практически всех применяемых электрических, а тем более – механических резонансных систем. Даже для одиночного колебательного контура с типичной добротностью около 100 отклонение частотных параметров более чем на 1% приводит к прекращению нормальной работы.

Все выпускаемые промышленностью частотомеры можно разделить на стрелочные и цифровые. Обычные стрелочные измерительные приборы обеспечить указанную высокую точность не в состоянии. Электронные частотомеры появились относительно недавно, поэтому до их появления в ходе развития радиотехники были предложены многочисленные способы и методики косвенного измерения частоты.

8.1. Электронно-лучевые приборы

Один из способов измерения частоты – получение *интерференционных фигур Лиссажу*. Они образуются при сложении двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаний и являются специфичными для каждого определенного соотношения частот. Для наблюдения таких фигур используется осциллограф. На вход его усилителя вертикального отклонения Y подается исследуемый сигнал, а на вход горизонтального отклонения X – сигнал образцового генератора известной частоты (по шкалы прибора).

Перестраивая последний, получают на экране ЭЛТ осциллографа устойчивую фигуру Лиссажу, по форме которой определяют соотношение частот на входе осциллографа.

Вид интерференционной фигуры зависит не только от соотношения частот, но и от сдвига фаз сигналов. Форма этих

фигур для некоторых соотношений частот при различных сдвигах фаз приведена на рисунке 8.2. В случае получения фигуры, отсутствующей на рисунке, существуют различные методы для её расшифровки: соотношение частот определяется количеством 1) точек касания фигуры вертикальной и горизонтальной сторон ограничивающего её прямоугольника; 2) точек пересечения перпендикулярных осей внутри фигуры.

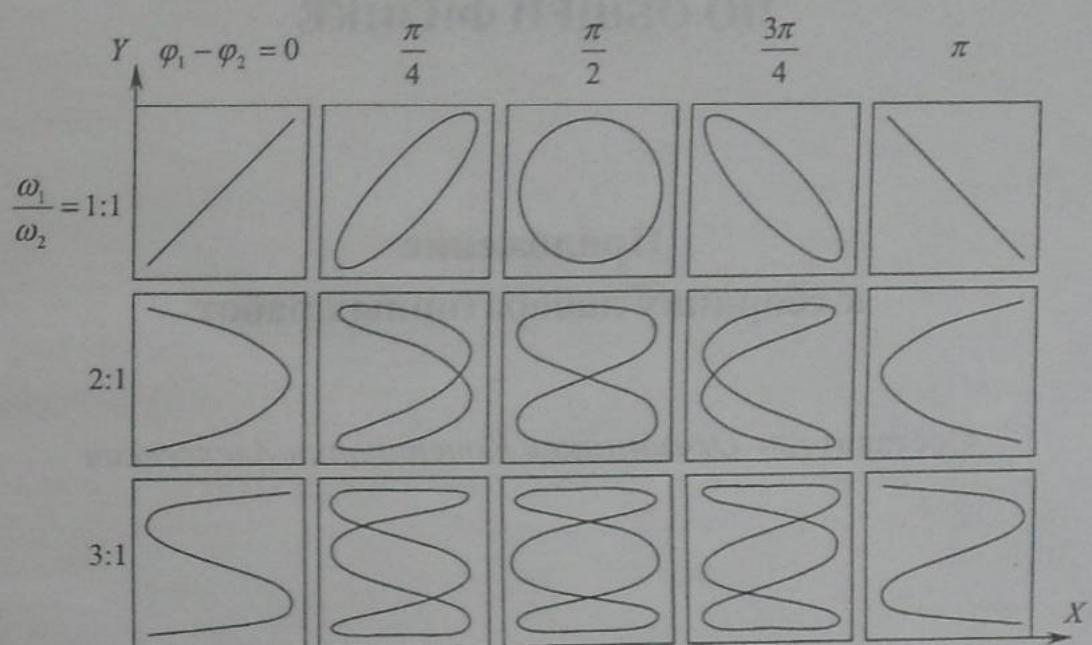


Рис. 8.2. Фигуры Лиссажу для колебаний одинаковой амплитуды

Погрешность измерения описанным методом определяется в основном точностью определения частоты опорного генератора и обычно не бывает ниже 1–2%. Это приводит к необходимости использования специализированного генератора с качественной градуировкой шкалы (например, такой генератор входит в состав гетеродинного частотомера Ч4-1) или цифровых синтезаторов частоты, погрешность которых около 0,1%.

Учебно-методическое пособие

**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ
В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ
ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ**

**Приложение
к сборнику лабораторных работ**

Составитель *Овчинников Константин Алексеевич*

Редактор *О.П. Котова.*
Корректор *И.А. Волкова*

Подписано в печать 18.07.03. Формат 60 × 84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная. Печать
оффсетная. Усл. печ. л. 3,0. Уч.- изд. л. 3,2. Тираж 1500 экз. Заказ № ф-56.

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Московский физико-технический институт
(государственный университет)
Отдел автоматизированных издательских систем «ФИЗТЕХ-ПОЛИГРАФ»
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9