

53
P 380

Н. А. Релизов

ПРАКТИКУМ
ПО
ФИЗИКЕ

33440



Медгиз • 1948

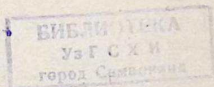
Н. А. РЕМИЗОВ

53
P 380

ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

33440

*Рекомендовано
Главным управлением медицинскими
учебными заведениями Министерства
здравоохранения СССР
в качестве учебного пособия
для медицинских институтов*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МЕДИЦИНСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МЕДГИЗ — 1948 — МОСКВА

ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

СНК СССР и ЦК ВКП(б) в постановлении от 23 июня 1936 г. „О работе высших учебных заведений и о руководстве высшей школой“ ясно определили роль и значение лабораторных занятий в вузе.

Реализация этого постановления требует соответствующей организации и учебно-методической работы кафедр: увеличения лабораторных задач, аппаратуры, вспомогательных таблиц, улучшения организации домашней работы студентов. С этой целью кафедра физики I Мо-

НЕОБХОДИМЫЕ ИСПРАВЛЕНИЯ

На странице 115 в таблице 1 следует уничтожить четвертую вертикальную черту.

Практикум по физике.

студентам не только проводить измерения, но и критически оценивать полученные результаты.

Проф. С. А. Арцыбышев

ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Первое издание было выпущено под редакцией проф. С. А. Арцыбышева. Считаю долгом выразить ему глубокую благодарность за его работу, которая облегчила и наш труд над вторым изданием. Приношу благодарность также ассистентам кафедры физики I Московско-

го медицинского института, принимавшим участие в описании работ, вошедших в это издание: В. Е. Калинин, Е. М. Пономаревой, Т. И. Егоровой и Г. А. Бендрикову.

Н. Ремизов

ПРЕДИСЛОВИЕ К ТРЕТЬЕМУ ИЗДАНИЮ

Второе издание, объединившее педагогический опыт физических лабораторий I и II Московских медицинских институтов, выпущено было в 1938 г. Работа со студентами по первому и второму изданию показала пригодность „Практикума“ как учебного пособия.

В третьем издании исправлены мелкие опечатки, улучшены чертежи и внесены некоторые изменения применительно к новой программе по физике, утвержденной в 1945 г. Вновь помещены работы № 4 „Определение момента инерции двухзвенной системы“ и № 6 „Определение вязкости жидкости по Стоксу“. Для большего приближения задач к медицинской специальности введены работы № 8 „Исследование образования капель“ и № 26 „Измерение телесных углов“. Кроме того, добавлена как совершенно необходимая работа № 33 „Исследование фотоэлемента“. В то же время, не желая увеличивать объема учебника, автор исключил некоторые работы, оставив общее число их прежним.

Проф. Н. Ремизов

Москва, декабрь 1946 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловия	3
Введение	7
Теоретическая подготовка	8
Монтаж установки	9
Производство опыта и измерения	10
Вычисление результата и ошибок	16
Работа № 1. Определение плотности твердого тела правильной геометрической формы (измерение штангенциркулем и микрометром)	25
Работа № 2. Взвешивание на аналитических весах	31
Работа № 3. Определение плотности жидких и твердых тел пикнометром	38
Работа № 4. Определение момента инерции двухзвенной системы	41
Работа № 5. Определение вязкости жидкости вискозиметром	46
Работа № 6. Определение вязкости жидкости по Стоксу	50
Работа № 7. Определение коэффициента поверхностного натяжения по высоте поднятия жидкости в капилляре	53
Работа № 8. Исследование образования капель	56
Работа № 9. Проверка термометров	59
Работа № 10. Определение скрытой теплоты парообразования	63
Работа № 11. Определение скрытой теплоты плавления льда	67
Работа № 12. Определение термического коэффициента упругости воздуха	70
Работа № 13. Определение влажности воздуха гигрометром Аллюара и исследование психрометрической формулы	73
Работа № 14. Изучение кататермометра	80
Работа № 15. Градуирование амперметра и вольтметра	84
Работа № 16. Определение сопротивления проводников мостиком Уитстона	90
Работа № 17. Определение электродвижущей силы элементов методом компенсации	91
Работа № 18. Определение термического эквивалента работы	100
Работа № 19. Исследование термоэлемента	103
Работа № 20. Измерение удельной проводимости электролитов	108
Работа № 21. Измерение самоиндукции и емкости в цепях низкой частоты	113

Работа № 22. Характеристика трехэлектродной катодной лампы	116
Работа № 23. Изучение явлений резонанса в колебательном контуре	121
Работа № 24. Определение скорости звука методом стоячих волн (резонанса)	127
Работа № 25. Определение фокусных расстояний и светосилы линз	131
Работа № 26. Измерение телесных углов по величине изображения, даваемого линзой	135
Работа № 27. Определение увеличения лупы и построение микроскопа	139
Работа № 28. Определение размеров малых объектов и числовой апертуры микроскопа	144
Работа № 29. Изучение спектров с помощью спектроскопа прямого зрения	150
Работа № 30. Определение силы света лампочки накаливания	156
Работа № 31. Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки	161
Работа № 32. Определение поляризационным сахариметром процентного содержания сахара в растворе	166
Работа № 33. Исследование фотоэлемента	170

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица I. Температура кипения воды t° при барометрическом давлении H	175
Таблица II. Давление насыщенного пара E в миллиметрах ртутного столба	176
Таблица III. Плотность растворов спирта C_2H_5OH	177
Таблица IV. Плотность воды d при разных температурах	177
Таблица V. Поверхностное натяжение воды α	177
Таблица VI. Проводимость σ растворов $NaCl$ и KCl	177
Таблица VII. Четырехзначные логарифмы	178
Таблица VIII. Длины волн некоторых спектральных линий	180
Таблица IX. Длины волн спектральных линий неона	180
Таблица X. Значение синусов и тангенсов для углов $0-60^\circ$	181
Таблица XI. Приведение показаний барометра к 0°	182
Таблица XII. Некоторые физические константы	182

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные занятия введены при прохождении курса физики в медицинских вузах с целью: 1) более глубокого усвоения теоретической части курса студентами, 2) изучения применяемой в лабораторной практике физической аппаратуры и методов физических измерений и 3) получения практических навыков в производстве точных измерений. Эти обстоятельства предъявляют два основных требования к прохождению лабораторных занятий. Первым требованием является предварительная теоретическая подготовка студента к решению задачи. Второе требование относится к самому процессу измерений, необходимых для решения задачи, и к результатам. Результаты должны быть получены с максимальной точностью, допускаемой применяемыми методами и приборами. Часто приходится слышать от студента, не получившего достаточно точных результатов, что он все-таки считает задачу законченной, так как вполне понимает ее, а неточность результатов — следствие тех или иных объективных причин. Рассуждение неверное. Решить задачу — это значит не только понять физический смысл и закономерность явлений, но и получить навык в обращении с приборами, следовательно, нужно не только знать, как поставить опыт, но и достаточно точно провести его самому и дать критическую оценку результатов.

Решить физическую задачу в лаборатории — это значит на основании произведенного физического эксперимента получить числовое значение той или иной физической величины, например, веса определенного тела, сопротивления данного проводника, теплоемкости металла и т. п. Решение может быть и в выявлении закономерности изменения физической величины, например, сопротивления в зависимости от температуры, вращения

плоскости поляризации, от содержания сахара в растворе и т. п.

Определение одной и той же величины может быть произведено различными методами, например, для определения плотности тела может быть применен метод измерения объема и взвешивания или метод двукратного взвешивания тела в воздухе и в воде, или метод пикнометра и т. д. Каждый из методов, обладая своими достоинствами и недостатками, дает различную точность полученных результатов. Какой бы метод решения ни был избран, в большинстве случаев искомая величина не определяется непосредственно, но для решения задачи производится несколько вспомогательных измерений, пользуясь которыми, путем вычислений, получают уже конечный результат.

Процесс решения задачи можно расчленить на следующие основные операции: 1) теоретическая подготовка к задаче, 2) монтаж установки, 3) производство опыта и измерений, 4) вычисление результатов и ошибок.

Рассмотрим по порядку эти операции.

Теоретическая подготовка — домашняя работа, предшествующая лабораторному решению задачи. Следует помнить, что время, отводимое на лабораторное решение задачи, обыкновенно довольно ограничено и предназначено исключительно на сборку установки, производство измерений и вычислений. Поэтому в лаборатории нет уже времени для изучения теории. Большинство не доведенных до конца задач объясняется именно тем, что часть времени, предназначенная для экспериментальной работы, была затрачена в лаборатории на чтение и знакомство с теорией.

Основной теоретический материал помещен в описании каждой работы. Описание содержит краткую формулировку задачи, метод решения и его теоретическое обоснование; описание применяемых приборов и практические указания для монтажа установки, указания на точность измерения и формы рационального ведения записей и вычисления результатов.

Теоретическую подготовку следует начинать с ознакомления с задачей по настоящему руководству. В большинстве случаев для нормально успевающего студента вполне достаточно материала, помещенного в описании

задачи, для сознательного ее решения. В случае, если материал описания недостаточен, следует обратиться к учебникам. При теоретической подготовке следует ясно представить физический смысл лежащего в основе задачи эксперимента, зависимость искомой величины от вспомогательных величин, значение основных и вспомогательных приборов. Кроме того, надо подумать о том, какие причины могут исказить результаты наблюдений, какая необходима точность отсчетов и вычислений.

Недостаточная теоретическая подготовка вызывает недопустимое явление — механическое решение задачи, когда работающий только автоматически производит указанные в задаче соединения и монтаж, механически отсчитывает показания измерительных приборов и, получая какие-то числа, не видит их физического смысла и не может определить по ним требуемой физической величины.

Монтаж установки. Приступая к решению задачи, следует убедиться в том, что все относящиеся к данной задаче приборы находятся на рабочем месте. В описании задачи перечислены необходимые для установки принадлежности и в некоторых случаях даны их описания и рисунки. Каждый из описанных приборов следует подробно рассмотреть и, пользуясь описанием, представить себе, как и на основании чего этот прибор действует. Некоторые мелкие и ценные приборы — секундомеры, термометры и пр. — хранятся у лаборанта и выдаются только на время работы. Другие приборы, как, например, барометр, весы, которые обслуживают несколько различных задач, имеют свои постоянные места в лаборатории и обычно снабжены надписью, при решении каких задач следует ими пользоваться.

Познакомившись с основными приборами и принадлежностями, следует приступить к монтажу или сборке установки. Обычно ни одна задача, за редким исключением, не решается на готовой установке — установку надо собрать. Поэтому, приступая к решению, надо в определенной последовательности соединить отдельные части и измерительные приборы. Такое соединение, или монтаж, установки должно соответствовать схемам и описанию задачи.

При монтаже установки надо тщательно следить за правильностью всех соединений: гайки и винты должны быть завернуты до отказа, пробки, трубки, штепсели должны плотно входить в предназначенные для них отверстия, концы проводов должны быть зачищены от изоляции. Измерительные приборы располагают так, чтобы было удобно производить отсчеты. При монтаже электрических приборов источник тока включается последним и только после того, как преподаватель осмотрит установку. Это требование вызвано тем, что при неправильных соединениях можно пережечь измерительные приборы.

Обычно монтаж установки не представляет особых затруднений, если придерживаться руководства и если все детали соответствуют описаниям. Бывает все-таки, что для соединения или разборки детали необходимо некоторое физическое усилие. В этом случае следует действовать с особой осторожностью, чтобы не сломать прибор или деталь; в случае поломки и неисправности не пытаться самому их ремонтировать, а немедленно сообщить руководителю.

Производство опыта и измерения. После того как установка смонтирована, приступают к производству опыта. Эксперимент заключается в том, что по заранее принятому плану и в определенной последовательности производится ряд физических процессов, которые могут быть количественно охарактеризованы при помощи различных измерительных приборов. Наиболее ответственным моментом этой стадии решения задачи является точное управление процессами и их своевременное и точное измерение. Рассмотрим два примера. При точном взвешивании на весах определяется отклонение указателя (стрелки) по шкале, причем необходимо измерить несколько последовательных отклонений вправо и влево, соответствующих отдельным качаниям коромысла весов. Перемещение стрелки по шкале происходит довольно быстро, и поэтому отсчет положения стрелки на шкале должен быть произведен быстро и точно в момент ее наибольшего отклонения. Вслед за отклонением стрелки вправо должен быть произведен так же быстро и точно отсчет ее отклонения влево и т. д., так как пропуск одного из отсчетов лишает ценности предыдущие отсче-

ты. Второй пример можно взять из работы по определению теплоемкости твердого тела. В этой задаче исследуемое тело погружается в калориметр только после того, как оно нагрето в кипятильнике до температуры кипения воды. Если его вынуть из кипятильника и погрузить в калориметр слишком рано, то получится неверный результат. Далее, отсчет температуры воды в калориметре должен непосредственно предшествовать погружению тела. Если он проведен слишком рано, вода может изменить свою температуру к моменту погружения тела, что отразится на результате. И, наконец, конечная температура калориметра должна быть также определена своевременно, быстро и точно.

В экспериментальной части работы следует особо строго придерживаться правила: „максимум аккуратности и точности“. Всегда следует помнить, что качество опытного материала предрешает результат работы. В то время как ошибки в вычислениях могут быть исправлены после, вне лаборатории, исправление опытного материала невозможно без повторения эксперимента.

Было бы ошибкой утверждать, что точность измерений всегда должна быть максимальной. Выбор точности измерений диктуется целым рядом соображений. В каждой задаче производится несколько различных измерений, и обычно точность одного из них оказывает решающее влияние на точность других. Например, при определении плотности тела путем измерения его объема и взвешивания объем тела можно измерить штангенциркулем с точностью до $0,05 \text{ см}^3$, а $0,05 \text{ см}^3$ металла весит, в зависимости от плотности, от 0,2 до 0,5 г. Очевидно, в этом случае взвешивание тела можно произвести на относительно грубых технических весах с точностью до 0,1 г, не применяя более точного взвешивания. Точно так же было бы излишним измерять температуру воздуха в лаборатории с точностью, превышающей $0,5^\circ$, так как температура у внутренних и наружных стен, пола и потолка может отличаться более чем на 1° .

В калориметрических измерениях при довольно грубом определении веса воды определение температуры должно быть возможно более точным. Ошибка в определении температуры на $0,1^\circ$ вызывает ошибку резуль-

тата до 0,5%, а между тем метод Ψ дает возможность определять теплоемкость с точностью до 0,1%.

Независимо от принятой точности измерений точность отсчета должна быть максимальной. Несмотря на разнообразие физических измерительных приборов, большинство отсчетов сводится к определению длины или положения некоторой определенной точки на шкале длин. Действительно, измерение температуры сводится к отсчету положения мениска ртути на шкале термометра, т. е. к выражению в единицах шкалы длины ртутного столба. При взвешивании определяется отклонение стрелки указателя от нулевого положения шкалы, при измерении силы тока и напряжения — положение стрелки на шкале амперметра или вольтметра. Отсчеты времени определяются положением стрелки на шкале секундомера. Примеров подобного рода можно было бы привести очень много.

Вообще надо стремиться к возможно большей точности отсчета, если точность измерений выбрана. Для увеличения точности отсчета часто приходится не ограничиваться только оценкой мельчайших нанесенных на шкале делений, но оценивать на-глаз десятые доли самого меньшего деления шкалы. Такие отсчеты применяются при измерении температуры, силы тока и т. д., и при некотором навыке оценка „на-глаз“ десятых делений шкалы производится довольно точно. Особо стоят отсчеты времени при помощи секундомеров. Здесь точность измерений в большей степени зависит от точности включения и выключения часового механизма, чем от точности отсчета положения стрелки.

Как бы тщательно ни производились измерения, никогда они не будут абсолютно точными. Приступая к работам в физической лаборатории, следует твердо уяснить себе, что опытным путем абсолютных величин получить невозможно и что полученные результаты будут только приближенно соответствовать истинным значениям величин.

Возьмем конкретный случай. Кусок металла взвешивается на технических весах, и тщательно определенный вес его будет, например, 131,74 г. Дает ли полученное числовое выражение уверенность, что тело не может весить 131,735 г или 131,745 г? Конечно, не дает. Тех-

нические весы позволяют определить вес тела с точностью до 0,01 г, поэтому миллиграммы на них не могут быть определены. Наш результат есть приближенный. Чтобы увеличить степень точности, воспользуемся более точными аналитическими весами, на которых можно получить вес тела с точностью до 0,0001 г. Ясно, что, получив при этом взвешивании, например, величину 131,7372 г, мы увеличиваем степень точности, но не можем говорить об абсолютном весе, так как еще большая точность взвешивания дала бы еще новый десятичный знак.

Решая задачу, надо критически относиться к точности результата, т. е. надо знать, какие ошибки и почему вошли в отдельные измерения и как они повлияли на степень точности результата.

Ошибки отдельных измерений и результата бывают следующие: ошибки метода, индивидуальные ошибки прибора и индивидуальные ошибки наблюдателя.

Ошибки метода происходят обыкновенно от различных упрощений, применяемых при исследовании. Так, например, измеряя сопротивление в мостике Уитстона, мы пренебрегаем сопротивлением вспомогательных проводников; измеряя оптическую силу линз, не обращаем внимания на толщину самой линзы, при взвешивании не учитываем потери тела в воздухе по закону Архимеда и т. д.

Индивидуальные ошибки прибора зависят от конструктивных особенностей данного типа прибора или даже данного экземпляра. Так, например, стрелочный гальванометр, изготовленный мастерскими Ленинградского университета, имеет по шкале отметку такого типа $1^{\circ} - 3,10^{-6} \text{ А}$. Это значит, что при данной конструкции прибора ток силой в 0,000003 А вызывает отклонение стрелки на одно деление шкалы. Очевидно, пределом измерения на таком гальванометре, если считать, что на-глаз можно определить 0,1 деления шкалы, является ток силой 0,0000003 А. При пользовании таким прибором и всеми приборами такой же чувствительности неизбежны ошибки в седьмом десятичном знаке.

Представим себе, что стрелка такого гальванометра несколько изогнута в горизонтальной плоскости, хотя бы

точно на одно деление шкалы. Тогда при всяком отсчете положения стрелки мы вместо истинного ее положения будем отсчитывать положение, меньшее или большее на одно целое деление шкалы. Мы можем учесть десятые доли деления, но сам прибор дает ошибку на одно целое деление. Эта ошибка будет во всех показаниях прибора и является индивидуальной его ошибкой. Если величина этой ошибки будет известна, то можно производить измерения с точностью до десятых долей деления, но только к каждому отсчету следует вводить постоянную поправку, вызванную изгибом стрелки.

Другим примером индивидуальных ошибок прибора может служить термометр. Как бы точно ни изготавлили капилляр термометра, всегда возможно, что на некоторых участках его сечение будет сужено или расширено. Такому термометру нужно было дать и индивидуальную шкалу с несколько более крупными делениями для суженной части и менее крупными для расширенной части капилляра. Но шкалы обыкновенно наносятся с совершенно одинаковыми делениями, и поэтому такой термометр будет в суженных местах показывать температуру выше действительной, а в расширенных — ниже. Путем сравнения всегда можно найти отклонения показаний такого термометра от показаний нормального прибора и дать соответствующие поправки. Таким путем выявятся его индивидуальные ошибки. Эти поправки в виде таблички поправок, или так называемого „паспорта“, прилагаются к точным приборам при их проверке. Примеров таких индивидуальных ошибок приборов можно привести много. Важно то, что эти ошибки постоянны, их можно своевременно учесть по таблицам поправок и исключить их влияния на результат.

Случайные ошибки наблюдателя зависят от различных причин. Одной из наиболее часто встречающихся таких ошибок является ошибка отсчета, вызываемая параллактическим смещением.

Явление параллакса станет понятным при рассмотрении рис. 1. Пусть AB — шкала измерительного прибора, C — конец стрелки, перемещающейся вправо и влево над шкалой, на некотором расстоянии над нею, чтобы избежать трения о шкалу. Так как стрелка не лежит в плоскости шкалы, то двум наблюдателям, находящим-

ся в точках D_1 и D_2 , будет казаться, что конец стрелки совпадет с делениями d_1 и d_2 и каждый даст свой отсчет положения стрелки, в обоих случаях неверный. Только отсчет, произведенный из точки D , будет верен и свободен от параллактического смещения. Следовательно, для правильного отсчета надо поместить глаз наблюдателя на перпендикуляре к шкале, проходящем через конец стрелки. Из

рис. 1 видим, что наблюдатель D_1 отсчитывает положение стрелки, как 24,5, наблюдатель D_2 отметит 25,6, а истинное положение 25,3. Для правильной установки глаза многие приборы имеют зеркальную шкалу, в которой отражается конец стрелки C в точке C_1 . Точки C и C_1 будут на одном перпендикуляре к шкале AB , поэтому всегда легко занять правильное положение глаза при отсчете. Глаз должен быть помещен так, чтобы стрелка C и ее зеркальное изображение C_1 сливались.

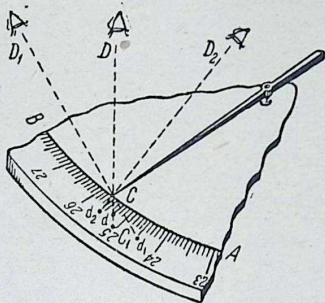


Рис. 1. Параллактическая ошибка.

Ошибки на параллакс всегда возможны при отсчетах температур, взвешивании, применении всех стрелочных приборов и т. д., и только немногие приборы свободны от параллактических ошибок.

Кроме ошибок на параллакс, возможны и другие случайные ошибки, зависящие от условий работы, освещения, состояния наблюдателя и т. д. Вследствие случайных ошибок несколько измерений одной и той же величины могут отличаться между собой.

Теория показывает, что случайные ошибки отдельных измерений одинаково вероятны как в сторону увеличения истинного значения, так и в сторону уменьшения, поэтому наиболее вероятной искомой величиной будет среднее арифметическое из отдельных полученных измерений. Исходя из этих соображений, в экспериментальной

части работы не ограничиваются однократным измерением какой-либо величины, но производят несколько измерений, и в качестве наиболее вероятной величины принимают среднюю арифметическую из всех измеренных значений.

Вычисление результата и ошибок. После того как произведена экспериментальная часть работы, полученный материал подвергается обработке и вычислениям.

При вычислении результатов следует помнить, что все полученные при измерениях величины являются величинами приближенными. Поэтому и вычисления производятся методами приближенных вычислений. Прежде всего познакомимся со степенью приближения полученных измерениями величин.

Рассмотрим случай измерения объема прямоугольного параллелепипеда (рис. 2). Измерение производится при помощи штангенциркуля с нониусом, позволяющим производить отсчеты с точностью до 0,1 мм. Если произвести несколько измерений, например, его высоты, то получим несколько расходящиеся результаты. Отдельные измерения будут отличаться вследствие случайных ошибок наблюдателя, вследствие ошибок мастера, изготовлявшего параллелепипед. Сделать идеально правильный параллелепипед невозможно, и при его изготовлении

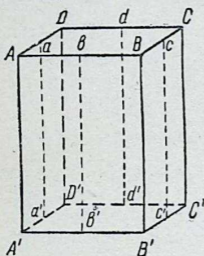


Рис. 2. Параллелепипед.

обязательна некоторая непараллельность сторон, обусловленная хотя бы точностью тех приборов, которыми контролировал себя изготовлявший параллелепипед мастер. Измеряя высоту параллелепипеда по какому-нибудь ребру его, например AA' , мы не уверены, что наше измерение даст величину, действительно соответствующую истинной высоте параллелепипеда. Поэтому и производят несколько измерений высоты с тем, чтобы воспользоваться средней арифметической как величиной наиболее вероятной.

Пусть высота определена 8 раз. Для этого произведем измерения четырех параллельных ребер (AA' , BB' ,

CC' и DD') и высоты четырех боковых сторон (aa' , bb' , cc' и dd'). Полученные результаты поместим в первый столбец таблички:

	Высота (в мм)	Δ	Δ^2
AA'	15,2	+ 0,01	0,0001
BB'	15,2	+ 0,01	0,0001
CC'	15,1	- 0,09	0,0081
DD'	15,1	- 0,09	0,0081
aa'	15,2	+ 0,01	0,0001
bb'	15,3	+ 0,11	0,0121
cc'	15,1	- 0,09	0,0081
dd'	15,3	+ 0,11	0,0121

Сумма высот = 121,5

Сумма $\Delta^2 = 0,0488$

Среднее $a = 15,19$

За вероятнейшее значение высоты параллелепипеда примем среднее арифметическое из всех определений. При этом будем помнить, что среднее арифметическое очень близко к истинному значению, но не выражает истинного значения высоты. В нашем случае среднее арифметическое $a = 15,19$ мм.

Число знаков в среднем арифметическом берем на один разряд больше, чем в отдельных измерениях.

Полученный результат ничего не говорит о точности произведенных измерений и о достоверности самого результата.

Величина 15,19 может быть получена как средняя из самых разнообразных рядов чисел. Так, например, числа 15,4; 15,2; 15,0; 14,9; 15,2; 15,4; 15,1 и 15,3 также дадут среднее арифметическое: 15,19. Но в первом случае отклонения отдельных измерений от арифметического среднего малы, они не превышают 0,11 мм. Второй же ряд чисел дает отклонения, достигающие 0,29 мм. Очевидно, что первые измерения произведены с большей точностью и полученный результат более достоверен.

Степень приближения найденной величины к истинной надо как-то оценить. Для этого введем понятие о средней квадратичной ошибке. Обозначим отклонения отдельных измерений от арифметического среднего через Δ и выпишем их во второй столбец таблицы. Возведем в квадрат эти отклонения (столбец 3) и найдем сумму

квадратов $\sum \Delta^2$. Средней квадратичной ошибкой среднего арифметического называют величину

$$E = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n(n-1)}},$$

где n — число измерений.

В нашем примере $\sum \Delta^2$ помещена внизу под третьим столбцом таблицы. Она равна 0,0488, а средняя квадратичная ошибка результата

$$E = \pm \sqrt{\frac{0,0488}{8(8-1)}} = \pm 0,03 \text{ мм.}$$

Эта ошибка указывает на то, что истинное значение высоты параллелепипеда может лежать в пределах от $15,19 + 0,03$ мм до $15,19 - 0,03$ мм. Поэтому искомый результат запишем так: $a = 15,19 \pm 0,03$ мм.

Средняя квадратичная ошибка для приведенного выше другого ряда равна $\pm 0,06$. При том же среднем значении 15,19 результат колеблется в больших пределах, следовательно, точность меньше.

При вычислении результатов следует придерживаться правила: последняя цифра результата не должна претендовать ни на какую точность, тогда как предпоследняя могла бы еще считаться достоверной. В случае сомнения лучше брать одной цифрой больше, чем одной цифрой меньше.

Преувеличенно „точные“ вычисления являются не достоинством, а недостатком работы. Дать высоту параллелепипеда равной 15,1875 мм при ошибке $\pm 0,03$ мм — это показать свое умение производить деление чисел, не понимая метода и теории физических измерений.

Средняя квадратичная ошибка не всегда достаточна для оценки точности результата или для сравнения точности различных измерений. Рассмотрим, кто точнее произвел измерения — мы, получив $a = 15,19 \pm 0,03$ мм, или ученый Перотен, определивший скорость света $c = 299\,860 \pm 80$ км/сек? В его измерениях ошибка результата ± 80 км/сек, а в наших $\pm 0,03$ мм. Не будем, однако, поспешно выносить заключение, а обратимся к относительной ошибке.

Как показывает само название, „относительная“ ошибка выражается отношением средней квадратичной ошибки к результату (среднему арифметическому). Относительная ошибка в наших измерениях высоты параллелепипеда равна $\frac{0,03}{15,19} = 0,002$. Выразив ее в процентах, получим точность наших измерений равной $0,2\%$. Относительная ошибка Перотена составляет $\frac{80}{299\ 860}$, т. е. $0,00027$, или $0,027\%$ измеренной величины. Измерения Перотена в 7 раз точнее наших измерений, несмотря на то, что ошибка его ± 80 км/сек очень велика.

Итак, в результате физических измерений мы получим величину приближенную, которую в общем виде обозначим через $a \pm E_a$, где E_a очень мала в сравнении с величиной a . Такие приближенные величины входят в различные формулы и над ними производятся математические действия по правилам приближенных вычислений, особенности которых будут видны из дальнейшего.

Рассмотрим следующие действия над приближенными величинами.

А. Сложение.

$$a \pm E_a + b \pm E_b = a + b \pm (E_a + E_b),$$

откуда следует, что средняя квадратичная ошибка суммы равна сумме квадратичных ошибок слагаемых, т. е.

$$E_{a+b} = E_a + E_b.$$

Относительная ошибка суммы D_{a+b} равна

$$D_{a+b} = \frac{E_{a+b}}{a+b} = \frac{E_a + E_b}{a+b}.$$

Б. Вычитание. В неблагоприятном случае ошибки войдут с разными знаками, а именно $a + E_a - (b - E_b)$ или $a - E_a - (b + E_b)$.

Для обоих случаев

$$a \pm E_a - (b \mp E_b) = a - b \pm (E_a + E_b),$$

т. е. средняя квадратичная ошибка разности равна сумме квадратичных ошибок вычитаемого и уменьшаемого:

$$E_{a-b} = E_a + E_b.$$

Относительная ошибка разности равна

$$D_{a-b} = \frac{E_{a-b}}{a-b} = \frac{E_a + E_b}{a-b}.$$

В. Умножение.

$$(a \pm E_a)(b \pm E_b) = ab \pm aE_b \pm bE_a \pm E_aE_b.$$

Произведением E_aE_b как очень малой величиной второго порядка можем пренебречь, тогда

$$(a \pm E_a)(b \pm E_b) = ab \pm (aE_b + bE_a),$$

откуда квадратичная ошибка произведения равна

$$E_{ab} = \pm (aE_b + bE_a).$$

Относительная ошибка произведения:

$$D_{ab} = \frac{E_{ab}}{ab} = \frac{aE_b}{ab} + \frac{bE_a}{ab} = \frac{E_b}{b} + \frac{E_a}{a} = D_a + D_b,$$

т. е. относительная ошибка произведения равна сумме относительных ошибок множителей. Если один из множителей имеет абсолютное значение N , то квадратичная и относительные ошибки выразятся так:

$$E_{Nb} = \pm NE_b,$$

$$D_{Nb} = \frac{NE_b}{Nb} = \frac{E_b}{b} = D_b.$$

Г. Деление.

$$\frac{a \pm E_a}{b \pm E_b} = \frac{a}{b} \pm \frac{E_a}{b \pm E_b}.$$

Ошибки делимого и делителя могут иметь одинаковые или разные знаки. Ошибка частного будет иметь наименьшее значение, когда знаки одинаковы. Из осторожности возьмем худший случай с противоположными знаками. Производим почленно деление:

$$\frac{a}{b \mp E_b} = \frac{a}{b} \pm \frac{aE_b}{b^2} \pm \frac{aE_b^2}{b^3} \dots$$

$$\frac{\pm E_a}{b \mp E_b} = \pm \frac{E_a}{b} \pm \frac{E_aE_b}{b^2} \pm \frac{E_aE_b^2}{b^3} \dots$$

Отбросив малые величины второго порядка, имеем

$$\frac{a \pm E_a}{b \mp E_b} = \frac{a}{b} \pm \frac{aE_b}{b^2} \pm \frac{E_a}{b} = \frac{a}{b} \pm \frac{aE_b + bE_a}{b^2},$$

откуда квадратичная ошибка частного равна

$$E_{a/b} = \pm \frac{aE_b + bE_a}{b^2}.$$

Относительная ошибка частного

$$D_{a/b} = \frac{E_{a/b}}{a/b} = \frac{b(aE_b + bE_a)}{ab^2} = \frac{E_b}{b} + \frac{E_a}{a} = D_a + D_b,$$

т. е. относительная ошибка частного равна сумме относительных ошибок делимого и делителя.

Д. Возведение в степень. Относительную ошибку степени находим как относительную ошибку произведения n приближенных множителей:

$$Da^n = D_a + D_a + D_a + \dots = nD_a.$$

Так как $\frac{Ea^n}{a^n} = Da^n = nD_a$ и учитывая, что $D_a = \frac{E_a}{a}$, то средняя квадратичная ошибка степени будет равна

$$Ea^n = Da^n \cdot a^n = nD_a \cdot a^n = \pm na^{n-1}E_a.$$

Е. Извлечение корня $\sqrt[n]{a \pm E_a}$ представляем как $(a \pm E_a)^{\frac{1}{n}}$.

Применяя выражения для ошибок степени, имеем

$$D_{\sqrt[n]{a}} = \frac{D_a}{n} = \frac{E_a}{na} \quad \text{и} \quad E_{\sqrt[n]{a}} = \pm \frac{E_a}{n \cdot a^{\frac{n-1}{n}}}.$$

Точность числовых коэффициентов и единичных изменений. Абсолютными величинами являются только числа при счете. Числовые коэффициенты, входящие в физические формулы, почти всегда являются величинами приближенными. Наиболее часто встречающаяся величина π всегда берется с некоторым приближением; также приближенными являются коэффициенты расширения различных тел, термический эквивалент работы, удельные теплоемкости и т. д. Все эти величины, входя с большим или меньшим приближением в формулы, влияют на точность конечного результата. Однако в большинстве случаев

точность их значительно выше той точности, которую мы получаем в результате измерений. Поэтому ошибки результатов будут происходить главным образом за счет наших измерений.

Действительно, взяв $\pi = 3,14$, мы делаем ошибку не больше 0,0016; относительная ошибка будет 0,0005. Для коэффициента расширения газов $\alpha = 0,000366$ относительная ошибка равна 0,0008.

Строго говоря, средние квадратичные ошибки применимы только при больших рядах измерений, однако их применяют и при малых рядах. Но как оценить точность отдельных измерений, производившихся только один раз? Пусть наш параллелепипед взвешен на технических весах. Вес его оказался 80,6 г. Какова ошибка этого определения? Рассуждаем так: если взвешивание произведено с точностью до 0,1 г, то неучтенными могут быть только сотые доли грамма. Наибольшая ошибка при таком взвешивании может быть 0,05 г. Эта величина и будет абсолютной ошибкой веса.

Тогда вес запишется так: $P = 80,6 \pm 0,05$ г. Относительная ошибка $D = \frac{0,05}{80,6} = 0,0006$.

Следует обращать внимание на запись результатов измерений, так как форма записи говорит о точности. Если экспериментатор, записывая вес, пишет: $P = 80,60$ г, то это не то же самое, что $P = 80,6$ г. Первая запись указывает на точность взвешивания до 0,01 г, но сотых долей не оказалось, поэтому на их месте пишется нуль. Во втором случае точность взвешивания ограничена 0,1 г. По той же причине нельзя заменить запись 80,6 г записью 80 600 мг, так как последняя запись без указания ошибки может ввести в заблуждение относительно точности взвешивания. При такой записи можно предположить, что взвешивание производилось с точностью до 1 мг. Перевод в миллиграммы $80\ 600 \pm 50$ будет верным.

Наиболее часто встречающейся ошибкой подобного рода является неправильная запись температуры. При измерении с точностью до $0,1^\circ$ запись должна иметь цифру после запятой, если же десятых долей градуса не обнаружено, то на их месте пишется нуль. Поэтому $17,0^\circ$ будет правильно, а 17° неправильно.

Вычисление результатов. Приближенными вычислениями приходится пользоваться также и в тех случаях, когда имеем дело с выражениями вида $(1 \pm \delta)$, где δ мала относительно единицы. Так, например, площадь медного листа со сторонами l_0 и b_0 при нагревании на t° будет $l_t b_t = l_0 (1 + \beta t) b_0 (1 + \beta t) = l_0 b_0 (1 + \beta t)^2$, где $\beta = 0,0000165$. Раскрыв правый член выражения, получим $l_t b_t = l_0 b_0 (1 + 2\beta t + \beta^2 t^2)$. Предположив даже, что $t = 100^\circ$, будем иметь

$$l_t b_t = l_0 b_0 (1 + 0,0033 + 0,000003).$$

Здесь последний член так мал, что им можно пренебречь, поэтому можем написать

$$(1 + \beta t)^2 = 1 + 2\beta t.$$

Подобного рода выражения встречаются довольно часто. При действии с ними можно пользоваться следующими сокращенными формулами, выводимыми на основании правил умножения или бинома Ньютона.

$$(1 + \delta_1)(1 + \delta_2) \dots = 1 + \delta_1 + \delta_2 + \dots \quad (1 - \delta_1)(1 - \delta_2) \dots = 1 - \delta_1 - \delta_2 - \dots$$

$$(1 + \delta)^n = 1 + n\delta \quad (1 - \delta)^n = 1 - n\delta$$

$$\sqrt[n]{1 + \delta} = 1 + \frac{1}{n}\delta \quad \sqrt[n]{1 - \delta} = 1 - \frac{1}{n}\delta$$

$$\frac{1}{1 + \delta} = 1 - \delta \quad \frac{1}{1 - \delta} = 1 + \delta$$

$$\frac{1 + \delta_1}{1 - \delta_2} = 1 + \delta_1 + \delta_2 \quad \frac{1 - \delta_1}{1 + \delta_2} = 1 - \delta_1 - \delta_2$$

Вычислим для примера плотность латуни по геометрическим размерам параллелепипеда и по его весу.

Пусть высота, ширина и длина параллелепипеда будут соответственно равны $a = 27,03 \pm 0,03$ мм, $b = 15,20 \pm 0,03$ мм и $c = 23,11 \pm 0,04$ мм.

Введем относительные ошибки:

$$D_a = \frac{0,03}{27,03}; \quad D_b = \frac{0,03}{15,20}; \quad D_c = \frac{0,04}{23,11}.$$

Так как относительная ошибка произведения равна сумме относительных ошибок множителей, то объем параллелепипеда выразится так:

$$V \pm E_V = abc \pm abc (D_a + D_b + D_c). \\ V = abc = 27,03 \cdot 15,20 \cdot 23,11.$$

Применяя четырехзначные логарифмы, находим:

$$\begin{aligned} \lg a &= \lg 27,03 = 1,4319 \\ \lg b &= \lg 15,20 = 1,1818 \\ \lg c &= \lg 23,11 = 1,3638 \\ \lg abc &= \overline{3,9775}; \quad abc = 9\,495 \text{ мм}^3. \end{aligned}$$

Вычисляем ошибку результата, для чего находим выражение в скобках

$$\begin{aligned} \lg 0,03 &= \overline{2,4771} \\ \lg 27,03 &= 1,4319 \\ \hline \lg D_a &= \overline{3,0452} & D_a &= 0,00111 \\ \lg 0,03 &= \overline{2,4771} \\ \lg 15,20 &= 1,1818 \\ \hline \lg D_b &= \overline{3,2953} & D_b &= 0,00197 \\ \lg 0,04 &= \overline{2,6021} \\ \lg 23,11 &= 1,3638 \\ \hline \lg D_c &= \overline{3,2383} & D_c &= 0,00173 \\ D_a + D_b + D_c &= 0,00481 = D_V \\ \lg (D_a + D_b + D_c) &= \overline{3,6812} \\ \lg abc &= 3,9775 \\ \lg abc (D_a + D_b + D_c) &= \overline{1,6587} & E_V &= 45,6 \end{aligned}$$

Искомый объем $V \pm E_V = 9\,495 \pm 46 \text{ мм}^3$.

Здесь $\pm 46 \text{ мм}^3$ — квадратичная ошибка результата. Относительную ошибку мы уже вычислили; она равна $D_V = 0,0048$, или, округленно, $0,5\%$.

Выражаем объем в сантиметрах, применяя правило, что последняя цифра результата не должна претендовать ни на какую точность, тогда как предпоследняя могла бы еще считаться достоверной; получим $V = 9,49 \pm 0,05 \text{ см}^3$.

Находим плотность. Вес параллелепипеда $P = 80,6 \pm 0,05 \text{ г}$. Относительная ошибка $D_P = \frac{0,05}{80,6} = 0,0006$. Как видим, относительная ошибка при взвешивании значительно меньше, чем при определении объема.

$$\text{Плотность } d \pm E_d = \frac{P}{V} \pm \frac{P}{V} (0,0006 + 0,0048)$$

$$\begin{aligned} \lg P &= 1,9063 \\ \lg V &= 0,9775 \\ \hline \lg \frac{P}{V} &= 0,9288 & d = \frac{P}{V} &= 8,49 \text{ г/см}^3. \end{aligned}$$

$$D_d = D_P + D_V = 0,0054, \text{ или, округляя, равна } 0,005.$$

$$E_d = D_d \cdot d = 0,005 \cdot 8,49 = \pm 0,04.$$

Искомая плотность $d = 8,49 \pm 0,04 \text{ г/см}^3$.

Вместо пользования таблицами логарифмов вполне возможно и желательно производить вычисления при помощи логарифмической линейки. Точность вычислений при этом вполне достаточна.

Как правило, все записи, или так называемые протоколы опытов, должны производиться четко и ясно, чтобы при последующей обработке не возникало никаких сомнений. Для лабораторных работ следует завести особую тетрадь из клетчатой бумаги, и все записи должны производиться в ней, а отнюдь не на разрозненных листах бумаги. В этом руководстве к каждой задаче прилагается форма отчета, которой следует придерживаться при записях и вычислении окончательного результата. Черновые вычисления производятся в той же тетради на запасной странице.

Работа № 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПРАВИЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ (Измерение штангенциркулем и микрометром)

Приборы: 1) штангенциркуль, 2) измеряемое тело, 3) технические весы с разновесом, 4) микрометр.

Плотностью тела называем массу в единице объема:

$$d = \frac{m}{V} \text{ г/см}^3, \quad (1)$$

где d — плотность, m — масса тела и V — объем. В системе CGS масса тела выражается в граммах, объем — в кубических сантиметрах. Масса тела m численно равна его весу P . Вес тела P находится взвешиванием на технических весах с точностью до 0,1 г. Эти весы обычного коромыслового типа снабжены арретиром, т. е. приспособлением, которое поднимает коромысло и предохраняет от бесполезного трения и изнашивания призмы весов тогда, когда весы находятся без употребления. Рукояткой, находящейся на передней стороне подставки весов, можно освобождать коромысло от предохраняющих опор или, наоборот, положить на опоры, т. е. ар-

13-2

ретировать. Взвешивание производится обычным способом без соблюдения приемов и предосторожностей, необходимых при точных взвешиваниях на аналитических весах. Но во всяком случае следует помнить, что:

1) нагрузка весов взвешиваемым телом или гирями, а также снятие тела или гирь с чашки весов производится только при арретированных весах;

2) взвешиваемое тело кладется на левую чашку весов, а гири — на правую;

3) гири следует брать только пинцетом, а не пальцами, постепенно переходя от крупных к более мелким;

4) гири должны находиться или в ящике в соответствующих гнездах, или на чашке весов, но ни в коем случае не должны быть разбросаны на столе или в разных местах;

5) перед взвешиванием на технических весах необходимо убедиться, находятся ли они в порядке. После освобождения их от арретира надо посмотреть, не перетягивает ли какая-нибудь чашка и не задевает ли стрелка указателя при качаниях коромысла за шкалу с делениями.

Примерная схема взвешивания дается в следующей таблице.

Разновес на правой чашке	Состояние правой чашки	Действия с разновесом
100 г	Перегружена	Положена на правую чашку гирька в 100 г Снимаем 100 г, кладем 50 г
50 г	Недогружена	Кладем 20 г
50 + 20	Недогружена	Кладем 10 г
50 + 20 + 10	Перегружена	Снимаем 10 г, кладем 5 г
50 + 20 + 5	Перегружена	Снимаем 5 г, кладем 2 г
50 + 20 + 2	Недогружена	Кладем 2 г
50 + 20 + 2 + 2	Перегружена	Снимаем 2 г, кладем 1 г
50 + 20 + 2 + 1 +	Недогружена	Кладем 0,5 г
50 + 20 + 2 + 1 + 0,5	Перегружена	Снимаем 0,5 г, кладем 0,2 г
50 + 20 + 2 + 1 + 0,2	Уравновешена	Записываем находящийся на чашке разновес

После того как тело взвешено, определяем его геометрические размеры штангенциркулем¹.

Штангенциркуль представляет собой линейку (масштаб), разделенную на сантиметры и миллиметры (рис. 3). Линейка снабжена двумя ножками, из которых одна

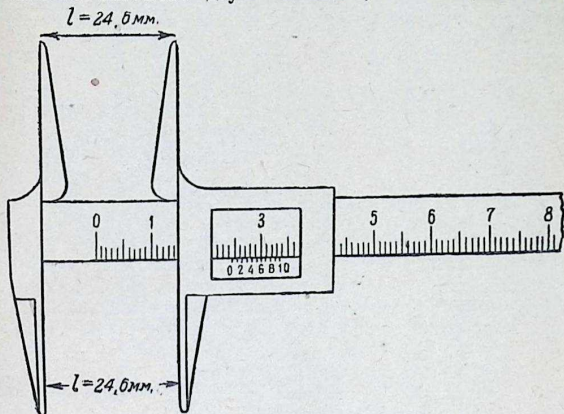


Рис. 3. Штангенциркуль.

подвижная. Между ножками штангенциркуля зажимается измеряемое тело.

Для производства точных измерений штангенциркуль снабжен нониусом. Нониус представляет собой короткую линейку, помещенную на подвижной ножке и скользящую вдоль масштаба вместе с ножкой. Нониус, изображенный на рис. 4, обычно разделен на 10 равных делений, а вся его длина равна 9 делениям масштаба, т. е. 9 мм, если масштаб дан в миллиметрах. Следовательно, каждое деление нониуса короче деления (1 мм) масштаба на 0,1 мм. Когда ножки штангенциркуля сдвинуты до соприкосновения, то нуль нониуса совпадает с нулем масштаба.

¹ Рекоменгуемый порядок работ необязателен. Можно сначала определить размеры тела, а затем его вес.

Для определения размеров тела раздвигаем ножки штангенциркуля, помещаем между ними измеряемое тело и перемещаем подвижную ножку до плотного соприкосновения с измеряемым телом. Наблюдаем, как далеко отодвинулся нуль нониуса от нуля масштаба. Если бы нуль нониуса точно совпал с каким-нибудь делением

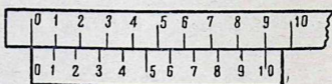


Рис. 4. Нониус — устройство.

масштаба, то номер последнего дал бы нам точные размеры тела в миллиметрах. Но обычно нуль нониуса не совпадает с делением шкалы и смещается на некоторую долю деления от штриха, соответствующего целым миллиметрам.

Рассмотрим рис. 5. Нониус смещен вправо, и его нулевое деление лежит между пятым и шестым делениями

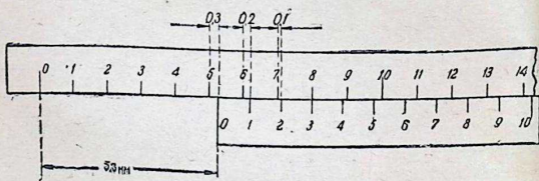


Рис. 5. Отсчет по нониусу.

шкалы. Следовательно, смещение нониуса больше 5 мм и меньше 6 мм. Пусть это смещение будет $5 + x$ мм. Чтобы найти x , обратимся к рисунку. Мы видим, что третье деление нониуса точно совпадает с восьмым делением шкалы. Так как деление нониуса короче деления шкалы на 0,1 мм, то расстояние между седьмым делением масштаба и вторым делением нониуса равно 0,1 мм, между шестым делением масштаба и первым делением нониуса — 0,2 мм, между пятым масштаба и нулевым нониуса — 0,3 мм. Это и есть искомый x . Отсюда выводим

простое правило для измерения штангенциркулем. Отсчитывают число целых миллиметров смещения нуля нониуса, затем находят совпадающий штрих нониуса. Номер этого штриха дает число десятых долей миллиметра, которое прибавляется к числу целых миллиметров.

Пример приведен на рис. 3. Ноль нониуса перешел за 24 мм, длина тела больше 24 мм и меньше 25 мм. Шестое деление нониуса совпадает с делением основного масштаба, следовательно, длина избыточной части равна 0,6 мм, а вся длина тела равна $24 \text{ мм} + 0,6 \text{ мм} = 24,6 \text{ мм}$.

Этим способом могут быть измерены все наружные размеры тела. Для определения внутренних размеров тела, например, отверстий и т. п., штангенциркуль имеет дополнительную пару ножек, изображенную в верхней части рис. 3. При пользовании этими ножками их опускают в измеряемое отверстие и там раздвигают до соприкосновения со стенками, после чего производят соответствующие отсчеты шкалы и нониуса обычным путем. Подставляя найденные значения линейных размеров тела, выраженных в сантиметрах, в соответствующую геометрическую формулу, вычисляем объем тела в кубических сантиметрах. Наконец, подставив в формулу (1) найденные значения m и V , находим плотность d .

Приступая к работе с нониусом, следует проверить положение его нуля. Для этого следует сдвинуть ножки штангенциркуля до соприкосновения и заметить, совпадает ли ноль нониуса с нулем масштаба. Если совпадения нет, то заметить по отметкам нониуса, на сколько делений (десятых миллиметра) ноль сбит в ту или иную сторону. Это расхождение нуля будет, очевидно, постоянным при всех измерениях, и тогда эту индивидуальную поправку прибора следует прибавлять или отнимать от результата измерений.

Более точные измерения можно произвести при помощи микрометра, изображенного на рис. 6. Массивная скоба A имеет на одном из концов опорную пятю B , на другом — цилиндрическую трубку C с резьбой внутри, по которой перемещается винт. Шаг резьбы равен точно 1 мм. Поэтому винт при полном обороте перемещается поступательно на 1 мм. Если винт повернут на 0,01 окружности, то поступательное смещение равно 0,01 мм. Винт соединен с другой, более широкой трубкой D , вра-

шающейся и перемещающейся вместе с винтом относительно внутренней неподвижной трубки *C*. На трубке нанесено 100 делений шкалы. Вдоль внутренней неподвижной трубки нанесен продольный штрих и неподвижная шкала. Пользуясь подвижной шкалой и штрихом, можно определить угол поворота подвижной трубки, а следовательно, и поступательное смещение винта с точностью до 0,01 мм. Полные обороты, соответствующие целым миллиметрам смещения винта, прочитываются по шкале неподвижной трубки. Когда винт приведен в со-

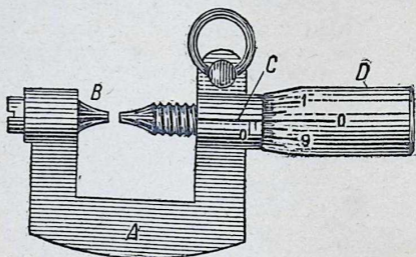


Рис. 6. Микрометр.

прикосновение с опорной пятой, то нулевое деление трубки должно совпасть с продольным штрихом неподвижной трубки. Если совпадения нет, то замечаем показания на круговой шкале. Это будет индивидуальная ошибка прибора. Она берется со знаком плюс или минус.

Так как винтом можно очень сильно сжать измеряемое тело и даже его деформировать, то на ручке микрометра помещается обыкновенно дополнительная кнопка, за которую и следует вращать винт. При соприкосновении винта с измеряемым телом кнопка может вращаться, не закручивая винта. Малые размеры предпочтительнее определять микрометром, так как относительная ошибка при этом получается меньше, чем при измерении штангенциркулем.

Применяются также микрометры с шагом, равным 0,5 мм. Шкала таких микрометров разделена на 50 частей. На неподвижной шкале нанесены деления по 0,5 мм,

Необходимые для определения объема размеры тела — длина, ширина, высота, диаметр — должны быть промерены в нескольких (3—5) различных местах, и среднее значение каждого размера должно быть подставлено в формулу объема тела.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 1. Определение плотности твердого тела правильной геометрической формы

Чертеж измеряемого тела с буквенным обозначением размеров.

Геометрическая формула объема $V =$

Поправка штангенциркуля ...

Масса тела $m \pm E_m = \dots D_m = \dots$

Первый размер (длина) $= l$

1-е измерение l	Δ	Δ^2
2-е "
3-е "
4-е "
5-е "

Среднее $l =$ $\Sigma \Delta^2 =$

$$E_l = \pm \sqrt{\frac{\Sigma \Delta^2}{n(n-1)}} \quad \text{Результат } \bar{l} = \dots \pm$$

По такой же форме производится запись результатов измерения высоты, ширины и внутренних размеров тела.

Искомый объем $V \pm E_V = \dots D_V = \frac{E_V}{V} = \dots$

Плотность $d = \frac{m}{V} \pm \frac{m}{V} (D_m + D_V) = \dots D_d = \dots$

Работа № 2. ВЗВЕШИВАНИЕ НА АНАЛИТИЧЕСКИХ ВЕСАХ

Взвешивание на аналитических весах отличается от взвешивания на обычных технических весах рядом приемов, при соблюдении которых достигается точность до 0,1 мг и даже до 0,01 мг.

По своей конструкции аналитические весы отличаются особым устройством коромысла, значительно уменьшающим его вес. У них коромысло укорочено, бла-

годаря чему сокращается период качания. Кроме того, для уменьшения трения при качании коромысла весов все призмы сделаны из очень твердого материала (агат, сталь) и из такого же материала сделана опорная пластинка колонки, на которой лежит средняя призма коромысла. За качаниями коромысла можно следить по прикрепленной к нему длинной стрелке, конец которой перемещается по короткой шкале, укрепленной на колонке.

Так же как и большинство технических весов, аналитические весы имеют арретирующее, т. е. запирающее приспособление, позволяющее вращением рукоятки, помещенной спереди у нижней доски весов, освобождать лезвия всех призм от нагрузки и тем уменьшать их изнашивание. Арретиром следует пользоваться осторожно, медленно его опуская, чтобы не сбить серьги подвесов чашек с их призм. **При нагрузке чашек и при всяком изменении их нагрузки весы должны быть обязательно арретированы.**

Перед взвешиванием необходимо убедиться в исправности весов, для чего осторожно освобождают весы от арретира. При этом коромысло начинает качаться, и стрелка должна плавно, без толчков перемещаться по шкале.

Убедившись в исправности весов, определяют так называемую нулевую точку, или положение стрелки при равновесии ненагруженных весов. Как бы хорошо ни были сделаны весы, все же качания коромысла сопровождаются некоторым трением и поэтому затухают, т. е. размахи коромысла и связанной с ним стрелки убывают. Каждое последующее отклонение стрелки на какую-то малую долю деления меньше предыдущего. Стрелка не доходит до того положения, до которого она дошла бы при отсутствии трения. Поэтому самый простой способ определения нулевой точки — дожидаться, когда колебания совершенно затухнут, и определить деление, на котором остановится стрелка; результат будет неверен, потому что при своем последнем смещении стрелка остановится несколько раньше, чем это произошло бы при отсутствии трения. Поэтому применяется метод, позволяющий исключить влияние трения. Для этого осторожно освобождаем весы от арретира так, чтобы стрелка ка-

чалась в пределах 5—10 делений шкалы, и отмечаем всего три последовательных отклонения стрелки по шкале — два в одну сторону и одно — в другую. Условимся считать начало шкалы у левого крайнего штриха, а конец — у крайнего правого. При некотором навыке можно легко отсчитывать положение конца стрелки на шкале в момент ее наибольшего отклонения с точностью до 0,1 деления шкалы и успеть записать отсчет, пока стрелка перемещается от одного крайнего положения к другому.

Пусть первый отсчет при отклонении стрелки влево будет l_1 , соответствующий отсчет вправо — l_2 и третий отсчет опять влево — l_3 (рис. 7).

Вследствие трения $l_3 > l_1$. Разность $l_3 - l_1$ определит затухание стрелки за один полный период. Очевидно, что за половину периода затухание будет равно $\frac{l_3 - l_1}{2}$. На эту вели-

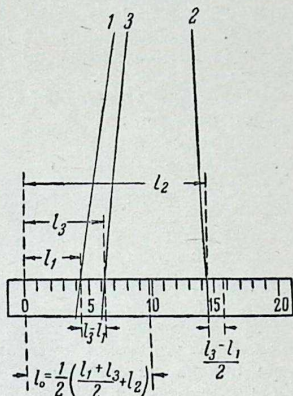


Рис. 7. Отклонения стрелки на весах.

чину не доходит до своего истинного положения стрелка при втором отклонении l_2 , и истинный отсчет второго отклонения будет $l_2 + \frac{l_3 - l_1}{2}$. Теперь легко найти положение истинного равновесия. Оно находится на шкале посередине между l_1 и $l_2 + \frac{l_3 - l_1}{2}$ и равно:

$$l_0 = \frac{1}{2} \left(l_1 + l_2 + \frac{l_3 - l_1}{2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{l_1 + l_3}{2} + l_2 \right).$$

Можно было бы доказать, что из пяти последовательных качаний положение нулевой точки определится так:

$$l_0 = \frac{\frac{l_1 + l_3 + l_5}{3} + \frac{l_2 + l_4}{2}}{2}.$$

Отсюда получаем практический прием определения нулевой точки: взяв нечетное количество последовательных отклонений стрелки, нужно найти среднее арифметическое из всех отклонений влево, затем соответствующее среднее арифметическое из отклонений вправо; полусумма полученных средних даст искомое нулевое положение стрелки.

Нулевая точка l_0 вычисляется с точностью до 0,1 деления. Ее положение не должно обязательно совпадать с серединой шкалы, но может отклоняться на 2—3 деления от середины.

Рассмотрим пример определения l_0 и порядок производства записей.

Отклонения		
Влево	Вправо	
1-й отсчет 6,4		$l_0 = \frac{6,7 + 14,2}{2} = 10,5.$
	2-й отсчет 14,2	
3-й отсчет 7,0		
Среднее <u>6,7</u>		

После того как нулевая точка определена, следует определить чувствительность весов.

Если на правую чашку весов положить груз в 1 мг, то стрелка указателя сместится влево, и весы примут новое положение равновесия. Можно определить положение равновесия в этом случае также из трех качаний, как мы определяли нулевую точку. Пусть это положение будет L . Очевидно, что $L < l_0$. Тогда разность $n = l_0 - L$ даст величину смещения стрелки при перегрузке чашки весов грузом в 1 мг. Эта величина называется чувствительностью весов. Надо заметить, что мы не найдем в ящичке с разновесом нагрузки в 1 мг. Самым мелким разновесом является пластинка в 0,01 г, т. е. 10 мг. Нагрузка от 10 до 1 мг производится при помощи рейтера (гусарика), сделанного из тонкой алюминиевой проволоки, весящего 10 мг и имеющего изображенную на рис. 8 форму перевернутого латинского U с петелькой наверху. Для помещения рейтера каждое плечо коромысла разделено на 10 частей: нулевое деление — над средней призмой, 10-е — над крайними призмами. По правилам рычага гусарик на чашке весов, или, что все равно, на 10-м делении коромысла, уравновешивает

вает 10 мг, помещенных на другой чашке весов. По теореме, что вращающий момент силы пропорционален длине плеча, гусарик, помещенный на 9-е, 8-е и т. д. деление плеча, уравновесит 9 или 8 мг и т. д., помещенных на другую чашку весов. Для нагрузки в 1 мг рейтер помещается на 1-е деление коромысла весов. Рейтер подвешивается на конце специального рычага, укрепленного на стержне, конец которого выводится через боковую стенку весов наружу. При перемещении стержня рейтер скользит над коромыслом весов. Поворачивая стержень, можно рейтер опустить на коромысло. Комбинируя эти оба движения, можно помещать рейтер на любое деление плеча, каждый раз выдвигая стержень из петельки рейтера, отводя его в сторону и вверх. Пусть нулевое положение весов $l_0 = 10,5$. Поместив рейтер на 1-е деление, получим положение равновесия $L = 8,4$, тогда чувствительность

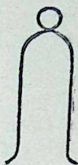


Рис. 8.
Рейтер.

$$n = 10,5 - 8,4 = 2,1 \frac{\text{деление}}{\text{мг}}.$$

При малой чувствительности весов, когда $n \approx 1$, рекомендуется определение чувствительности производить при нагрузке в 2 мг. В этом случае

$$n = \frac{l_2 - L}{2}.$$

Теперь, зная положение нулевой точки и чувствительность весов, можно приступить к взвешиванию тела, не забывая арретировать весы при каждом изменении нагрузки и соблюдая приемы и предосторожности, указанные в работе № 1.

При арретированных весах помещают взвешиваемое тело на левую чашку весов, на правую же ставят гирию, приблизительно соответствующую по весу взвешиваемому телу, и осторожно освобождают арретир. Если вес гири велик, то весы арретируют и гирию заменяют следующей — меньшего веса. Так постепенно переходят от крупных гирь к мелкому разновесу, поступая так же, как и в работе № 1. Помещая рейтер на различные

деления коромысла весов, можно довольно точно уравновесить груз. Положение равновесия нагруженных весов L' определяется, как и прежде, из трех качаний. Если оно совпадает с нулевой точкой, то груз как раз уравновешивается разновесом. Но такое совпадение случается крайне редко. Обычно положение равновесия нагруженных весов не совпадает с нулевой точкой, а отклоняется от нее в ту или иную сторону на несколько делений. По величине этого отклонения, которое не должно превышать 3—4 делений, можно точно вычислить вес тела, воспользовавшись чувствительностью весов, определенной нами ранее.

Рассуждаем так: если бы вес тела в точности соответствовал весу гирь, то стрелка весов заняла бы нулевое положение l_0 . Так как $L' \neq l_0$, то вес разновеса не совпадает с весом тела. При этом если $L' > l_0$, то разновеса положено мало, если же $l_0 > L'$, то весы перегружены, т. е. вес разновеса больше веса тела. При малых отклонениях стрелки существует прямая пропорциональность между смещением стрелки и перегрузкой. Поэтому, поделив смещение конца стрелки $L' - l_0$ на перегрузку x , мы получим отклонение, соответствующее перегрузке в 1 мг, т. е. определенную нами ранее чувствительность весов n :

$$\frac{L' - l_0}{x} = n,$$

откуда

$$x = \frac{L' - l_0}{n} \text{ мг.}$$

Величина x может иметь знак плюс или минус, в зависимости от положения L' .

Вычислив x , легко определить вес тела. Надо прибавить к разновесу на чашке количество миллиграммов, определяемое по положению рейтера и x , и выразить полученную сумму в граммах.

Пусть нулевое положение весов, как было рассмотрено выше, будет $l_0 = 10,5$. На чашке весов лежит разновес 72 г, 540 мг и рейтер находится на 7-м делении, что дает еще 7 мг. При этой нагрузке из трех качаний определяется положение равновесия $L' = 11,1$, следовательно, весы недогружены.

Определяем x :

$$x = \frac{11,1 - 10,5}{2,1} = 0,3 \text{ мг.}$$

Искомый вес тела будет $P = 72,5473 \text{ г.}$

Как бы точны ни были весы и как бы точно ни производилось взвешивание, всегда в результате может быть ошибка, вызываемая неравноплечностью весов: одно плечо весов может быть на какую-то очень малую величину больше или меньше, чем другое. Эта ошибка может быть исправлена двойным взвешиванием. При двойном взвешивании тело взвешивается два раза: один раз на правой чашке весов, а другой раз на левой, и за истинный вес принимается среднее из двух полученных результатов.

Порядок работы. 1. Убедиться в исправном состоянии весов; если весы неисправны — обратиться к руководителю. 2. Найти нулевую точку. 3. Определить чувствительность. 4. Загрузить весы и найти положение равновесия. 5. Вычислить добавочную нагрузку. 6. Снять разновес, начиная с больших гирь, и записать каждую снятую гирию в форму отчета. 7. Записать окончательный вес тела.

Основные правила обращения с весами: 1) не трогать ни коромысла, ни чашек весов; 2) держать дверки футляра закрытыми, открывая боковые дверки только для помещения тела и разновеса; 3) разновес брать только пинцетом; 4) арретировать весы при всяком снятии и наложении груза и разновеса; 5) держать разновес только или в своем гнезде в ящике разновеса, или на чашке весов.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 2. Взвешивание на аналитических весах
Груз № Весы №

Определение нулевой точки	Определение положения равновесия весов, нагруженных 1 мг
Качание влево вправо	Рейтер на 1-м делении
1-е определение	1-е определение
$l_1 = l_2 = l_0' = \frac{l_1 + l_3}{2} + l_2 =$	$l_1 = l_2 = l_3 = L' = \frac{l_1 + l_3}{2} + l_2 =$

Определение нулевой точки

2-е определение

$$\begin{aligned} l_1 = \\ l_2 = \\ l_3 = \end{aligned} \quad l_0'' = \frac{\frac{l_1 + l_3}{2} + l_2}{2} =$$

3-е определение

$$\begin{aligned} l_1 = \\ l_2 = \\ l_3 = \end{aligned} \quad l_0''' = \frac{\frac{l_1 + l_3}{2} + l_2}{2} =$$

Среднее

$$l_0 = \frac{l_0'' + l_0''' + l_0'''}{3} =$$

Определение положения равновесия весов, нагруженных 1 мг

2-е определение

$$\begin{aligned} l_1 = \\ l_2 = \\ l_3 = \end{aligned} \quad L'' = \frac{\frac{l_1 + l_3}{2} + l_2}{2} =$$

3-е определение

$$\begin{aligned} l_1 = \\ l_2 = \\ l_3 = \end{aligned} \quad L''' = \frac{\frac{l_1 + l_3}{2} + l_2}{2} =$$

Среднее

$$L = \frac{L'' + L''' + L'''}{3} =$$

Определение чувствительности весов

$$n = l_0 - L = \dots \text{ делений на 1 мг}$$

Определение положения равновесия нагруженных весов

$$\begin{aligned} l_1 = \\ l_2 = \\ l_3 = \end{aligned} \quad L_1' = \frac{\frac{l_1 + l_3}{2} + l_2}{2} =$$

$$\begin{aligned} l_1 = \\ l_2 = \\ l_3 = \end{aligned} \quad L_2' = \frac{\frac{l_1 + l_3}{2} + l_2}{2} =$$

$$\begin{aligned} l_1 = \\ l_2 = \\ l_3 = \end{aligned} \quad L_3' = \frac{\frac{l_1 + l_3}{2} + l_2}{2} =$$

$$\text{Среднее } L' = \frac{L_1' + L_2' + L_3'}{3} =$$

Определение добавочного груза

$$x = \frac{L' - l_0}{n} =$$

Запись снимаемого разновеса

1-я гирька . . . г
2-я гирька . . . г
3-я гирька . . . г
4-я гирька . . . г . мг
5-я гирька . . . г . мг
6-я гирька мг
7-я гирька мг
. мг
Рейтер мг
x = мг

Вес тела . . . г мг

Работа № 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПИКНОМЕТРОМ

Приборы: 1) аналитические весы, 2) разновес, 3) пикнометр, 4) дистиллированная вода, 5) исследуемая жидкость, 6) исследуемое твердое тело, 7) резиновая груша со стеклянным наконечником.

Упражнение 1. Определение плотности жидкости.

Пикнометр — это стеклянный сосуд определенной емкости, наиболее распространенные типы которого изображены на рис. 9 и 10. Пикнометр (рис. 9) имеет притертую пробку с капилляром внутри. Если пикнометр наполнить жидкостью до верхнего края горлышка и затем вставить пробку, то жидкость будет вытесняться пробкой в капилляр до самого верха. Таким образом, можно наполнить пикнометр до верхнего конца капилляра. В другом типе пикнометра (рис. 10) жидкость наливается пипеткой до метки *a* на горлышке, и объем ее тоже является определенным.

Обозначим вес пустого пикнометра P , пикнометра с водой P_0 , пикнометра с исследуемой жидкостью P_1 .

Тогда плотность исследуемой жидкости будет

$$d = \frac{P_1 - P}{P_0 - P}. \quad (1)$$

Уравнение (1) выражает плотность при температуре опыта, поэтому вода и исследуемая жидкость должны иметь комнатную температуру.

Для решения задачи необходимо произвести последовательно три взвешивания на аналитических весах со всеми предосторожностями, указанными в работе № 2.

Перед тем как взвешивать пустой пикнометр, его следует вымыть, сполоснуть дистиллированной водой и тщательно просушить. Для просушки пикнометра его нагревают в сушильном шкафу и продувают при помощи резиновой груши со стеклянным наконечником, который опускается в пикнометр.

При наполнении пикнометра соблюдаются следующие правила: 1) перед наполнением пикнометра жидкостью его следует сполоснуть той же жидкостью, 2) наполнять пикнометр следует так, чтобы на его стенках не осталось ни малейших пузырьков воздуха, 3) наполненный



Рис. 9. Пикнометр с капилляром.

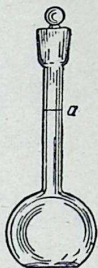


Рис. 10. Пикнометр с пробкой.

жидкостью пикнометр должен быть сухим снаружи, для чего его следует вытереть фильтровальной бумагой.

Упражнение 2. Определение плотности твердого тела.

Пикнометром можно также определить плотность твердого тела, если размеры его позволяют поместить тело в пикнометр. При таком определении исходят из следующих соображений.

Пусть вес тела — p , вес пикнометра с водой — P_0 . Если теперь в воду пикнометра погрузить исследуемое тело, то оно вытеснит объем воды, равный объему тела. Новый вес пикнометра с водой и погруженным телом будет P_2 . Вес вытесненной воды будет равен $P_0 + p - P_2$, а искомая плотность тела

$$d = \frac{p}{P_0 + p - P_2} \quad (2)$$

Следует обратить внимание на то, чтобы на внесенном теле не осталось пузырьков воздуха. Твердое тело — кристаллы — вносятся в небольшом количестве. Достаточно объема около $0,5 - 1 \text{ см}^3$.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 3. Определение плотности жидких и твердых тел пикнометром ¹

Упражнение 1

Упражнение 2

Вес пустого пикнометра $P =$
 Вес пикнометра с водой $P_0 =$
 Вес пикнометра с жидкостью
 $P_1 =$

Плотность жидкости

$$d = \frac{P_1 - P}{P_0 - P} =$$

Вес тела $p =$
 Вес пустого пикнометра $P =$
 Вес пикнометра с водой $P_0 =$
 Вес пикнометра с водой и телом
 $P_2 =$
 Плотность тела

$$d = \frac{p}{P_0 + p - P_2}$$

¹ Если производятся оба упражнения, то работу начинают с упражнения 2 и полученные веса пикнометра P и P_0 применяют в первом упражнении.

Работа № 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ДВУХЗВЕННОЙ СИСТЕМЫ

Приборы: 1) два стержня, соединенных болтом с гайкой; 2) линейка; 3) призма; 4) прикрепленный к столу штатив с подвесом; 5) секундомер.

Момент инерции I тела, вращающегося вокруг оси O , выражается формулой:

$$J = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + \dots = \sum m r^2,$$

где $r_1, r_2, r_3 \dots$ — расстояния элементарных масс $m_1, m_2, m_3 \dots$ от оси вращения O .

Вычисление момента инерции для тел неправильной формы крайне затруднительно, поэтому его определяют обыкновенно опытным путем.

В этой работе требуется определить момент инерции системы двух звеньев относительно оси вращения, проходящей через конец одного из них. Стержни скрепляются винтом, образуя жесткую систему, форма которой может меняться по желанию.

Аналогичную систему образуют верхняя и нижняя конечности тела человека, вращающиеся соответственно в плечевом или тазобедренном суставе.

В основе метода лежат следующие соображения. Соединим стержни вместе, как показано на рис. 11, так, чтобы их оси располагались под каким-то углом α , и закрепим гайку болта, соединяющего стержни. Вверху одного из стержней вставлена стальная ось. На подвесе, закрепленном в штативе, имеется гнездо для оси. Таким образом, подвесив стержень за ось, получаем физический маятник, который может качаться вокруг оси O . Определим момент инерции этого маятника относительно оси O .

Масса стержней — M г. Центр тяжести маятника в точке P .

Расстояние от оси вращения O до центра тяжести P равно d см. Отклоним маятник на угол φ и заставим его качаться. Когда маятник займет вертикальное положение, то сила тяжести совершит при этом работу Mgh . Работа равна произведению силы Mg на вертикальное

смещение центра тяжести, равное h . Маятник получит эквивалентное количество кинетической энергии.

$$Mgh = I \frac{\omega^2}{2}, \quad (1)$$

где I — момент инерции маятника относительно оси O и ω — его угловая скорость при прохождении вертикального положения.

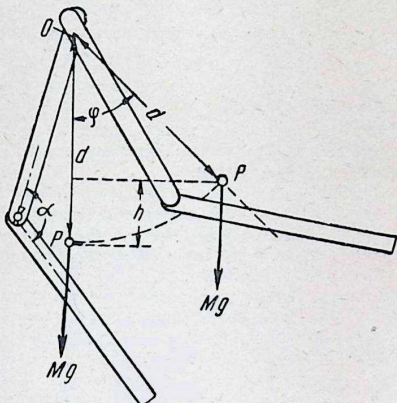


Рис. 11. Физический маятник.

Множитель h равен $d - d \cos \varphi$. Поэтому уравнение (1) пишется так: $Mgd(1 - \cos \varphi) = I \frac{\omega^2}{2}$, (2)

откуда угловая скорость

$$\omega = \sqrt{\frac{2Mgd(1 - \cos \varphi)}{I}}. \quad (3)$$

Наш маятник будет совершать качания с каким-то периодом T . Возьмем математический маятник с какой-нибудь массой M и подберем его длину l такой, чтобы амплитуда и период математического маятника в точности

были равны амплитуде и периоду T нашего физического маятника (рис. 12). Тогда оба маятника будут качаться синхронно, т. е. скорости их в каждый момент времени будут одинаковы. При возвращении математического маятника в начальное положение работа силы тяжести превратится в кинетическую энергию. Запишем это так:

$$Mgl(1 - \cos \varphi) = I_1 \frac{\omega^2}{2}. \quad (4)$$

Момент инерции I_1 математического маятника равен

$$I_1 = Ml^2.$$

Вставим это значение в формулу (4) и найдем угловую скорость

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{2g(1 - \cos \varphi)}{l}}. \quad (5)$$

По условию синхронности угловые скорости обоих маятников в каждый момент времени равны. Потому равны уравнения (3) и (5):

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{2Mgd(1 - \cos \varphi)}{I}} &= \\ &= \sqrt{\frac{2g(1 - \cos \varphi)}{l}}, \end{aligned} \quad (6)$$

откуда находим момент инерции I :

$$I = Mdl. \quad (7)$$

Из формулы $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, определяющей период качания математического маятника, определим значение l и вставим в выражение (7):

$$I = \frac{MdgT^2}{4\pi^2}. \quad (8)$$

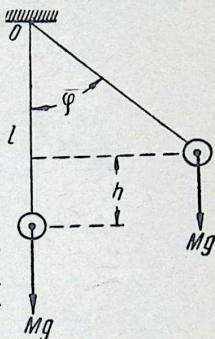


Рис. 12. Математический маятник.

Математический маятник уже не нужен, так как T одинаково и для математического, и для нашего физического маятника и может быть определено по качаниям

последнего. Мы получили выражение (8) для определения момента инерции, в которое входят постоянные величины и определяемые опытным путем. Масса M равна сумме масс первого стержня m_1 и второго m_2 . Эти величины определяются взвешиванием на технических весах.

Период качания T определяется при помощи секундомера. В момент наибольшего отклонения маятника пускают в ход секундомер и отсчитывают $N=40-50$ полных качаний маятника. С последним качанием включают секундомер. Тогда период одного качания равен времени t , показываемому секундомером, деленному на число полных качаний N , т. е.

$$T = \frac{t}{N}.$$

Несколько сложнее определение величины d — расстояния центра тяжести системы от оси вращения.

Его можно произвести следующим образом. Кладем на линейку трехгранную призму ребром вверх, и на призме

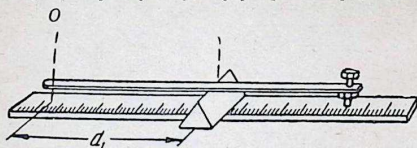


Рис. 13. Определение центра тяжести на ребре призмы.

уравновешиваем стержень (рис. 13). Затем на линейке отсчитываем расстояние d_1 от оси O до середины призмы. При этом болт и гайка должны быть на стержне. Для второго стержня тем же методом определим d_2 — расстояние центра тяжести от середины отверстия для болта.

Зная d_1 и d_2 , найдем положение центра тяжести двухзвенной системы, для чего применим графический метод (рис. 14).

Из элементарной физики известно, что центр двух масс находится на линии, соединяющей эти массы. Точка его приложения делит расстояние между ними на части, обратно пропорциональные массам. На листке бумаги отложим линию OD , равную длине первого звена. Под углом α к ней проводим линию DC , соответствующую оси второго звена. В точках A и B помещены массы m_1 и m_2 ; центр масс будет лежать на линии AB . Из точек A и B проведем параллельные отрезки AE_1 и BF , пропорциональные массам m_1 и m_2 . Отрезок BF отложим вверх от точки B и проведем линию EF . Тогда точка H разделит линию AB на части, пропорциональные отрезкам AE и BF , т. е. массам m_1 и m_2 .

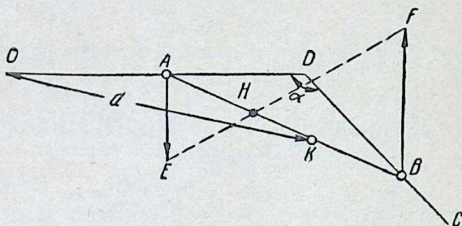


Рис. 14. Графическое определение центра тяжести.

Для получения обратной пропорциональности надо отрезок NB отложить от точки A . Это будет AK . Отрезок KB будет равен AN . Теперь соблюдена обратная пропорциональность, и точка K есть центр масс m_1 и m_2 . Линия OK — расстояние центра масс от оси вращения — измеряется масштабной линейкой на чертеже. Это будет искоемое d в уравнении (8).

Метод применим для любого угла α . Но при углах $\alpha = 0$ и $\alpha = 180^\circ$ проще находить d непосредственным измерением на трехгранной призме.

Работу выполняют для трех положений звеньев при углах $\varphi = 0^\circ, 90^\circ$ и 180° . Результаты сравнивают.

Форма протокола следующая.

Работа 4. Определение момента инерции двухзвенной системы

Длина первого стержня =
 Расстояние его центра тяжести от оси $d_1 =$
 То же для второго стержня от оси отверстия $d_2 =$

Масса первого стержня $m_1 =$
 " второго " $m_2 =$
 " обеих стержней $M =$

Число качаний N
 Продолжительность всех качаний t
 Период одного качания T
 Расстояние от оси вращения до центра тяжести d
 Момент инерции I

1-й опыт	2-й опыт	3-й опыт

Приложить график, по которому определялось расстояние центра масс от оси вращения.

Работа № 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ ВИСКОЗИМЕТРОМ

Приборы: 1) вискозиметр, 2) термометр, 3) исследуемые жидкости, 4) пикнометр, 5) пипетка на 5 см³.

В установленном потоке жидкости скорость отдельных частиц различна. В простейшем случае течения жидкости по неподвижной плоскости наименьшей скоростью обладает слой, перемещающийся около самого дна. Скорость же остальных, параллельных дну слоев жидкости возрастает с увеличением расстояния от дна. Рассмотрим два параллельных слоя, находящихся на расстоянии x см один от другого и обладающих различными скоростями u_1 и u_2 . Промежуточные слои жидкости перемещаются каждый со своей скоростью, величина которой правильно изменяется в пределах от u_1 до u_2 .

Выражение $\frac{u_1 - u_2}{x} = \text{град. } u$ характеризует изменение скорости в пространстве между слоями и называется градиентом скорости. Это есть вектор, направленный перпендикулярно скорости. Числовое значение его может быть равно единице в том случае, если рассматриваемые

слои находятся на расстоянии $x = 1$ см и разность скоростей $u_1 - u_2 = 1$ см/сек.

Благодаря наличию градиента скорости, между соседними слоями возникает трение. Сила трения приложена к поверхности движущегося слоя и направление ее обратно направлению скорости. Величина силы F пропорциональна площади перемещающихся слоев S и, кроме того, зависит от свойств жидкости и может быть выражена так:

$$F = \eta \cdot \text{град.} u \cdot S.$$

В этом выражении величина η называется коэффициентом вязкости жидкости. Решаем это выражение относительно η

$$\eta = \frac{F}{S \cdot \text{град.} u}. \quad (1)$$

Отсюда ясен физический смысл величины η . Коэффициент вязкости численно равен силе трения, рассчитанной на 1 см^2 поверхности, возникающей между двумя слоями жидкости при градиенте скорости, равном единице.

Непосредственное определение вязкости по формуле (1) невозможно. Ее определяют опытным путем на основании закона Пуазейля, который устанавливает, что объем жидкости B , вытекающей из длинной капиллярной трубки, определяется так:

$$B = \frac{\pi p r^4 t}{8 \eta l}, \quad (2)$$

где p — разность давлений на концах трубки в динах на 1 см^2 , r — радиус капилляра в сантиметрах, t — время истечения в секундах, l — длина капилляра в сантиметрах и η — вязкость жидкости.

Величина вязкости η из выражения (2) равна:

$$\eta = \frac{\pi p r^4 t}{8 B l}. \quad (3)$$

Если жидкость вытекает только под влиянием собственного веса, то разность давлений равняется гидростатическому давлению dgh , где g — ускорение силы тяжести, равное 981 см/сек^2 , d — плотность жидкости и

h — высота столба жидкости в сантиметрах. Тогда

$$\eta = \frac{\pi d g h r^4 t}{8 B l} \quad (4)$$

Выражение (4) дает величину вязкости η в системе CGS.

Для воды вязкость вообще очень не велика. Она сильно уменьшается с возрастанием температуры T (см. табл. IV).

Иногда вязкость выражают не в динах на 1 см^2 , а в граммах (вес) на 1 см^2 . Тогда величина η будет выражена числами, в 981 раз меньшими.

Прибором для измерения вязкости является вискозиметр, изображенный на рис. 15.

Капиллярная часть вискозиметра en имеет в своей верхней части шарик, объем которого между отметками n и m постоянен. Через конец трубки a вводят в вискозиметр исследуемую жидкость в количестве $3-4 \text{ см}^3$.

Через каучуковую трубку f высасывают воздух так, чтобы мениск жидкости поднялся в левом колене прибора выше метки m . В правом колене он будет ниже конца капилляра e . Если после этого установить сообще-

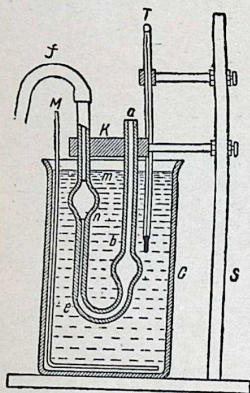


Рис. 15. Вискозиметр.

ние трубки f с атмосферным воздухом, то жидкость под влиянием собственного веса начнет переливаться по капилляру ne . Определяют время, в течение которого через капилляр протечет объем жидкости mn . Этот отсчет времени обычно производят при помощи секундомера, который пускают в ход и останавливают в моменты прохождения мениска жидкости через метки m и n .

Для решения задачи по формуле (4) надо знать, кроме времени, еще величины d , h , r , B и l . Однако можно определить вязкость η без определения h , r , B и l . Для этого опыт сначала проделывают с дистиллированной водой, вязкость которой η_0 известна. Пусть объем дистиллированной воды протекал через капилляр в t_0 секунд. Плотность воды обозначим d_0 . Исследуемая жидкость, вязкость которой η , при той же температуре вытекает в течение t секунд. Плотность жидкости обозначим d . Написав для исследуемой жидкости и для воды выражения вязкости по формуле (4), имеем:

$$\eta = \frac{\pi d g h r^4 t}{8 B l} \quad \text{и} \quad \eta_0 = \frac{\pi d_0 g h r^4 t_0}{8 B l}.$$

Разделив почленно эти выражения, получим:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{d t}{d_0 t_0},$$

откуда

$$\eta = \eta_0 \frac{d t}{d_0 t_0}. \quad (5)$$

Следовательно, применяя метод относительного определения вязкости, мы должны найти плотность жидкости d , продолжительность ее истечения t и продолжительность истечения воды t_0 . Величины же η_0 и d_0 берут из таблиц на стр. 177.

Так как вязкость сильно изменяется с температурой, то для постоянства температуры весь вискозиметр опускается в стеклянный сосуд G , наполненный водой, температура которой отмечается.

При измерении следует обратить внимание на то, чтобы капилляр занимал вертикальное положение. Соответствующая установка капилляра производится на-глаз.

Следует также обратить внимание на чистоту вискозиметра, который перед производством измерений промывается дистиллированной водой. Для этого наполняют водой шарик b , несколько раз засасывают воду в шарик m и дают воде стечь через капилляр обратно. Воду эту выливают.

В формулу (5) входит плотность жидкости d . Для воды плотность находится в таблице IV на стр. 177. Плотность же

исследуемой жидкости следует определить (см. работу № 3).

Порядок выполнения работ следующий.

1. Промывают вискозиметр, наливают в него 3—4 см³ дистиллированной воды, помещают в ванну и дают воде принять температуру ванны, которую отмечают по термометру T . Затем засасывают воду в левое колено и определяют время t_0' , в продолжение которого вытекает объем воды m . 2. Повторяют тот же опыт, определяя t_0'' . 3. Промывают вискозиметр исследуемой жидкостью, затем вновь наливают этой жидкости столько же, сколько брали дистиллированной воды, и определяют t' и t'' . 4. Находят плотность жидкости d .

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 5. Определение вязкости жидкости вискозиметром

Дистиллированная вода	Жидкость	Определение плотности
1-й опыт — $t_0' =$ 2-й опыт — $t_0'' =$	1-й опыт — $t' =$ 2-й опыт — $t'' =$	Вес пикнометра $P =$
Среднее $t_0 =$ Температура $T_0 =$	Среднее $t =$ Температура $T_0 =$	Вес пикнометра с водой $P_0 =$
Плотность воды $d_0 =$	Плотность жидкости $d =$	Вес пикнометра с жидкостью $P_1 =$
Вязкость воды $\eta_0 =$	Вязкость жидкости $\eta = \eta_0 \frac{dt}{d_0 t_0}$	$d = \frac{P_1 - P}{P_0 - P} =$

Работа № 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ ПО СТОКСУ

Приборы: 1) цилиндр с исследуемой жидкостью; 2) секундомер; 3) часовое стекло; 4) микроскоп малого увеличения с окулярным микрометром; 5) металлические шарики или ртуть; 6) игла в рукоятке.

Физическое значение коэффициента внутреннего трения жидкостей или коэффициента вязкости изложено в описании работы № 5.

Здесь изложим основания для другого метода определения этой величины, предложенного Стоксом. Последний показал, что небольшое тело шаровидной формы, перемещаясь в жидкости, испытывает действие силы трения F_T :

$$F_T = 6\pi r\eta v, \quad (1)$$

где r — радиус шарика, v — скорость движения шарика в жидкости и η — коэффициент вязкости жидкости.

Если этот шарик перемещается в жидкости под действием силы тяжести (падает в ней), то на него действуют одновременно две силы: одна сила трения F_T , а другая — сила тяжести F_1 . Эта сила равна:

$$F_1 = 4/3\pi r^3 dg, \quad (2)$$

где $4/3\pi r^3$ — объем шарика, d — его плотность, g — ускорение силы тяжести.

В уравнение (2) необходимо внести поправку на силу Архимеда, которая направлена против силы F_1 и равна:

$$F_2 = 4/3\pi r^3 d_0 g,$$

где d_0 — плотность жидкости. Поэтому действующая на шарик сила будет:

$$F_1 - F_2 = F = 4/3\pi r^3 (d - d_0) g. \quad (3)$$

Сила F_T зависит от скорости падения. Эта сила переменна. По достижении некоторой скорости v она сравняется по величине с силой F и уравновесит ее. С этого времени падение будет равномерным и v , а стало быть, F_T — постоянным, поэтому $F_T = F$, т. е.

$$6\pi r\eta v = 4/3\pi r^3 (d - d_0) g,$$

откуда

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{(d - d_0) gr^2}{v}. \quad (4)$$

Для определения коэффициента вязкости η по этому методу берут высокий цилиндр с исследуемой жидкостью

(рис. 16). На цилиндре имеется сверху кольцевая метка, соответствующая тому положению, когда сила F_T достигает значения силы F и скорость падения установится постоянной. Кроме того, на расстоянии L от верхней метки имеется такая же метка внизу для удобства отсчета конца падения шарика. Бросая шарик в цилиндр, отмечают по секундомеру время прохождения им пути L , откуда определяют скорость падения v .

Диаметр шарика определяется при помощи микроскопа. Цена деления окулярного микрометра может быть дана при микроскопе или же ее необходимо определить самому. Метод измерения описан в работе № 28.

Если нет заранее заготовленных шариков, то надо самому сделать ртутный шарик. Для этого на часовом стеклышке отделяется от более крупной ртутной капли мельчайший шарик — не более 0,2—0,3 мм в диаметре и измеряется под микроскопом.

П о р я д о к р а б о т ы.

1. Ознакомиться с увеличением микроскопа и измерить диаметр одного из шариков.
2. Держа в одной руке секундомер, готовый к пуску, другой рукой сбросить шарик в цилиндр около его оси.
3. В момент прохождения шариком верхней метки включить секундомер.

Рис. 16. Цилиндр для вязкости по Стоксу.

4. Выключить секундомер при прохождении шариком нижней метки.
5. Произвести вычисления.

П р и м е ч а н и е. При определении момента прохождения шарика через метку надо установить глаз так, чтобы кольцевая метка проектировалась в прямую линию.

Опыт производится не менее 10 раз и из полученных результатов берут среднее.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 6. Определение вязкости жидкости по Стоксу

Цена деления окулярного
микрометра $n =$

Постоянные: $L =$
 $d =$
 $d_0 =$

№ опыта	Отметки по шкале окулярного микрометра		Диаметр шарика	Время прохождения	Скорость	η	$\Delta\eta$	$\Delta^2\eta$	
	левый край	правый край							
									$E = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n(n-1)}} =$ $\eta = \dots \pm$

Работа № 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ПО ВЫСОТЕ ПОДНЯТИЯ ЖИДКОСТИ В КАПИЛЛЯРЕ

Приборы: 1) капилляр, 2) стеклянная шкала, 3) часовое стекло, 4) ртуть, 5) миллиметровый масштаб, 6) исследуемая жидкость, 7) стеклянный сосуд.

На поверхности жидкости проявляется действие молекулярных сил, стремящихся сократить величину поверхностного слоя. Силы, натягивающие поверхностный слой, лежат в плоскости этого слоя или касательны к нему в случае кривых поверхностей. Рассмотрим на поверхности слоя линию в 1 см. Молекулы, находящиеся с одной стороны от этой линии, будут притягиваться силами поверхностного натяжения к молекулам, находящимся с другой стороны выделенной линии. Сумма этих сил, т. е. их равнодействующая, приложенная перпендикулярно к линии в 1 см, и есть коэффициент поверхностного натяжения — α .

В системе CGS он выражается в динах на 1 см, иногда его выражают в мг на 1 мм длины контура.

В узких стеклянных трубках, капиллярах, опущенных в жидкость, смачивающую стекло, хорошо заметно поднятие жидкости. Поверхностная пленка жидкости в трубке под действием молекулярных сил жидкости и стекла

принимает вогнутую сферическую форму — мениск, поднимается в трубке и поднимает за собой столбик жидкости. Поднятие жидкости прекращается, после того как силы поверхностного натяжения, удерживающие пленку, уравновесятся силой тяжести поднявшегося столбика жидкости.

Напишем выражение силы поверхностного натяжения, удерживающей мениск. Длина окружности капилляра равна $2\pi r$ см. На каждый сантиметр длины действует сила поверхностного натяжения a . Вся сила, удерживающая мениск, $F = 2\pi ra$.

Сила тяжести столба жидкости выражается так:

$$F = \pi r^2 h d g,$$

где πr^2 — площадь сечения капилляра, h — высота поднятия мениска, d — плотность жидкости и g — ускорение силы тяжести. По равенству сил напишем

$$2\pi r a = \pi r^2 h d g,$$

откуда коэффициент поверхностного натяжения равен

$$a = \frac{rdgh}{2}. \quad (1)$$

Формула (1) справедлива только при условии полного смачивания стекла жидкостью. Для этого надо особо строго следить за чистотой капилляра. Перед опытом капилляр промывается хромовой смесью, дистиллированной водой, спиртом и затем просушивается.

Определение радиуса капилляра производится следующим образом. В капилляр засасывают столбик ртути длиной 3—4 см и в горизонтальном положении измеряют длину его l миллиметровым масштабом. Измерения производятся в нескольких местах; затем ртуть выливают на предварительно взвешенное часовое стеклышко и определяют ее вес p . Он равен $13,6 \pi r^2 l$, откуда

$$r = \sqrt{\frac{p}{13,6 \pi l}}.$$

Определив радиус трубки, приступают к определению высоты поднятия жидкости h . Сухой промытый капилляр (рис. 17) вместе со стеклянной шкалой закрепляется

в зажим штатива и опускается в сосуд с исследуемой жидкостью так, чтобы конец капилляра был сантиметров на 5 ниже уровня жидкости. Через 1—2 минуты трубку вместе со шкалой осторожно поднимают сантиметра на 3 и производят отсчеты положения вершины мениска N и уровня жидкости в сосуде N_0 . Тогда $h = N - N_0$. Измерения h производят 4—5 раз в разных местах трубки.

Плотность жидкости d определяют пикнометром (работа 3) или находят в таблице III.

Определив все величины правой части формулы (1), вычисляют α .

Порядок работы. 1. Промыть и высушить капилляр. 2. Взвесить часовое стекло. 3. Определить длину ртутного столба в капилляре. 4. Взвесить ртуть и вычислить радиус капилляра. 5. Еще раз промыть капилляр.

6. Вставить капилляр со шкалой в штатив и погрузить в жидкость. 7. Произвести отсчеты и вычисления.

Ошибка результата находится по формуле

$$D_\alpha = D_r + D_h + D_g + D_d.$$

Ошибки произойдут главным образом при определении r и h , поэтому можем опустить D_g и D_d . Ошибка радиуса $D_r = \frac{1}{2}(D_p + D_l)$ (опускаем ошибку плотности ртути и π). Тогда

$$D_\alpha = \frac{1}{2}(D_p + D_l) + D_h.$$

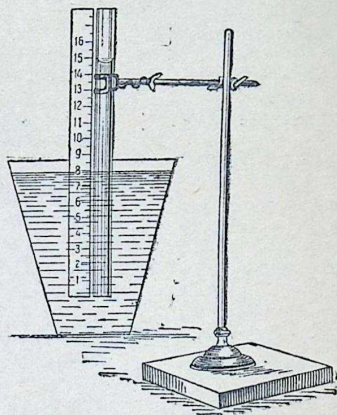


Рис. 17. Поднятие жидкости в капилляре.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 7. Определение коэффициента поверхностного натяжения по высоте поднятия жидкости в капилляре

Нулевое положение весов $l_0 =$
 Чувствительность весов $n =$
 Вес часового стекла $p_1 =$
 Вес стекла и ртути $p_2 =$
 Вес ртути $p =$
 Длина ртутного столба $l_1 =$
 $l_2 =$
 $l_3 =$
 Среднее $l =$
 Радиус капилляра $r = \sqrt{\frac{p}{13,6 \pi l}}$

Высота поднятия в капилляре

	1.	2.	3.	4.	5.
N					
N_0					

Среднее $h =$

$$\alpha = \frac{rdgh}{2} = \dots \frac{\text{дин}}{\text{см}}$$

$$E_h = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n(n-1)}} =$$

$$D_h = \frac{E_h}{h} =$$

$$D_r = \frac{1}{2} (D_p + D_l) =$$

$$D_\alpha = D_r + D_h =$$

$$E_\alpha = \alpha D_\alpha = \pm \dots$$

Работа № 8. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ КАПЕЛЬ

Приборы: 1) две бюретки в штативе, 2) два стаканчика, 3) набор каплеуловителей — стеклянных наконечников, 4) микрометр или штангенциркуль, 5) исследуемые жидкости.

Размер и вес капли не являются величинами постоянными. Они зависят от ряда обстоятельств. Рассмотрим, как образуется капля. Пусть из тонкой трубки медленно, по каплям, вытекает жидкость (рис. 18). Поверхностная пленка жидкости, образующаяся в отверстии трубки, оказывает сопротивление вытеканию жидкости. Но под давлением вышележащих слоев пленка растягивается и жидкость собирается в каплю на конце трубки. Вес постепенно накапливающейся жидкости в некоторый момент превышает силу поверхностного натяжения пленки, поддерживающей каплю, и капля отрывается. Перед отрыванием капли у конца трубки образуется перетяжка пленки ab , по которой (рис. 18) капля и обрывается.

Длина контура, по которому разрывается поверхностная пленка, равна $2\pi r$, где r — радиус перетяжки. На каждый сантиметр контура со стороны верхней части пленки действует сила, равная α , направленная кверху. Сила натяжения ко всему контуру будет $2\pi r\alpha$. Перед самым разрывом эта сила уравнивает вес капли p . Отсюда

$$2\pi r\alpha = p. \quad (1)$$

Очевидно, диаметр перетяжки $2r$ должен быть меньше внешнего диаметра трубки D . Если взять две трубки разной толщины, то на более толстой из них жидкость образует и каплю более крупную (рис. 19). Отсюда вытекает, что вес капли зависит от формы капельницы.

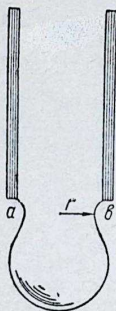


Рис. 18. Образование капли.

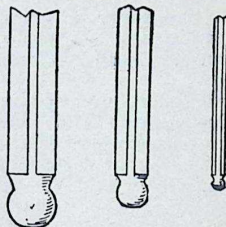


Рис. 19. Капли на разных капельницах.

Другая переменная величина, входящая в формулу капли (1), α — коэффициент поверхностного натяжения. Поэтому вес капли зависит и от поверхностного натяжения жидкости.

Данная работа имеет целью показать влияние формы капельницы и свойств жидкости на величину капли. Она должна оценить также возможную ошибку при замене весового или объемного количества жидкости каплями.

Порядок работы. 1. При помощи микрометра или штангенциркуля определяют внешний диаметр нижнего конца каждого из наконечников и записы-

вают в таблицу в порядке возрастания D . 2. Одну из бюреток наполняют на $\frac{3}{4}$ дистиллированной водой, убедившись предварительно, что кран закрыт. На нижний конец бюретки заранее надета переходная резиновая трубка. В нее вставляют исследуемый самый тонкий наконечник. Подставляя под бюретку стаканчик, приоткрывают края и пропускают 1—2 см³ воды. При этом краном регулируют скорость истечения жидкости так, чтобы через наконечник вытекало не более 50—60 капель в минуту. В тот момент, когда уровень воды в бюретке совпадает с каким-либо целым делением, приступают к счету капель. Подсчитывают число капель в 3—4 кубиках вытекшей жидкости. Отсюда определяют объем v одной капли и вес ее p в граммах.

Постепенно применяют все четыре наконечника и результаты заносят в отчет.

Затем переходят к исследованию второй жидкости масла, спирта или спиртового раствора, применяя те же наконечники. Плотность жидкости дается преподавателем.

Предположив, что при истечении из одного и того же наконечника воды и другой жидкости радиус перетяжки r их капель в момент обрыва будет одинаковым, можно определить поверхностное натяжение этой другой жидкости. Для нее вес капли $p = 2\pi r\alpha$, а для воды $p_0 = 2\pi r\alpha_0$, где α_0 — коэффициент поверхностного натяжения воды, находимый в таблицах. Разделим почленно эти уравнения и, сократив, получим:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{p}{p_0} \quad \text{или} \quad \alpha = \alpha_0 \frac{p}{p_0}. \quad (2)$$

После того как будет заполнена таблица отчета, в ней легко найти p и p_0 для наконечника 2 или 3 и определить α для испытуемой жидкости. Найденный результат сравнивают с табличными и дают заключение о точности этого метода определения.

Примечание. Определение веса капель p производится по объему и плотности жидкости. Последняя дается при работе.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 8. Исследование образования капель

№ наконечника	Диаметр	Вода					Жидкость					$\alpha = \sigma_0 \frac{p}{p_0}$	
		число капель	вытекло см ³	капель в 1 см ³	объем капли в см ³	вес 1 капли P_0 в гм.	число капель	вытекло см ³	капель в 1 см ³	объем капли в см ³	вес 1 капли P в гм.		

Работа № 9. ПРОВЕРКА ТЕРМОМЕТРОВ

Приборы: 1) калориметр, 2) штатив, 3) кипятильник, 4) два термометра: нормальный и исследуемый.

Как всякий физический измерительный прибор, термометр может обладать индивидуальными ошибками, которые необходимо определить и учитывать при измерении температур. Ошибки термометра могут происходить от разных причин. Одна из ошибок происходит вследствие так называемой „депрессии нуля“. Дело в том, что сильно нагретое стекло после охлаждения не сразу принимает постоянный объем. Оно может очень медленно сжиматься все более и более в продолжение многих месяцев и даже лет. Поэтому недавно приготовленные термометры могут уменьшить со временем объем своего шарика, вследствие чего 0° на таком термометре будет соответствовать отрицательной температуре. Депрессия нуля может достигать 1° и даже более. Очевидно, все температуры такого термометра будут на величину депрессии больше истинных температур. Вторая ошибка может происходить из-за неоднородности сечения капилляра. Капилляр термометра может не обладать постоянством сечения по всей длине: на одних участках он может быть расширен, и здесь термометр показывает меньшую температуру, в местах же более узких показания термометра повышены.

Постоянными точками термометра являются 0° — температура плавления льда и 100° — температура паров

кипящей воды при нормальном барометрическом давлении. Начнем с проверки этих точек.

Калориметр наполняют мелко раздробленным льдом или чистым снегом и погружают в лед исследуемый термометр до нулевого деления шкалы. Термометр закрепляется в штативе. Нужно обращать внимание на то, чтобы между термометром и стенками калориметра было расстояние не меньше 2—3 см. Через 4—5 минут после того, как температура термометра установится, записывают ее показания.

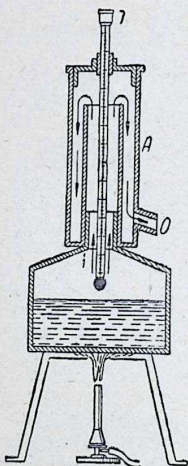


Рис. 20. Кипятильник.

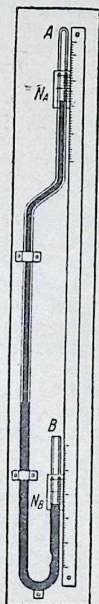


Рис. 21. Барометр ртутный.

Затем удаляют лед из калориметра, заполняют его водопроводной водой, вставляют оба термометра и, перемешивая воду мешалкой, определяют и записывают их показания. Подливая горячую воду, повышают тем-

температуру воды калориметра на $5-8^{\circ}$ и производят новый отсчет температур. Такое подогревание и проверку заканчивают, не доходя 10° до верхнего предела шкалы термометра, так как при дальнейшем нагревании стекло термометра может треснуть.

Если позволяет шкала термометра, то следует проверить положение точки 100° . Для этого термометр помещается в кипятильник, изображенный на рис. 20. Он представляет сосуд с водой, над которым идет двухстенная трубка для отвода пара. Термометр помещается в пары воды на расстоянии 2 см от поверхности воды. Отсчет температур производится после 10—15 минут пребывания термометра в парах.

Пока термометр прогревается, определяют барометрическое давление, которое необходимо знать для определения температуры кипения воды.

Барометрическое давление H определяется при помощи сифонного ртутного барометра (рис. 21) или барометра-анероида (рис. 22).

Сифонный ртутный барометр, изображенный на рис. 21, состоит из изогнутой стеклянной трубки, наполненной ртутью и расположенной рядом с латунной шкалой. В закрытом колене A над ртутью — пустота. Ртуть в открытом колене B испытывает атмосферное давление, которое уравновешивается давлением столба ртути в колене A .

Для определения высоты столба ртути измеряют разность уровней менисков в коленах A и B по латунной шкале. Отсчеты производятся с точностью до 0,1 мм, для чего применяются нониусы N_a и N_b (см. работу № 1).

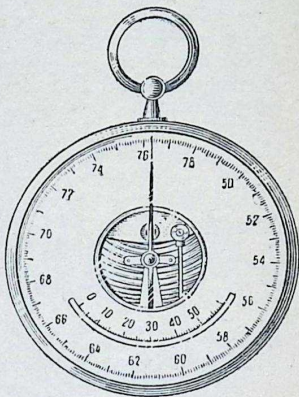


Рис. 22. Барометр-анероид.

Если положение верхнего мениска на шкале будет l_a мм, а нижнего — l_b мм, то $L = l_a - l_b$.

Определенная таким образом высота барометрического столба L зависит от температуры прибора, так как с изменением температуры изменяется, с одной стороны, плотность ртути, а с другой стороны — длина шкалы. Поэтому показания барометра приводят к температуре 0° , для чего удобнее всего воспользоваться приведенной таблицей (см. приложение стр. 182).

Воспользовавшись поправками, получим истинное значение барометрического давления H .

Температура кипения воды, соответствующая найденному давлению, находится на стр. 175. Для давлений в пределах от 715 до 770 мм можно пользоваться следующей эмпирической формулой температуры кипения воды:

$$t^\circ = 100^\circ + 0,0375 (H - 760).$$

После того как измерения сделаны, определяют поправки к термометрам.

Если t_x — температура испытуемого термометра, а t_N — температура нормального, то

$$t_N - t_x = \Delta t_x$$

будет поправкой, которую надо прибавлять к показаниям испытуемого термометра, чтобы получить истинную температуру. Эта поправка может быть положительной или отрицательной.

Дальнейшее определение поправок производится графическим методом. Для этого в прямоугольной системе координат на миллиметровой бумаге откладываются по абсциссам температуры t_x , а по ординатам — соответствующие поправки Δt , так, как это изображено на рис. 23. Соединив плавной кривой найденные точки, получают кривую поправок. Пользуясь этой кривой,

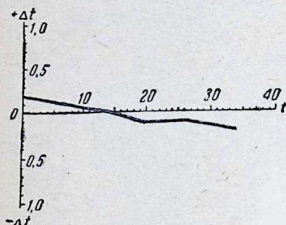


Рис. 23. Кривая поправок термометра.

можно определить поправки с точностью до $0,1^\circ$ для любой температуры в исследуемом интервале.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 9. Проверка термометров

t_N	Термометр №...		Термометр №...		График поправок термометров
	t_x	Δt	t_x	Δt	
0,0					

Работа № 10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКРЫТОЙ ТЕПЛОТЫ ПАРООБРАЗОВАНИЯ

Приборы: 1) кипятильник, 2) сухопарник, 3) калориметр с мешалкой и змеевиком, 4) термометр с делениями до $0,2^\circ$ или $0,5^\circ$, 5) штатив, 6) технические весы и разновес, 7) барометр-анероид.

Скрытой удельной теплотой парообразования называется то количество тепла, которое необходимо затратить, чтобы превратить 1 г данной жидкости в пар при той же температуре. Скрытая теплота парообразования зависит от температуры, при которой происходит превращение воды в пар. В этой работе определяется теплота парообразования при температуре кипения воды, т. е. количество тепла, которое затрачивается на превращение 1 г кипящей воды в пар. Непосредственное нахождение этой величины технически трудно из-за невозможности учесть, какая доля тепла источника пошла на парообразование и какая потеряна в окружающую среду. Поэтому ее находят из процесса конденсации, определяя то количество тепла, которое выделяется при переходе 1 г пара при температуре кипения в жидкость при той же температуре.

Для этого нагреваем жидкость (воду) до кипения в сосуде *B* (рис. 24) и после того, как пары начнут интенсивно выделяться, отводим их сначала в сухопарник *C*, а оттуда в змеевик, погруженный в воду калориметра *K*. Сухопарник, как показывает его название, осушает пар. Он освобождает его от воды, которая конденсировалась при прохождении пара по трубке, и отводит ее мимо калориметра по резиновой трубке с зажимом, который открывается по мере накопления воды в сухопарнике.

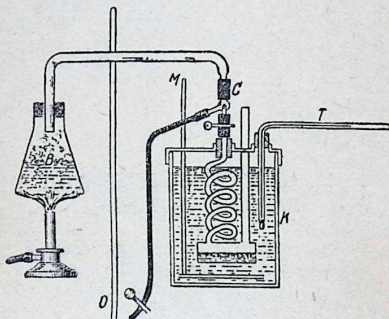


Рис. 24. Калориметр для пара.

Калориметр, изображенный на рис. 24, представляет собой латунный сосуд *K* емкостью 400—500 см³ с такой же латунной мешалкой *M*. Для уменьшения теплопотерь сосуд помещается в другой сосуд большего размера, не изображенный на рисунке. Чтобы не было непосредственного соприкосновения дна внутреннего сосуда с дном наружного, между ними устанавливаются прокладки из материала с плохой теплопроводностью, например, из пробки. При этом между стенками сосудов образуется воздушная прослойка, являющаяся плохим проводником тепла.

Особенностью этого калориметра является змеевик из латуни, который погружается в воду калориметра.

Пар, проходя через змеевик, передает змеевику и калориметру теплоту, выделяющуюся в процессе конденсации. В нижней своей части змеевик сильно расширен. Этот расширенный участок змеевика предназначен для образовавшейся в процессе конденсации воды. Такая система калориметра, в которой конденсат изолирован от воды калориметра, имеет большое преимущество при определении теплоты парообразования тех жидкостей, которые способны выделять или поглощать тепло при растворении в воде.

В работе может быть применен калориметр и без змеевика. В этом случае пар из сухопарника отводится через короткую трубку непосредственно в воду калориметра, где он и конденсируется.

Обозначим вес калориметра с мешалкой и змеевиком m_0 , вес калориметра с налитой водой m_1 . Тогда, очевидно, вес налитой воды $M = m_1 - m_0$. После того как в змеевик будет пущен пар и вода в калориметре достаточно (на $4-5^\circ$) нагреется, в змеевике образуется некоторое количество воды. Снова взвесим калориметр с водой и змеевиком и обозначим новый вес их m_2 . Тогда $m_2 - m_1$ будет вес конденсированной воды m . Обозначим начальную температуру воды в калориметре t_0 , а окончательную его температуру t . Следовательно, вода и калориметр нагрелись на $t - t_0$ градусов.

Составим уравнение теплового баланса. Обозначим удельную теплоту конденсации водяного пара λ . При конденсации m граммов пара в воду той же температуры выделится $m\lambda$ кал. Затем образовавшаяся вода будет охлаждаться от температуры кипения, которую обозначим τ , до окончательной температуры калориметра, которую обозначили t , иначе говоря, вода остынет на $\tau - t$, выделив еще $m(\tau - t)$ кал. Таким образом, количество тепла, выделившееся как в процессе конденсации пара, так и в процессе последующего охлаждения образовавшейся воды, равно $m\lambda + m(\tau - t)$ кал. За счет этого тепла нагрелись вода в калориметре и змеевик от начальной температуры t_0 до окончательной t , т. е. на $t - t_0$. Очевидно, на нагревание воды пойдет $M(t - t_0)$ кал. На нагревание калориметра с мешалкой и змеевиком, обладающих теплоемкостью c , пойдет

$m_0c(t - t_0)$ кал, а всего на нагревание воды и калориметра пойдет

$$M(t - t_0) + m_0c(t - t_0) = (M + m_0c)(t - t_0) \text{ кал.}$$

Предполагая, что тепловой обмен происходит без потери тепла в окружающую среду, можем составить уравнение

$$m\lambda + m(\tau - t) = (M + m_0c)(t - t_0),$$

откуда

$$\lambda = \frac{(M + m_0c)(t - t_0) - m(\tau - t)}{m}. \quad (1)$$

При составлении уравнения теплового баланса мы допустили, что не было теплообмена калориметра с окружающей средой. Это, конечно, не совсем так, но теплообмен можно свести к минимуму. Для этого следует подобрать воду в калориметре такой температуры, чтобы она в начале опыта была на несколько градусов холоднее комнатной, а в конце опыта на столько же градусов теплее. Тогда в первую половину опыта калориметр будет получать теплоту из окружающей среды, а во вторую — отдавать приблизительно такое же количество.

Порядок работы. 1. Убедившись, что в кипятильнике есть вода, начинаем нагревать кипятильник. Пока вода в сосуде нагреется, отсчитываем по барометру атмосферное давление и определяем температуру кипения, соответствующую этому давлению (табл. I, стр. 175). Эту температуру следует брать с точностью до $0,5^\circ$.

2. Взвешиваем с точностью до $0,1$ г внутренний сосуд калориметра с мешалкой и змеевиком и находим m_0 . При этом следует обратить особое внимание, чтобы змеевик и сосуд были внутри сухими. Если змеевик недостаточно сух, его следует просушить продуванием горячего воздуха.

3. Наливаем в калориметр воды до $\frac{3}{4}$ его объема и снова взвешиваем; получаем m_1 . Отсюда находим $M = m_1 - m_0$.

4. Измеряем с точностью до $0,1$ температуру воды калориметра t_0 , причем устанавливаем эту температуру на $2-2,5^\circ$ ниже комнатной.

5. Если к этому времени пар будет достаточно интенсивно выделяться из отверстия кипятильника, соединяем его резиновой трубкой с сухопарником С. Выжи-

даем 2—3 минуты, пока нагреется паропроводящая система, и соединяем с калориметром по схеме рис. 24.

6. После того как температура воды калориметра при постоянном перемешивании поднялась на 4—5°, отмечаем температуру воды и быстро разъединяем паропроводную трубку и змеевик. Вынимая термометр перед взвешиванием, нужно стряхнуть приставшую к нему каплю воды в калориметр.

7. Взвешиваем калориметр с водой, змеевиком и мешалкой и находим m_2 . Отсюда вес пара $m = m_2 - m_1$.

8. Подставляем все найденные величины в формулу (1) и находим λ (для латунного калориметра $c = 0,094$).

Запись производится по следующей форме протокола опыта.

Работа № 10. Определение скрытой теплоты парообразования

Вес	Температура	Вычисление λ
Калориметра с мешалкой и змеевиком $m_0 =$	Начальная воды в калориметре $t_0 =$	$\lambda = \frac{(M + m_0 c)(t - t_0) - m(\tau - t)}{m}$
Калориметра с мешалкой, змеевиком и водой $m_1 =$	Окончательная воды в калориметре $t =$	
Воды $M = m_1 - m_0 =$	Пара кипящей воды $\tau =$	$\lambda =$
Калориметра с водой и конденсированным паром $m_2 =$	при барометрическом давлении $H =$ (по таблицам)	
Конденсированного пара $m = m_2 - m_1 =$		

Работа № 11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКРЫТОЙ ТЕПЛОТЫ ПЛАВЛЕНИЯ ЛЬДА

Приборы и материалы: 1) калориметр с мешалкой, 2) термометр с делениями по 0,2 или 0,5° на штативе, 3) технические весы с разновесом, 4) лед, 5) фильтровальная бумага.

Описание калориметра см. в работе № 10.

Скрытой теплотой плавления льда называется количество тепла, которое необходимо затратить, чтобы превратить 1 г льда при 0°C в воду при этой же температуре.

Чтобы определить эту величину, бросаем кусок льда около 50 г, предварительно досуха вытертый пропускной бумагой, в воду калориметра. Лед должен иметь температуру 0° . Калориметр с мешалкой и вода, налитая в него, должны быть взвешены на технических весах с точностью до 0,1 г. Обозначаем неизвестную удельную теплоту плавления льда x , начальную температуру воды и калориметра t_0 и окончательную их температуру — t . Лед, тая, поглощает тепло из воды и калориметра в количестве mx кал. Полученная из льда вода в количестве m г нагревается в калориметре от 0° до t° и, следовательно, поглощает еще mt кал. Все это тепло понижает температуру воды и калориметра от t_0 до t , т. е. на $(t_0 - t)$. Отсюда количество тепла, потерянное водой, вес которой обозначим M , равно $M(t_0 - t)$ кал. Количество тепла, потерянное калориметром, массу которого с мешалкой обозначим m_0 г, а теплоемкость c , равно $m_0c(t_0 - t)$ кал. Следовательно, вместе они потеряют:

$$M(t_0 - t) + m_0c(t_0 - t) = (M + m_0c)(t_0 - t) \text{ кал.}$$

Если не учитывать теплообмена калориметра с окружающей средой, то можно написать:

$$mx + mt = (M + m_0c)(t_0 - t),$$

отсюда

$$x = \frac{(M + m_0c)(t_0 - t) - mt}{m}.$$

Чтобы уменьшить влияние теплообмена калориметра на результат опыта, следует применить прием, указанный в работе № 10, добившись, чтобы температура лаборатории была средней между начальной и окончательной температурой воды в калориметре. При весе льда 50 г и количестве воды около 500 г можно считать, что начальная температура воды должна быть выше тем-

пературы воздуха на $3,5^{\circ}$; тогда окончательная температура окажется на столько же ниже.

Порядок работы. 1. Взвешиваем калориметр с мешалкой и находим m_0 . 2. Взвешиваем калориметр с мешалкой и водой, находим m_1 , отсюда вес воды $M = m_1 - m_0$ (около 500 г). 3. Откальваем кусочек льда весом около 50 г. Лед должен иметь температуру 0° .

Примечание. Зимой лед может быть принесен в лабораторию при более низкой температуре. Его надо согреть до температуры плавления. Для этого кусками около 100 г его кладут в сосуд и заливают водопроводной водой. Через 20—25 минут лед прогреется до 0° .

4. Измеряем температуру воды перед опытом. Ошибка в $0,1^{\circ}$ уже оказывает влияние на результат. 5. Обтираем кусок льда досуха пропускной бумагой и бросаем его в калориметр. 6. Помешивая воду, наблюдаем за ее температурой (термометр из воды не вынимать) и отмечаем самую низкую температуру, которая наступает после того, как лед растает. 7. Взвешиваем калориметр с водой снова и, обозначая новый вес его m_2 , находим вес растаявшего льда $m = m_2 - m_1$. 8. Производим необходимые записи и вычисления.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 11. Определение скрытой теплоты плавления льда

Вес	Температура	Вычисление x
Калориметра с мешалкой $m_0 =$	Начальная калориметра $t_0 =$	$x = \frac{(M + m_0 c)(t_0 - t) - mt}{m}$ ($c = 0,094$ для латуни)
Калориметра с мешалкой и водой $m_1 =$	Окончательная $t =$	
Воды в калориметре $M = m_1 - m_0 =$		после подстановки
Калориметра с мешалкой, водой и растаявшим льдом $m_2 =$ Растаявшего льда $m = m_2 - m_1$		$x =$

Работа № 12. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО КОЭФИЦИЕНТА УПРУГОСТИ ВОЗДУХА

Приборы: 1) стеклянный баллон, соединенный со ртутным манометром, 2) сосуд для воды с мешалкой, 3) термометр, 4) барометр ртутный.

Если газ при неизменном объеме нагревается от температуры t до температуры t_1 , то давление его увеличится от p до p_1 . Зависимость между давлением и температурой устанавливается уравнением:

$$\frac{p}{1 + at} = \frac{p_1}{1 + at_1}, \quad (1)$$

где a — термический коэффициент давления газа.

Взяв произведение средних и крайних членов, имеем:

$$p + pat_1 = p_1 + p_1at,$$

откуда, решая относительно a , получим

$$a = \frac{p_1 - p}{pt_1 - p_1t}. \quad (2)$$

Если известны p , p_1 , t и t_1 , то из уравнения (2) можно определить a .

Рис. 25. Прибор для определения термической упругости воздуха.

Для определения термического коэффициента давления применяют прибор, изображенный на рис. 25. Прибор состоит из стеклянного баллона A , соединенного с одним коленом ртутного манометра. Манометр может заполняться ртутью через короткую трубку, помещенную в его нижней части. Этот патрубок соединен резиновой трубкой с сосудом D , наполненным ртутью. Сосуд D перемещается вверх и вниз, при этом ртуть в обоих коленях манометра будет также подниматься или опускаться.

Левое колено манометра, соединенное с сосудом A , имеет в своей верхней части отметку b . Правое открытое колено имеет шкалу, нанесенную на зеркале. Начало,

т. е. нуль этой шкалы, совпадает с отметкой *b*. Зеркальная шкала применяется для того, чтобы при отсчетах положения мениска ртути избежать параллактической ошибки (см. стр. 14).

Перед началом опыта передвижной сосуд *D* со ртутью опускается в свое нижнее положение. При этом ртуть выходит из манометра, и баллон *A* соединяется через пустой манометр с атмосферным воздухом. Очевидно, давление газа в баллоне в этом случае равно атмосферному давлению *H*.

Опыт начинается с того, что баллон *A* помещают в сосуд *B*, предварительно заполненный до половины смесью мелко нарубленного льда и воды. Баллон *A* должен быть полностью погружен в эту смесь. При этом заключенный в нем газ охлаждается до температуры 0° .

Для охлаждения газа требуется около 5 минут. Пока охлаждается газ; определяют барометрическое давление *H*, как описано в работе № 9. После того как газ охладится, поднимают подвижный сосуд *D* так, чтобы мениск ртути в левом колене совпал с меткой *b*, и закрепляют сосуд *D*. При этом мениск ртути в правом колене будет несколько выше, чем в левом. Последнее происходит потому, что, поднимая ртуть в манометре, мы одновременно сжимаем воздух в баллоне *A* за счет того воздуха, который помещался в левом колене манометра между нижней его точкой *c* и меткой *b*. Воздух в баллоне *A* будет обладать уже не атмосферным давлением *H*, а несколько большим. Это дополнительное вызванное сжатием давление уравнивается столбиком ртути в правом колене, стоящем выше метки *b*. Отсчитываем это избыточное давление *h* по шкале.

Теперь газ в баллоне находится под давлением $p = H + h$.

После этого опускаем столик и сосуд *B*, выливаем охлаждающую смесь и наливаем в сосуд *B* воду комнатной температуры. Для контроля над температурой служит термометр *T*. Погружаем баллон *A* в эту воду и, перемешивая ее, выжидаем, пока прогреется баллон и воздух. При этом нагревании газ расширяется, ртуть понижается в левом колене и поднимается в правом. Для приведения газа к постоянному объему сосуд *D*

поднимаем еще выше и вновь устанавливаем ртуть в левом колене на метке b . При этом отсчитываем новое избыточное давление h_1 и температуру воды t_1° . Теперь давление газа в баллоне $p_1 = H + h_1$. Применяя формулу (2), определяем величину α , утя, что $t = 0$:

$$\alpha = \frac{H + h_1 - H - h_0}{(H + h_0) t_1} = \frac{h_1 - h_0}{(H + h_0) t_1}. \quad (3)$$

Второе определение α производится в интервале температур от 20° до 60° . Доводят воду в сосуде B до температуры около 20° . Опустив сосуд D , сообщают баллон A через манометр с атмосферным воздухом, при этом часть воздуха выйдет из баллона, затем приводят уровень ртути к отметке b и отмечают избыточное давление h и соответствующую температуру t . Приливая горячую воду, поднимают температуру до 50° и производят новые отсчеты h_1 и t_1 .

В этом случае применяется формула

$$\alpha = \frac{h_1 - h}{(H + h) t_1 - (H + h_1) t}.$$

Тотчас после определения h_1 сосуд D опускается до своего нижнего положения. Это делается для предупреждения засасывания ртути в баллон при его охлаждении и понижении давления. Вообще во время работы надо следить, чтобы не происходило ни засасывания ртути в баллон, ни прорыва газа в атмосферу при нагревании баллона.

Не следует очень точно устанавливать указанные выше температуры. Отступления в $3-5^\circ$ допустимы, но отсчет температур должен производиться точно.

Результаты всех опытов заносятся в таблицу.

Примечание. Если воздух содержит влагу, то при охлаждении баллона до 0° часть влаги может конденсироваться, а при нагревании до комнатной температуры снова обратиться в пар и при этом повысить давление, благодаря чему α будет преувеличена. Поэтому опыт повторяется при температуре, лежащей выше точки росы.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 12. Определение термического коэффициента упругости воздуха

Барометрическое давление		Температура баллона		Избыточное давление	
		t	t_1	h	h_1
Температура барометра $t = \dots$	Опыт 1	0,0			
Верхний мениск $l_a = \dots$					
Нижний мениск $l_b = \dots$					
Высота столба $L_t = \dots$		$\alpha = \frac{h_1 - h}{(H + h) t_1}$			
Поправка на температуру $\Delta L = \dots$	Опыт 2				
Приведенное давление $H = L_t - \Delta L = \dots$					
		$\alpha = \frac{h_1 - h}{(H + h) t_1 - (H + h_1) t} =$			
		Среднее $\alpha =$			

Работа № 13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА ГИГРОМЕТРОМ АЛЛЮАРА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПСИХРОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМУЛЫ

Приборы: 1) гигрометр Аллюара, 2) психрометр Августа, 3) стеклянный экран, 4) эфир, 5) резиновая груша-насос.

Количество паров воды в воздухе может быть выражено весом пара q , заключенного в определенном объеме, например, в граммах в кубическом метре или в миллиграммах в литре.

С другой стороны, по закону Дальтона упругость смеси газов складывается из упругостей отдельных газов, составляющих смесь. Поэтому в атмосферном барометрическом давлении какая-то доля приходится на давление водяных паров, находящихся в воздухе. Этим

давлением или упругостью паров, находящихся в воздухе, можно характеризовать его влажность. Так как упругость, или давление, газа выражается в миллиметрах давления ртутного столба, то так же может быть выражена и влажность. Обозначим влажность, выраженную в миллиметрах ртутного столба, через e .

Между величинами q и e существует следующая зависимость: кубический метр сухого воздуха при 0° и давлении 760 мм весит 1293 г. Воздух в том же объеме, но при температуре t° весит меньше. Его вес равен $\frac{1293}{1+at}$, где $a = 0,00366$ — коэффициент расширения воздуха.

Если давление не 760 мм, а e мм, то вес 1 м³ такого воздуха равен $\frac{1293}{1+at} \cdot \frac{e}{760}$ г (закон Бойля-Мариотта).

Плотность паров воды по сравнению с плотностью воздуха составляет лишь 0,622, поэтому вес 1 м³ водяного пара при давлении e мм и температуре t , очевидно, будет составлять 0,622 веса такого же объема воздуха, т. е.

$$q = 0,622 \frac{1293}{1+at} \cdot \frac{e}{760},$$

или, производя действие над числовыми множителями, получим

$$q = \frac{1,06}{1+at} \cdot e, \tag{1}$$

т. е. выраженный в граммах вес паров, содержащихся в 1 м³ воздуха, равен упругости этих паров, выраженной в миллиметрах, умноженной на коэффициент $\frac{1,06}{1+at}$.

Этот коэффициент при значении температуры $t = 16,5^\circ$ обращается в единицу, т. е. при температуре $16,5^\circ$ численные выражения q и e равны.

Величину e , т. е. упругость паров, выраженную в миллиметрах ртутного столба, называют абсолютной влажностью.

Одной абсолютной влажности недостаточно для характеристики влажности воздуха. Степень насыщенности его водяными парами характеризуется относительной влажностью, которая выражается отношением упругости паров, содержащихся в воздухе, к упругости паров, насыщающих пространство при той же

температуре. Она вычисляется в процентах по формуле

$$f = \frac{e}{E} \cdot 100, \quad (2)$$

где E — давление паров, насыщающих пространство.

При охлаждении воздуха, содержащего влагу, он все более и более приближается к состоянию насыщения. При некоторой температуре T он достигает насыщения, признаком чего является начинающаяся конденсация паров. Температура T называется точкой росы, она тоже характеризует влажность воздуха. Упругость паров E_T , насыщающих воздух при температуре точки росы, и будет равна e — абсолютной влажности воздуха. Она находится по таблицам на стр. 176. Для нахождения относительной влажности надо знать температуру воздуха t до его охлаждения и по этой температуре в той же таблице найти E , откуда по формуле (2) можно определить f .

Гигрометр Аллюара (рис. 26) применяется для определения влажности по точке росы. Прибор состоит из укрепленного на подставке металлического сосуда, передняя сторона которого зеркально отполирована. Сосуд наполняется на две трети эфиром. Продувая через сосуд воздух, испаряют эфир и тем вызывают охлаждение эфира и металлического сосуда. Для продувания воздуха сосуд имеет два отверстия: одно, оканчивающееся трубкой, доходящей до дна сосуда, через которое воздух вдувается при помощи резинового насоса, другое — через которое удаляются пары эфира. Кроме того, в сосуд вставлен термометр, шарик которого погружен в эфир.

Когда сосуд охладится до температуры T_1 , на полированной стенке начинается конденсация паров, что заметно по легкому потускнению стенки. В это время прекращают охлаждение и ожидают исчезновения росы, которое наступает при температуре T_2 . Благодаря тепловой инерции прибора и термометра, температуры T_1 и T_2 близки, но не одинаковы. Точка росы будет средней из них, т. е. $T = \frac{T_1 + T_2}{2}$.

Определив T , по табл. II находят и вычисляют абсолютную и относительную влажность.

Чтобы дыхание наблюдателя не попадало на гигрометр, между ними устанавливается стеклянный экран.

Гигрометр Аллюара неудобен для применения. Наиболее распространенным прибором для определения влажности является психрометр Августа (рис. 27). Он

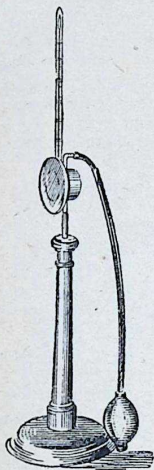


Рис. 26. Гигрометр Аллюара.

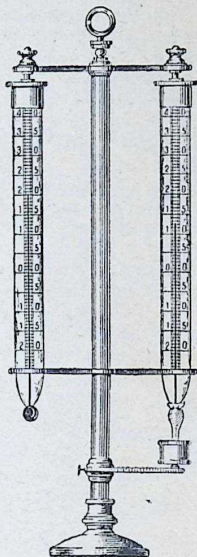


Рис. 27. Психрометр Августа.

состоит из двух одинаковых термометров. Шарик одного из термометров обтянут батистом, свободный конец которого опускается в стаканчик с дистиллированной водой. В силу капиллярности вода поднимается по батисту, увлажняет шарик термометра и, испаряясь, охлаждает его. На испарение затрачивается скрытая теплота испарения. В конце концов установится тепло-

вое равновесие между шариком и воздухом, когда количество теплоты, идущей на испарение воды, будет равно количеству теплоты, приходящей из воздуха к шарiku термометра. При этом температура влажного термометра t_1 будет, очевидно, меньше температуры t , определяемой сухим термометром.

Количество испаряющейся с влажного шарика воды зависит от гигроскопического состояния воздуха, температуры, барометрического давления и от скорости движения воздуха. Она может быть выражена так:

$$m = \frac{S(E_1 - e) \cdot f(v)}{H},$$

где S — поверхность шарика термометра, E_1 — упругость паров, насыщающих воздух, при температуре влажного термометра, e — абсолютная влажность, H — барометрическое давление и $f(v)$ — некоторая функция скорости движения воздуха. Для испарения этого количества воды требуется Q калорий тепла. Если скрытая теплота испарения δ , то $Q = m\delta$, или

$$Q = \frac{\delta S(E_1 - e) f(v)}{H}.$$

Как сказано выше, теплота испарения пополняется теплотой воздуха. В состоянии теплового равновесия приход тепла к шарiku влажного термометра выразится так: $Q' = S(t - t_1) \varphi(v)$, где $\varphi(v)$ — коэффициент пропорциональности и $(t - t_1)$ — разность температур сухого и влажного термометров. По равенству величин Q и Q' можно написать:

$$\varphi(v) \cdot (t - t_1) = \frac{\delta \cdot (E_1 - e) f(v)}{H},$$

откуда

$$e - E_1 = - \frac{\varphi(v)}{\delta \cdot f(v)} \cdot (t - t_1) H.$$

В последнем выражении величина δ — постоянная, величины же $\varphi(v)$ и $f(v)$ — переменные, зависящие от скорости движения воздуха около шариков термометра.

Заменим выражение $\frac{\varphi(v)}{\delta \cdot f(v)}$ через a и будем знать, что

α — какая-то функция скорости движения воздуха. Тогда получим следующую психрометрическую формулу Реньо для определения абсолютной влажности e :

$$e = E_1 - \alpha (t - t_1) H. \quad (3)$$

Пользуясь этой формулой, определяем абсолютную влажность по разности температур t сухого и t_1 смоченного термометров, барометрическому давлению H и упругости паров E_1 , насыщающих пространство при температуре t_1 . Влияние скорости ветра выражено величиной α .

Для величины α дан ряд эмпирических значений:
 $\alpha = 0,00128$, когда влажность определяется в неподвижном комнатном воздухе;
 $\alpha = 0,00100$ при измерении в большом помещении, где наблюдается небольшое движение воздуха;
 $\alpha = 0,00090$ при измерении в наружной атмосфере при безветрии;
 $\alpha = 0,00079$ при измерении в наружной атмосфере при небольшом движении воздуха.

Пользуясь абсолютной влажностью, полученной гигрометром Аллюара, можно определить значение α для психрометра Августа в условиях лаборатории. Для этого решаем формулу (3) относительно α :

$$\alpha = \frac{E_1 - e}{(t - t_1) H}.$$

По термометрам психрометра определяют t и t_1 , в таблицах на стр. 176 находят E_1 .

После того как определена постоянная α , психрометр Августа переносят в другую комнату по указанию руководителя и определяют там влажность, применяя формулу (3).

Порядок работы. 1. Осматривают психрометр Августа и, если батист сухой, подливают в стаканчик дистиллированной воды и смачивают батист на шарике. 2. Наполняют эфиром сосуд гигрометра. 3. Устанавливают оба прибора за стеклянный экран. 4. Испаряя эфир, определяют температуру появления росы (T_1) и исчезновения (T_2). 5. Записывают показания сухого и смоченного термометров психрометра. 6. Определяют барометрическое давление H по anerоиду с точностью до 5 мм (опыты 4 и 5 производят по 5 раз; барометрическое давление находят 1 раз). 7. Переносят психрометр

в другую комнату и через 10 минут записывают его показания.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 13. Определение влажности воздуха гигрометром Аллюара и исследование психрометрической формулы

№ опыта	Температура		Точка росы $T = \frac{T_1 + T_2}{2}$	Абсолютная влажность e	Психрометр		Упругость насыщающих паров E	Относительная влажность f	Барометрическое давление H	Упругость паров E_1	$a = \frac{E_1 - e}{(t - t_1) H}$	Δa	$\Delta^2 a$
	появление росы T_1	исчезновение росы T_2			сухой термометр	влажный термометр							
1													
2													
3													
4													
5													

Среднее значение: 1) абсолютной влажности $e =$
 2) относительной влажности $f =$
 3) $a =$ $E_a =$ $D_a =$

Определение влажности воздуха психрометром Августа.

Абсолютная влажность

$$t = \quad e = E_1 - a(t - t_1) H \text{ мм} =$$

$$t_1 = \quad q = \frac{1,06 e}{1 + \frac{t}{273}} = \dots \text{ г в } 1 \text{ м}^3$$

$$H =$$

Относительная влажность

$$a =$$

$$E_1 = \quad f = \frac{e \cdot 100}{E}$$

Работа № 14. ИЗУЧЕНИЕ КАТАТЕРМОМЕТРА

Приборы: 1) кататермометр, 2) термометр психрометрический, 3) водяная баня с термометром, 4) вентилятор, 5) секундомер, 6) штатив.

Кататермометр, изображенный на рис. 28, представляет собой спиртовой термометр с увеличенным резервуаром и укороченной шкалой. Шкала его заключена в пределах от 35° до 38° . Капилляр имеет расширение в верхней части.

Если этот кататермометр предварительно нагреть, а затем дать ему охлаждаться, то при охлаждении от 38° до 35° он потеряет вполне определенное количество тепла Q . Это количество тепла — величина постоянная, так как она зависит только от теплоемкости стекла и наполняющего резервуар кататермометра спирта. Резервуар кататермометра имеет вполне определенную поверхность. Поэтому можно определить количество тепла, теряемого кататермометром с 1 см^2 поверхности резервуара при охлаждении от 38° до 35° . Эта величина, выраженная в милликалориях, носит название фактора кататермометра и обозначается F . Она определяется при изготовлении кататермометра и как величина, характеризующая данный экземпляр кататермометра, гравировается на стекле с задней стороны.

Охлаждение кататермометра в воздухе происходит главным образом благодаря конвекции и, в зависимости от температуры окружающего воздуха и скорости его движения, может происходить быстрее или медленнее. Если охлаждение от 38° до 35° продолжается T секунд, то можно сказать, что в 1 секунду кататермометр теряет со своей поверхности

Рис. 28.
Кататермометр.

$$H = \frac{E}{T} \text{ милликалорий.}$$

Исторически кататермометр был построен как аналог человеческого тела, средняя температура которого равна $36,5^{\circ}$. Предполагалось, что по охлаждению кататермометра можно определить и потерю тепла человеком. Теперь мы знаем, что человек, благодаря наличию терморегуляторного аппарата, может регулиро-

вать потерю тепла, и кататермометр слишком мало говорит о действительной потере тепла человеком.

В зависимости от величины охлаждения, терморегуляционный аппарат человека нагружается более или менее. Поэтому величина охлаждения указывает на те требования, которые предъявляют к терморегуляции человека. В этом заключается гигиеническое значение величины охлаждения. Леонард Хилл показал, что существуют оптимальные величины охлаждения для различных условий труда, а именно:

Профессия	Потеря тепла с 1 см ² кожи в милликалориях в 1 сек.	Оптимальная величина охлаждения сухого кататермометра <i>H</i>
Портной	1,36	5,44
Переpletчик	1,72	6,88
Сапожник	1,81	7,24
Плотник	2,1	8,4—10,0
Металлист	2,51	9,24
Маляр	2,74	9,76
Каменщик	3,86	15,44
Пильщик	4,62	18,48

Величина *H* носит название величины охлаждения. Она характеризует физические условия охлаждения в воздухе тела, имеющего среднюю температуру 36,5° (эта температура есть средняя между температурами 38° и 35°.)

Упражнение 1. Определение величины охлаждения *H*.

Подогревают воду в водяной бане до температуры 60—80° и погружают в нее в вертикальном положении кататермометр. Расширяющийся спирт поднимается и вытекает в верхнее расширение капилляра. Нагревание считается законченным, если верхнее расширение капилляра заполнено на $\frac{1}{3}$ — $\frac{1}{2}$ своего объема спиртом.

После этого кататермометр вытирают досуха и подвешивают неподвижно на штативе. Происходит процесс охлаждения. Для нахождения величины *H* надо определить время, в продолжение которого столбик спирта спускается от отметки 38° до отметки 35°. Определение времени производится при помощи секундомера или часов с секундной стрелкой. Пускают секундомер в мо-

мент прохождения мениска спирта через отметку 38° и останавливают его при прохождении отметки 35° .

Тогда величина H определяется из выражения:

$$H = \frac{F}{T}.$$

Опыт повторяется в одинаковых условиях 3 раза и за истинное значение H берется среднее из трех полученных результатов.

Определение H должно производиться в одинаковых условиях. Поэтому не следует создавать около кататермометра случайных движений воздуха, так как последние имеют большое влияние на H .

Упражнение 2. Определение скорости движения воздуха.

Еще большее гигиеническое значение имеет кататермометр при определении скорости движения воздуха. Он является очень точным прибором, позволяющим определить скорость движения воздуха в довольно широких пределах — от 6 см до 20 м в секунду.

Величина охлаждения кататермометра зависит от температуры воздуха и его движения. Найдена эмпирически зависимость между величиной охлаждения H , температурой воздуха t и скоростью его движения v м/сек

$$H = (0,105 + 0,508 \sqrt{v}) \theta,$$

где $\theta = 36,5^\circ - t$, т. е. разность между средней температурой кататермометра и температурой воздуха.

Из этой формулы можно определить скорость движения воздуха, если известны H и t , а именно:

$$v = \left(\frac{\frac{H}{\theta} - 0,105}{0,508} \right)^2 \quad (1)$$

Для определения величины v необходимо, следовательно, знать величины H и θ . Определение H производится так же, как и в упражнении (1) по времени охлаждения и фактору.

Для определения θ измеряют температуру воздуха в той же точке, где определяется H .

Движение воздуха создается при помощи электрического вентилятора. Он включается в городскую сеть, и вращение крыльев вентилятора создает поток воздуха. Этот поток очень неравномерен. Скорость его в различных точках различна. Пользуясь кататермометром, можно исследовать скорость движения воздуха в разных точках потока. Мы ограничимся определением скоростей в плоскости, параллельной плоскости пропеллера и отстоящей от него на расстоянии 1 м. Для этой цели определяем величину H , а по ней и скорость движения v в нескольких точках этой плоскости. Линию, совпадающую с осью пропеллера, назовем осью потока. Первое определение H и v производится на осевой линии потока на расстоянии 1 м от вентилятора. Для этого кататермометр в штативе устанавливается так, чтобы его головка находилась в этом месте потока, и отмечают время охлаждения T . Затем кататермометр снова нагревают и производят новое определение скорости v в новой точке потока. Эту точку берут на расстоянии 10 см от первой точки в той же плоскости, перпендикулярной к оси потока и отстоящей на 1 м от плоскости пропеллера. При этом высота кататермометра в штативе не меняется, а кататермометр вместе со штативом смещается вправо или влево от оси потока. Третья точка удаляется еще на 10 см в сторону от оси и т. д. Последнее определение v производят на расстоянии 50 см от оси. Определение температуры воздуха t можно производить одновременно с определением H или в те промежутки времени, пока нагревается кататермометр.

Кататермометр должен быть прочно закреплен в штативе, а не качаться свободно.

Результаты измерений заносятся в табл. 2 отчета и изображаются графически. Для этого в прямоугольной системе координат откладываются по ординатам расстояния исследуемых точек от оси потока, а по абсциссам — найденные скорости воздуха. Полученные точки соединяются плавной кривой.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 14. Изучение кататермометра
 Определение величины охлаждения H

Таблица 1

Фактор кататермометра $F =$		
1-е измерение $T_1 =$		$H_1 =$
2-е " $T_2 =$		$H_2 =$
3-е " $T_3 =$		$H_3 =$
Среднее $H =$		

Определение скорости движения воздуха

Таблица 2

Фактор кататермометра $F =$

Положение кататермометра	T	H	t	θ	v
1-я точка на оси потока					
2-я " на расстоянии 10 см от оси					
3-я " " " 20 " " "					
4-я " " " 30 " " "					
5-я " " " 40 " " "					
6-я " " " 50 " " "					

Приложить график распределения скоростей воздуха.

Работа № 15. ГРАДУИРОВАНИЕ АМПЕРМЕТРА
 И ВОЛЬТМЕТРА

Приборы: 1) гальванометр, смонтированный на деревянной доске с шунтом и добавочным сопротивлением, 2) магазин сопротивлений, 3) аккумулятор, 4) ключ, 5) два проводника с гнездами.

Гальванометр — чувствительный магнито-электрический прибор, устройство которого изображено на рис. 29. Он основан на взаимодействии поля тока и поля постоянного магнита. Легкая рамка K с намотанным на ней проводником помещена в магнитное поле постоянного магнита NS . Рамка закреплена на подвесах, так что может вращаться вокруг вертикальной оси. Две спиральные пружинки подводят и уводят ток и в то же время удерживают рамку в положении, в котором ее плоскость совпадает с направлением магнитных силовых линий поля.

Для того чтобы магнитное поле было однородным, в пространстве между полюсами магнита внутри рамки помещен железный цилиндр, прикрепленный к основанию гальванометра. Ось цилиндра совпадает с осью рамки.

При прохождении тока через витки рамки последняя будет вращаться в магнитном поле вокруг вертикальной оси, следуя правилу левой руки. При этом плоскость рамки стремится занять положение, перпендикулярное направлению магнитного силового потока. Спиральные пружинки противодействуют этому вращению рамки. При некоторой величине деформации пружинок момент сил их сопротивления уравновесит момент пары сил, вращающих рамку. При этом рамка повернется на некоторый угол α . В магнито-электрическом приборе между силой тока I и углом вращения рамки существует прямая пропорциональность, т. е. $I = c\alpha$, откуда

$$c = \frac{I}{\alpha}. \quad (1)$$

Коэффициент c носит название „постоянной“ прибора, или цены деления. Он выражает силу тока, смещающую стрелку гальванометра на 1 деление шкалы.

Рамка соединена с легкой алюминиевой стрелкой, показывающей угол вращения рамки. Во избежание повреждения прибора при переноске он снабжен арретиром, при помощи которого рамка закрепляется неподвижно.

Гальванометр, применяемый при этой работе, очень чувствителен. Он отклоняет стрелку на одно деление уже при токе силой 10^{-6} — 10^{-7} А. Однако этот прибор можно применять для измерения токов гораздо более сильных, т. е. применять его как амперметр. Для этого гальванометр снабжается соответственно подобранным шунтом. Шунтом называют проводник с малым сопротивлением, который включается параллельно гальванометру. Расчет шунта производится на основании законов

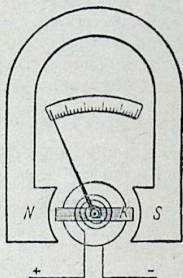


Рис. 29. Магнито-электрический прибор.

разветвления токов. В параллельно включенных проводниках сила тока обратно пропорциональна сопротивлению; следовательно,

$$\frac{R_{ш}}{R_r} = \frac{I_r}{I_{ш}},$$

откуда

$$R_{ш} = R_r \frac{I_r}{I_{ш}},$$

где $R_{ш}$ и R_r — сопротивления шунта и гальванометра, I_r и $I_{ш}$ — силы тока в гальванометре и в шунте. Так как R_r и I_r зависят от конструкции гальванометра, то данным гальванометром, применяя различные шунты, можно измерять любую силу тока как амперметр.

Гальванометр может быть применен и как вольтметр.

Сопротивление гальванометра R_r постоянно, и сила тока в нем по закону Ома $I = \frac{e}{R}$, где e — напряжение, приложенное к клеммам гальванометра. Напряжение на клеммах определяется из формулы $e = IR$. Выше мы видели, что $I = ac$, поэтому $e = acR$.

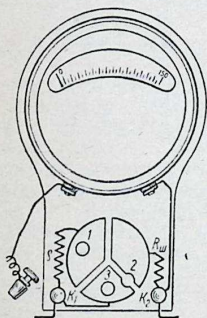


Рис. 30. Гальванометр с шунтом и сопротивлением.

Однако уже напряжение порядка 10^{-4} вольта вызывает отклонение стрелки гальванометра до конца шкалы. Поэтому, чтобы применить гальванометр для измерения больших напряжений, последовательно включается большее сопротивление ρ . В этом случае

$e = ac(R_r + \rho)$ или, заменяя $c(R_r + \rho)$ через k , $e = ka$, откуда

$$k = \frac{e}{a}. \quad (2)$$

Коэффициент k выражает напряжение, вызывающее смещение стрелки на 1 деление и называется ценой деления вольтметра.

Величина добавочного сопротивления ρ зависит от величины измеряемых напряжений, силы тока I_{\max} , ма-

ксимально отклоняющего стрелку гальванометра, и сопротивления последнего.

В этой работе как шунт, так и дополнительное сопротивление уже подобраны. Они вместе с гальванометром монтированы на деревянной доске (рис. 30). На доске имеются две клеммы K_1 и K_2 .

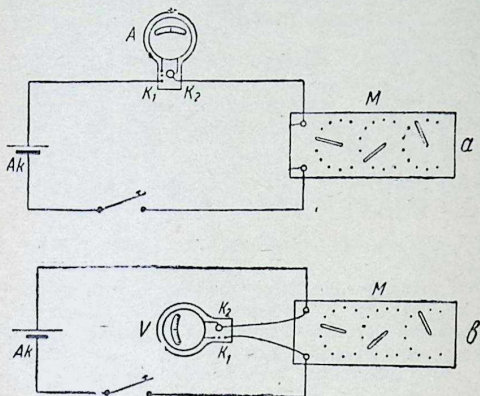


Рис. 31. Включение амперметра и вольтметра.

Одна из клемм гальванометра коротко соединена с клеммой K_2 , другая же имеет подвижный штепсель, который может вставляться в гнезда 1, 2 и 3. Если штепсель вставлен в гнездо 1, то ток входит через клемму K_1 , проходит большое сопротивление ρ , гальванометр и выходит через клемму K_2 . В таком положении прибор является вольтметром и включается по схеме 31, *b*. Если штепсель вставлен в гнездо 2, то ток входит через клемму K_1 , разветвляется, часть его идет через подвижный штепсель в гальванометр и оттуда в клемму K_2 , а большая часть проходит через шунт $R_{ш}$ и в K_2 . В таком виде прибор — амперметр и включается по схеме 31, *a*. Наконец, штепсель в гнезде 3 выключает

и шунт, и добавочное сопротивление ρ , и прибор работает как гальванометр.

Штепсель вставляется в соответствующее гнездо до включения прибора в цепь. Никакие перестановки штепселя при включенном токе не допустимы. В этой работе включение штепселя в гнездо 3 опасно для гальванометра, поэтому гнездо 3 закрыто пробкой. Включать ток можно только после осмотра схемы преподавателем.

Для градуировки прибора, как амперметра, собирается схема рис. 31, а. В магазине M вводится сопротивление R_M около 100 Ω и определяется отклонение стрелки α . Сопротивление шунта и остальной цепи обозначим r ; оно дается при работе.

Тогда $I = \frac{E}{R_M + r}$, откуда по формуле (1)

$$c = \frac{E}{\alpha(R_M + r)}.$$

Постепенно уменьшая сопротивление в магазине, увеличивают ток, доводя стрелку до максимального отклонения, и 5 раз определяют различные значения величины c .

Для градуировки прибора, как вольтметра, собирается схема по рис. 31, б. Сопротивление в магазине R_M равно 100 омам. Пренебрегая потерей напряжения на подводящих проводах, можем считать напряжение на клеммах магазина равным напряжению на клеммах аккумулятора E . Вольтметр включают так: к клеммам K_1 и K_2 присоединяют короткие провода с гнездами на концах. Эти гнезда могут быть надеты на любые контакты магазина. Внутреннее устройство магазина изображено на рис. 32. Набрано 90 Ω . Если подвижные гнезда вольтметра надеть, например, на контакты 3 и 40, то между ними окажется сопротивление $r = 47 \Omega$. Так как падение напряжения в цепи пропорционально сопротивлению,

то $\frac{E}{R_M} = \frac{e}{r}$, откуда $e = \frac{r \cdot E}{R_M}$.

Вставляя значение e в формулу (2), находим

$$k = \frac{r \cdot E}{R_M \alpha}.$$

Переставляя подвижные гнезда, получают и вычисляют различные напряжения и соответствующие им отклонения α . Измерив 5 раз величину k , находят среднее ее значение.

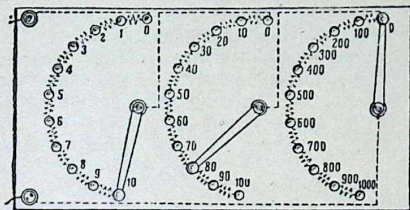


Рис. 32. Устройство магазина сопротивлений.

Примечание. Разность потенциалов на клеммах аккумулятора E дается при задаче. В работе могут применяться гальванометры двух типов: со шкалой, имеющей ноль на середине, или с нулем у начала шкалы. В первом случае полярность клемм безразлична, во втором — нужно обратить внимание на знаки $+$ и $-$, помеченные у клемм K_1 и K_2 . Форма протокола опыта следующая.

Работа № 15. Градуирование амперметра и вольтметра

1) Схема шунтирования гальванометра

2) Градуирование амперметра

Схема

$$E = \quad r =$$

Опыт	R_M	α	$c = \frac{E}{(R_M + r)\alpha}$
1			
2			
3			
4			
5			

Среднее $c =$

3) Градуирование вольтметра

Схема

$$E =$$

Опыт	R_M	r	α	$k = \frac{rE}{R_M\alpha}$
1				
2				
3				
4				
5				

Среднее $k =$

Работа № 16. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ МОСТИКОМ УИТСТОНА

Приборы: 1) реохорд мостика Уитстона, 2) гальванометр, монтированный на доске, 3) магазин сопротивлений, 4) два ключа, 5) два исследуемых сопротивления, 6) аккумулятор или гальванический элемент.

Применяемый в этой работе гальванометр — прибор очень чувствительный, который легко испортить при неумелом обращении. Поэтому прежде чем приступить к работе № 16, следует хорошо ознакомиться с гальванометром, описанным в работе № 15.

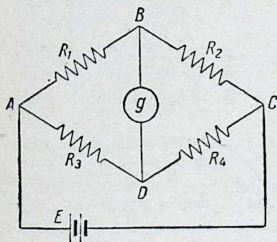


Рис. 33. Теоретическая схема мостика Уитстона.

Теоретическая схема мостика Уитстона представляет замкнутый контур, образованный четырьмя проводниками, имеющими различное сопротивление R_1 , R_2 , R_3 и R_4 (рис. 33). Точки A и C этого контура соединены с полюсами батареи E , благодаря чему они обладают потенциалами V_A и V_C .

Как на участке ABC , так и на участке ADC происходит падение потенциала от V_A до V_C . Можно найти две такие точки B и D , потенциалы которых будут равны, т. е. $V_B = V_D$. Если эти точки цепи соединить через гальванометр, то последний тока не покажет. По равенству потенциалов V_B и V_D можем написать:

$$\left. \begin{aligned} V_A - V_B &= V_A - V_D \\ V_B - V_C &= V_D - V_C \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Но по закону Ома разность потенциалов на участке цепи равна произведению силы тока на сопротивление, а потому выражения (1) можно переписать так:

$$I_1 R_1 = I_3 R_3 \text{ и } I_2 R_2 = I_4 R_4. \quad (2)$$

Так как сила тока I_1 равна I_2 , а $I_3 = I_4$, то, разделив

выражения (2) почленно одно на другое и сократив на I , получим:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}. \quad (3)$$

Это уравнение устанавливает зависимость между четырьмя сопротивлениями мостика Уитстона, если потенциалы V_B и V_D равны. Пользуясь уравнением (3), можно при помощи мостика Уитстона определить любое из составляющих его четырех сопротивлений, если известны остальные три.

Практическая схема, употребляемая для измерений, изображена на рис. 34.

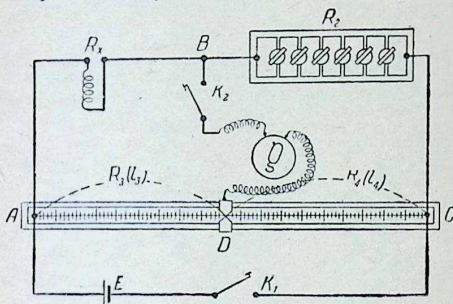


Рис. 34. Практическая схема мостика Уитстона.

Искомое сопротивление R_x составляет одну ветвь мостика. Во вторую ветвь включен магазин сопротивлений R_2 . Это сопротивление можно менять в довольно больших пределах. Сопротивления R_3 и R_4 создаются тонкой однородной проволокой длиной 1 м, натянутой на реохорде. D — скользящий контакт, передвигающийся по струне реохорда. Его положение с точностью до 1 мм может быть определено на шкале реохорда. Перемещая скользящий контакт D по струне реохорда, можно подобрать отношение сопротивлений $R_3:R_4$ так, чтобы было удовлетворено равенство (3). Отношение сопротивлений $R_3:R_4$ равно отношению длины $l_3:l_4$, так как проволока AC по всей длине однородна. Для того чтобы

удовлетворилось равенство (1), перемещают контакт D по струне AC до тех пор, пока стрелка гальванометра не встанет на нулевое деление. Теперь между четырьмя сопротивлениями мостика существует соотношение:

$$\frac{R_x}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} = \frac{l_3}{l_4},$$

откуда

$$R_x = R_2 \frac{l_3}{l_4}. \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что для определения R_x достаточно знать величину сопротивления R_2 и отношение длин $\frac{l_3}{l_4}$.

Сопротивление R_2 подбирается в магазине сопротивлений. Магазин сопротивлений представляет собой ко-

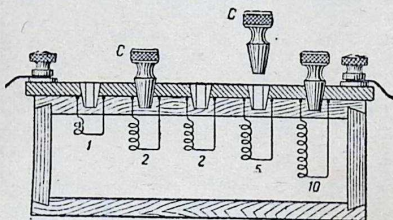


Рис. 35. Устройство штепсельного магазина.

робку, на крышке которой укреплена массивная медная полоса, разрезанная на отдельные пластинки (рис. 35). Между пластинками оставлены очень маленькие зазоры с гнездами, в которые могут быть вставлены медные штепсели. Кроме того, каждая пластинка соединена с соседней через катушку сопротивления. Когда штепсель вынут, то ток проходит только через катушку сопротивления, когда же штепсель вставлен в гнездо, то соседние пластинки замыкаются накоротко, и ток идет через штепсель, сопротивление которого ничтожно мало. Вынимая различные штепсели, мож-

но подобрать нужное сопротивление. Обычно катушки сопротивления помещаются внутри ящика и не видны, но около соответствующих гнезд поставлены числа, указывающие величину сопротивления.

Схема на рис. 34 имеет два ключа: K_1 — ключ батареи и K_2 — ключ гальванометра. Если сопротивления обладают самоиндукцией, то в момент замыкания и размыкания цепи образуется довольно сильный ток самоиндукции, прохождение которого через гальванометр нежелательно. Поэтому надо сначала замыкать ключ в цепи батареи, а потом — гальванометра, а размыкать сперва гальванометр, потом батарею. При отсутствии самоиндукции ключ K_2 не применяют.

Порядок работы. Приступая к работе, надо прежде всего смонтировать установку по схеме.

Чувствительность гальванометра при всех предварительных манипуляциях должна быть сильно понижена. Для этого к гальванометру присоединяется большое „предварительное“ сопротивление ρ (рис. 30). Только тогда, когда положение движка подобрано так, что при замыкании ключа K_2 стрелка гальванометра совсем не движется, можно повысить его чувствительность, перенеся подвижный штепсель гальванометра из гнезда 1 в гнездо 3.

Чтобы найти неизвестное сопротивление R_x , следует набрать в магазине какое-нибудь сопротивление R_0 и перемещать ползушку по проволоке AC до тех пор, пока при замыкании ключа K_2 стрелка гальванометра не будет оставаться неподвижной. Когда это положение ползушки найдено, остается только отсчитать по линейке длины отрезков l_3 и l_4 и произвести расчеты по формуле (4). Однако если сопротивление R_2 очень сильно отличается от R_x , то ползушку придется придвинуть очень близко к концу линейки и, как показывает теория, измерения становятся недостаточно точными.

Поэтому перед началом измерений надо приблизительно определить порядок величины R_x . Делается это так: чувствительность гальванометра уменьшается, для чего подвижный штепсель гальванометра ставится в гнездо 1. В магазине берется самое маленькое сопротивление — 1 ом, а ползушка ставится на середину шкалы. После этого нажимают ключи K_1 и K_2 , и стрелка гальванометра откидывается, например, влево. Затем набирается в магазине большое сопротивление (около

1 000 омов) и опять нажимается ключ. Стрелка гальванометра опять откидывается, причем надо различать три случая.

1. Отклонение в ту же сторону, но меньше. Это значит, что сопротивление магазина теперь ближе подходит к величине сопротивления R_x , но, очевидно, все еще мало. Теперь остается только перемещать ползушку, пока ток в гальванометре не исчезнет.

2. Отклонение в ту же сторону, но больше. Это значит, что большое сопротивление менее подходит к R_x , чем малое, т. е. измеряемое сопротивление меньше 1 ома. Поэтому в магазине набирают опять сопротивление в 1 ом и перемещают ползушку до исчезновения тока в гальванометре.

3. Отклонение в обратную сторону. Это значит, что измеряемое сопротивление лежит между 1 и 1 000 омов. В этом случае ползушку оставляют на месте, а сопротивление магазина постепенно уменьшают, следя все время за отклонениями гальванометра. Когда эти отклонения станут совсем незначительными (2—3 деления шкалы), небольшими перемещениями ползушки добиваются полного исчезновения тока в гальванометре. После этого ставят гальванометр на максимальную чувствительность, для чего переносят подвижный штепсель гальванометра в гнездо 3 и окончательно устанавливают ползушку. В этом случае получается максимальная точность наблюдений, так как ток исчезает в гальванометре при положении ползушки почти на середине шкалы.

Для измерения даются две спиральки, натянутые между четырьмя клеммами, или две лампы накаливания. Сначала измеряется сопротивление каждой из спиралей в отдельности. Обозначим их R_x' и R_x'' . Затем измеряется сопротивление обеих спиралек, соединенных последовательно. Если наблюдения удачны, то полученное сопротивление должно с большой точностью равняться $R_x' + R_x''$. Наконец, для проверки формулы сопротивления параллельно включенных проводников $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_x'} + \frac{1}{R_x''}$ включают спирали параллельно и измеряют их сопротивление.

Как только измерение кончено, штепсель гальванометра необходимо вынуть из

гнезда 3 и поставить на прежнее место в гнездо 1.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 16. **Определение сопротивления проводников мостиком Уитстона**

№ измерения	R_2 в Омах	l_3 в мм	l_4 в мм	R_x	№ измерения	R_2 в Омах	l_3 в мм	l_2 в мм	R_x
1-й опыт. Сопротивление №					3-й опыт. Последовательное соединение				
1					1				
2					2				
Среднее					Среднее				
2-й опыт. Сопротивление №					4-й опыт. Параллельное соединение				
1					1				
2					2				
Среднее					Среднее				

Проверка 3-го опыта по формуле $R = R' + R''$

Проверка 4-го опыта по формуле

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R'} + \frac{1}{R''} = \dots ; R =$$

Работа № 17. **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ**

Приборы: 1) реохорд, 2) аккумулятор свинцовый, 3) гальванометр стрелочный, 4) нормальный элемент, 5) элементы Даниэля, Грене, Лекланше или сухой эле-

мент типа Лекланше, 6) переключатель, 7) двойной ключ.

Электродвижущей силой элемента называют разность потенциалов или напряжение между полюсами элемента в разомкнутом состоянии. Такой элемент, обладающий внутренним сопротивлением r , будучи замкнут на внешнее сопротивление R , по закону Ома даст ток силой $I = \frac{e}{R+r}$. Если при помощи точного прибора измерить силу тока и не менее точно определить сопротивления $R+r$, то можно определить электродвижущую силу.

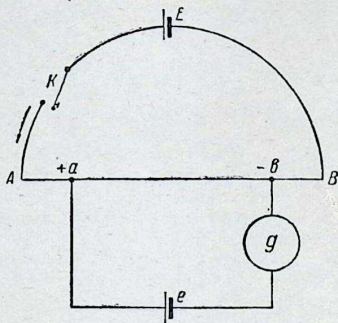


Рис. 36. Теоретическая схема метода компенсации.

Но многие элементы, благодаря поляризации электродов, меняют свою электродвижущую силу при наличии тока. Поэтому этот метод измерения не дает достаточно точных результатов.

Если произвести измерение электродвижущей силы непосредственным присоединением вольтметра к клеммам элемента, то все же не получим искомой электродвижущей силы. Вольтметр обладает хотя и большим, но измеримым сопротивлением, через него пойдет ток и напряжение на его клеммах не будет равно электродвижущей силе. Кроме того, даже малый ток может изменить электродвижущую силу некоторых элементов,

От указанных недостатков свободен компенсационный метод, который может применяться в различных видоизмененных схемах.

В принципе компенсационный метод заключается в следующем (рис. 36). Пусть аккумулятор с электродвижущей силой E замкнут проводником AB с сопротивлением R . При постоянном токе I разность потенциалов между двумя любыми точками цепи a и b выразится величиной:

$$V_a - V_b = J \cdot r_{ab}$$

где r_{ab} — сопротивление участка ab . При достаточной электродвижущей силе источника (аккумулятора) на участке AB всегда можно подобрать две такие точки,

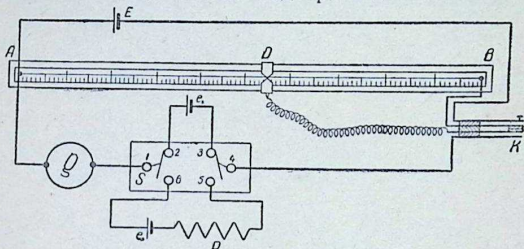


Рис. 37. Практическая схема метода компенсации.

разность потенциалов которых равна электродвижущей силе исследуемого элемента e . Если к этим точкам присоединить исследуемый элемент так, как это изображено на рис. 36, т. е. плюс элемента к точке a , соединенной с плюсом аккумулятора, и минус элемента к точке b , соединенной с минусом аккумулятора, то в цепи испытуемого элемента aeb тока не будет, и гальванометр тока не обнаружит.

Определив разность потенциалов $V_a - V_b$, можно таким образом определить электродвижущую силу элемента, которая равна

$$e = V_a - V_b.$$

Практически компенсационный метод осуществляется по схеме рис. 37.

E — аккумулятор	S — переключатель
K — двойной ключ	D — подвижной контакт
AB — реохорд	e_0 — нормальный элемент
g — гальванометр	e_x — испытуемый элемент

Переключатель S имеет шесть клемм и перекидную дугу. В положении, изображенном на рисунке, ток идет от элемента e_x через клемму 2, дугу, клемму 1 в гальванометр, затем через AD в ключ K , затем через клеммы 4 и 3 возвращается в элемент. Элемент e_0 не включен, но его включение можно произвести быстро, для чего достаточно перекинуть дугу (паука) так, чтобы две его лапки соединились с клеммами 6 и 5. При этом автоматически выключается элемент e_x .

Замыкая ключ K , перемещаем подвижной контакт D по реохорду до тех пор, пока стрелка гальванометра не вернется к нулю. В этом случае электродвижущая сила элемента компенсируется разностью потенциалов точек A и D :

$$e_x = V_A - V_D.$$

Мы знаем, что $V_A - V_D$ равно потерянному напряжению IR_1 в цепи аккумулятора, где R_1 — сопротивление проволоки AD . Следовательно, можем написать:

$$e_x = IR_1. \quad (a)$$

Теперь перекидываем паука на нормальный элемент. Повторяя описанные выше манипуляции, находим новое положение движка D_0 , при котором стрелка гальванометра стоит на нуле.

Отсюда

$$e_0 = IR_0, \quad (b)$$

где R_0 — сопротивление участка проволоки AD_0 .

Деля почленно выражение (a) на (b), получим $\frac{e_x}{e_0} = \frac{R_1}{R_0}$.

Так как $R_1 = \rho \frac{l_1}{S}$ и $R_2 = \rho \frac{l_2}{S}$, то $\frac{e_x}{e_0} = \frac{l_1}{l_0}$,

откуда

$$e_x = e_0 \frac{l_1}{l_0}, \quad (1)$$

где l_1 и l_0 — длины участков проволоки, сопротивления которых равны R_1 и R_0 .

Порядок работы. Установка монтируется по схеме на рис. 37. В ветви переключателя включается исследуемый элемент Лекланше e_x и нормальный элемент e_0 .

Замыкание и размыкание цепей E и e производятся при помощи двойного ключа (рис. 38). Он автоматически сперва включает цепь аккумулятора, а затем цепь элемента и в обратной последовательности выключает их. Перемещая подвижной контакт, добиваются отсутствия тока в гальванометре. Таким образом последовательно определяются величины R_1 и R_0 и вычисляется по формуле (1) искомая e_x .

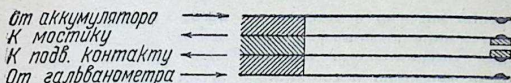


Рис. 38. Схема двойного ключа.

После этого опыт повторяется с элементом Даниэля (электродвижущая сила нормального элемента дается при задаче).

При обращении с нормальным элементом требуется особая осторожность, чтобы не произвести короткого замыкания, что может испортить элемент. Поэтому в его цепь обычно включается добавочное (буферное) большое сопротивление, обозначенное на схеме.

Это сопротивление R совершенно не влияет на электродвижущую силу элемента. Но оно не дает развиваться току большой силы в случае замыкания элемента.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 17. Определение электродвижущей силы элементов методом компенсации

Зарисовать схему установки (чертеж)

	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3
Элемент Лекланше	$l_1 =$	$l_1 =$	$l_1 =$
Нормальный элемент $e_0 =$. .	$l_0 =$	$l_0 =$	$l_0 =$
$e_x = e_0 \frac{l_1}{l_0}$	$=$	$=$	$=$
	Среднее $e_x =$		

Такая же таблица для элемента Даниэля и Грне.

Работа № 18. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ЭКВИВАЛЕНТА РАБОТЫ

Приборы: 1) аккумулятор, 2) реостат, 3) амперметр, 4) калориметр с проводником, 5) термометр, 6) ключ (рубильник), 7) секундомер или часы с секундной стрелкой.

Примечание. В работе может применяться как постоянный ток, так и переменный. В зависимости от этого подбирается реостат и электроизмерительные приборы.

По закону сохранения энергии, при переходе механической энергии в теплоту должно выделиться вполне определенное количество теплоты, эквивалентное затраченной механической работе. Эта пропорциональность энергии тепловой и механической может быть выражена так:

$$Q = \kappa A,$$

где Q — количество теплоты, эквивалентное механической энергии A . Коэффициент пропорциональности

$$\kappa = \frac{Q}{A}$$

называется термическим эквивалентом работы. Он показывает, какое количество единиц тепла соответствует единице работы. Численное значение κ зависит от выбранных единиц. За единицу теплоты мы примем грамм-калорию, за единицу работы — джоуль.

Для определения термического эквивалента работы следовало бы преобразовать механическую работу непосредственно в тепловую и вычислить κ . Мы же применим несколько иной метод.

Известно, что ток силой в I ампер, проходя в течение τ секунд по проводнику, сопротивление которого равно r омам, выделяет энергию

$$A = I^2 r \tau \text{ джоулей.}$$

Если энергия тока полностью переходит в теплоту, то на каждый джоуль работы придется количество тепла, равное

$$\kappa = \frac{Q}{I^2 r \tau}, \quad (1)$$

где Q — количество тепла в калориях, выделившееся в рассматриваемом участке провода. Эта величина, показывающая, сколько калорий соответствует одному джоулю, и есть искомый термический эквивалент работы.

Чтобы определить количество тепла, выделяемого током, пропускаем ток через нихромовую или никелиновую спираль, погруженную в калориметр. При этом выделившаяся теплота может быть определена по известной калориметрической формуле:

$$Q = (m + cm_0)(t_2 - t_1), \quad (2)$$

где m — масса воды, m_0 — масса калориметра с мешалкой, c — удельная теплоемкость калориметра, t_1 — начальная температура воды калориметра и t_2 — окончательная ее температура.

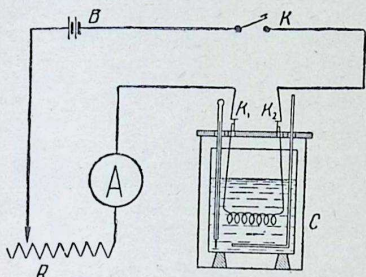


Рис. 39. Определение термического эквивалента работы.

Что касается работы тока, то, зная сопротивление r , ее легко вычислить из показаний амперметра и времени работы. Сопротивление r спирали дается при задаче или определяется при помощи мостика Уитстона (см. работу № 16).

Монтаж приборов производится по следующей схеме (рис. 39).

B — батарея аккумуляторов напряжением 4 — 6 V , R — реостат на 15 Ω , A — амперметр до 10 A , C — калориметр, в который опущена нихромовая спираль, соединенная

с клеммами K_1 и K_2 на крышке калориметра, K — ключ (рубильник).

Порядок работы. 1. Взвешиваем калориметр с мешалкой и обозначим его массу m_0 . 2. Взвешиваем калориметр с водой и мешалкой, но без спирали, причем воды надо налить столько, чтобы вся спираль была погружена в нее и чтобы слой воды над спиралью был не менее 1 см. Этот вес обозначим m_1 , тогда масса налитой воды $m = m_1 - m_0$. 3. Собираем установку по схеме рис. 39. 4. Включаем на несколько секунд ток и регулируем его так, чтобы сила тока была от 3 до 4 А. 5. Измеряем с точностью до $0,1^\circ$ температуру t_1 воды в калориметре, причем устанавливаем эту температуру так, чтобы она была градусов на 5 ниже температуры комнаты. 6. Включаем ток и отмечаем по часам момент его включения. Замечаем по амперметру силу тока и в течение всего опыта с помощью реостата поддерживаем эту силу тока постоянной. Отсчеты надо производить с точностью до 0,1 деления шкалы. 7. После того как вода в калориметре нагреется выше комнатной температуры на столько же градусов, на сколько была в начале опыта ниже, выключаем ток и записываем время прохождения тока τ секунд. 8. Отмечаем температуру t_2 воды в калориметре тотчас же после выключения тока. В течение опыта воду надо все время перемешивать. 9. Вычисляем значение k , подставив в формулу (1) все найденные при опыте величины. Предварительно величину Q определяем из формулы (2).

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 18. Определение термического эквивалента работы

Схема установки (чертеж)

Вычисление количества выделившегося тепла

Масса	Температура	Вычисление Q
1) Калориметра с мешалкой $m_0 =$ 2) Калориметра с мешалкой и водой $m_1 =$ 3) Воды $m = m_1 - m_0 =$	1) Начальная в калориметре $t_1 =$ 2) Окончательная $t_2 =$	$Q = (m + cm_0)(t_2 - t_1)$ $Q =$

Вычисление термического эквивалента работы κ :
 Время начала нагревания Сила тока $I =$
 Время конца нагревания Сопротивление $r =$

$$\tau =$$

$$\kappa = \frac{Q}{I^2 r \tau} = \dots$$

Работа № 19. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕМЕНТА

Приборы: 1) два термоспая, монтированных в фарфоровых трубках, 2) нулевой гальванометр, 3) миллиамперметр, 4) аккумулятор, 5) два калориметрических сосуда, 6) термометр, 7) постоянное сопротивление, монтированное на щитке с двумя клеммами, 8) реостат, 9) ключ, 10) секундомер.

В замкнутой цепи, составленной из двух металлов (рис. 40), т. е. имеющей два спая I и II , возникает электродвижущая сила e , если спай имеют разные температуры t и t_0 . Величина e зависит от металлов, образующих спай, и от разности температур $t - t_0$ и может быть выражена так:

$$e = \eta(t - t_0) + \lambda(t - t_0)^2 + \mu(t - t_0)^3. \quad (1)$$

Однако коэффициенты при членах, имеющих вторую и третью степени температур, так малы, что при разности температур, не превышающей 100° , эти члены можно отбросить. Будем считать $e = \eta(t - t_0)$, откуда

$$\eta = \frac{e}{t - t_0}. \quad (2)$$

Коэффициент η выражает термоэлектродвижущую силу, возникающую при разности температур спаев в 1° . Эта сила очень мала и имеет такие значения в милливольт-тах для спаев:

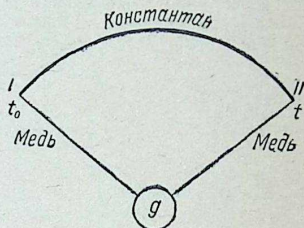


Рис. 40. Схема термоэлемента.

	$\frac{mV}{\text{град.}}$
Платина — платинородий	0,006
Медь — железо	0,01
Константан — медь	0,041
Константан — железо	0,053

В этой работе применяется термопара или термоэлемент, образованный металлами медь — константан.

Между смещением стрелки гальванометра N и электродвижущей силой термопары e существует прямая пропорциональность, т. е. $N = ce$. Заменяя e через $\eta(t - t_0)$, имеем $N = c\eta(t - t_0)$. Вместо c и η пишем один коэффициент пропорциональности n , зависящий от применяемых металлов, сопротивления всей цепи и чувствительности гальванометра. Имеем

$$N = n(t - t_0),$$

откуда

$$n = \frac{N}{t - t_0}. \quad (3)$$

Последнее выражение, показывающее смещение стрелки гальванометра при разности температур спаев в 1° , назовем чувствительностью термоустановки. Она определяется опытным путем.

Зная n , можно применить термопару как термометр. Из формулы (3) имеем:

$$t = \frac{N}{n} + t_0.$$

Поэтому, поместив один спай в среду с неизвестной температурой t и заметив температуру нулевого спая t_0 и показания гальванометра N , можно определить t .

Так как электродвижущая сила термопары очень мала ($0,041 \frac{mV}{\text{град.}}$), необходим очень чувствительный гальванометр. У стрелочного гальванометра n невелико, и в такой упрощенной установке трудно производить определение температур с точностью меньше 1° .

В этой работе мы применим другой более чувствительный компенсационный метод градуировки термопары и одновременно будем определять чувствительность схемы с гальванометром.

Компенсационная схема изображена на рис. 41. Она состоит из двух соединенных вместе контуров: контура термопары $batt_0gb$, в который включены термопара и гальванометр, и контура батареи $EabRmAKE$ с аккумулятором, реостатом и миллиамперметром.

Если замкнуть цепь батареи, то между точками a и b установится некоторая разность потенциалов e_1 . По закону Ома $e_1 = i_1 r$, где i_1 — сила тока в цепи, а r — постоянное сопротивление на участке ab . Следовательно,

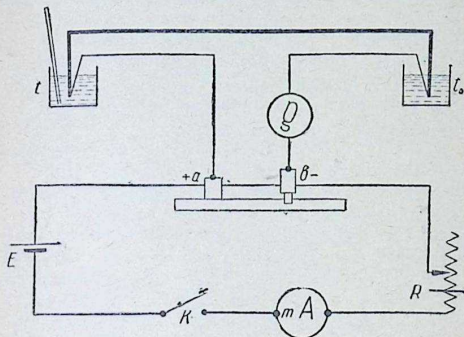


Рис. 41. Компенсационная схема термоэлемента.

если реостатом R увеличивать или уменьшать силу тока i_1 , то пропорционально будет меняться и разность потенциалов на участке ab .

На концах разомкнутой термопары при разности температур $t - t_0$ возникает разность потенциалов e . Если термопару присоединить к клеммам a и b так, как показано на рис. 41, т. е. плюс термопары соединить с точкой a , а минус — с точкой b , то можно при помощи реостата подобрать в контуре батареи такую силу тока i , при которой разность потенциалов e_1 на участке ab будет равна электродвижущей силе термопары e . В этом случае тока в цепи термопары не будет, и гальванометр укажет нуль. Таким образом, для каждой разности температур спаев $t - t_0$ в цепи батареи будет определенный

ток i , компенсирующий электродвижущую силу термопары

$$i = K(t - t_0).$$

Коэффициент K , выражающий зависимость между i и $t - t_0$, может быть дан в числовом выражении, но эту зависимость можно выразить и графически.

Порядок работы. 1. Собирают установку по схеме рис. 41. В реостат вводят полное сопротивление. Чтобы не пережечь миллиамперметра, перемещение движка реостата ограничено так, что в цепи всегда имеется сопротивление около $15 - 20 \Omega$. Контур термопары присоединяют, не обращая внимания на знаки полюсов. 2. Один калориметрический сосуд наполняют битым льдом с водой, другой — водопроводной водой. В каждый из них погружают по термоспаю. Стрелка гальванометра при этом сместится. На короткое время замыкают ключ K . Если отклонение стрелки гальванометра уменьшится или стрелка отклонится в другую сторону, то контур термопары включен верно. Если же этого нет, то провода термопары переключают. 3. При замкнутом ключе K , перемещая движок реостата, добиваются исчезновения тока в контуре термопары. Когда стрелка гальванометра установится на нуле, отмечают силу тока i_1 и температуру активного спая t_1 . Затем размыкают ключ K и определяют отклонение N_1 стрелки гальванометра, что будет нужно для определения чувствительности термопары в упрощенной схеме. 4. Воду в сосуде подогревают на $10 - 15^\circ$ и производят новое определение i_2 , t_2 и N_2 . Так, постепенно повышая температуру на $10 - 15^\circ$, доводят воду до кипения. Перед каждым измерением вода перемешивается, горелка отодвигается в сторону, и после этого возможно быстро измеряют i , t и N . Определение N прекращают, если стрелка выходит из шкалы. 5. Повторяют измерения при охлаждении воды, для чего из сосуда отливают постепенно горячую воду и добавляют холодную, так чтобы производить измерения примерно через $10 - 15^\circ$. В этой части работы нет надобности добиваться, чтобы температуры точно совпадали с температурами первой половины опыта. 6. Результаты измерений изображаются в виде графика в прямоугольной системе координат. Для этого по абсциссе

откладывают силу тока i , а по ординате — соответствующие разности температур $t_1 - t_0$. В результате получим систему точек, соединив которые плавной линией, получим „кривую“ градуировки. Пользуясь этой кривой, можем по величине отклонений гальванометра определить разность температур $t_1 - t_0$. Полученная кривая градуировки пригодна только для этой термопары. 7. Вычисляют чувствительность упрощенной установки n по формуле (3) и чувствительность компенсационной схемы

$K = \frac{i}{t - t_0}$. 8. Рекомендуется определить также температуру собственного тела. Для этого активный спай термопары закладывают в подмышечную впадину и, заметив температуру нулевого спаия t_0 , определяют ток компенсации i . Пользуясь кривой градуировки, определяют температуру.

Примечание. Учебные термопары помещены в предохранительные фарфоровые трубки, которые увеличивают тепловую инерцию термопары. Поэтому перед тем, как производить отсчет температуры, нужно выждать минуты три для того, чтобы термопара прогрелась. Разумеется, что для двух тонких проводников было бы достаточно нескольких секунд.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 19. Исследование термоэлемента
Схема установки

№	При нагревании				При охлаждении					
	температура воды t	сила тока i	гальванометр N	$K = \frac{i}{t - t_0}$	$n = \frac{N}{t - t_0}$	температура воды t	сила тока i	гальванометр N	$K = \frac{i}{t - t_0}$	$n = \frac{N}{t - t_0}$
1										
2										
и т. д.										

График градуировки (приложить)

Средняя чувствительность $n =$
Средняя чувствительность $K =$

Температура тела =
Ток компенсации $i =$
Температура по графику $t =$
То же по формуле $t = \frac{i}{K} =$

Работа № 20. ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Приборы: 1) мостик Кольрауша, 2) сосуд с электродами для электролита, 3) гальванический элемент, 4) ванна для подогревания электролита, 5) термометр, 6) исследуемые растворы, 7) нормальный раствор КСl.

Если пропускать через электролит постоянный ток, то под действием последнего произойдет выделение ионов растворенного вещества на электродах. При этом возникает обратная электродвижущая сила поляризации, ко-

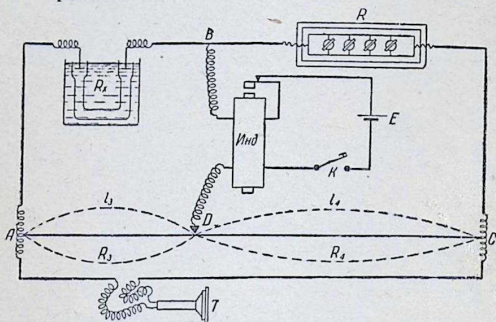


Рис. 42. Схема для определения проводимости электролитов.

торая кажущимся образом увеличивает сопротивление электролитов. Но при переменном токе и при электродах с достаточно большой поверхностью явления поляризации ничтожно малы. Поэтому при определении электропроводности электролитов пользуются переменным током. В этом случае можно применить схему мостика Уитстона, но с некоторыми видоизменениями, введенными Кольраушем.

В качестве источника переменного тока обыкновенно применяется небольшая индукционная катушка *Инд* с молоточковым прерывателем. Частота наведенного тока вторичной катушки такого индуктора вполне достаточна для того, чтобы явления поляризации не были заметны.

Переменный ток, получаемый от индуктора, не вызывает отклонения стрелки гальванометра, который поэтому заменяется телефоном.

Описание приборов. Схема мостика Кольрауша изображена на рис. 42. Она принципиально не отличается от схемы Уитстона, только источник и измеритель тока — телефон — обменялись здесь своими местами. При отсутствии тока в телефоне соотношение между четырьмя сопротивлениями мостика удовлетворяет формуле

$$\frac{R_x}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}.$$

Искомое сопротивление электролита

$$R_x = R_2 \frac{l_3}{l_4}. \quad (1)$$

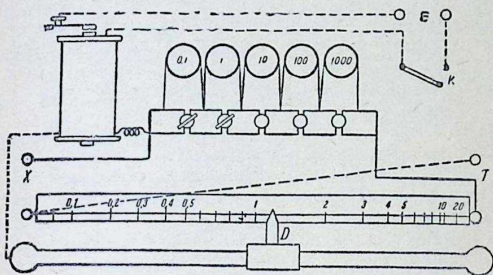


Рис. 43. Мостик Кольрауша.

Мостик Кольрауша обыкновенно смонтирован в готовом виде (рис. 43). Он имеет магазин сопротивлений, индукционную катушку и натянутую калиброванную проволоку. Эта проволока лежит на шкале, деления которой выражают не длину участков l_3 и l_4 , а отношение этих длин $l_3:l_4$. Поэтому на середине шкалы стоит единица, а номера всех делений влево от середины меньше единицы, так как при всяком положении движка D в левой половине шкалы отношение $\frac{l_3}{l_4} < 1$. Справа от

середины номера делений возрастают, потому что здесь $\frac{l_3}{l_4} > 1$. Таким путем облегчается вычисление $R_2 \frac{l_3}{l_4}$, так как величина второго множителя $\frac{l_3}{l_4}$ непосредственно прочитывается на шкале.

На приборе имеются клеммы T для включения телефона, E — для элемента и X — для включения исследуемого сопротивления. Ключ K предназначен для включения и выключения тока. Обычно мостик имеет еще переключатель для пользования постоянным током, если определяется сопротивление металлических проводников.

Электролит, сопротивление которого определяется, наливается в стеклянный сосуд U-образной формы. Верхние концы сосуда несколько расширены. В этих расширениях помещаются электроды. Электроды должны быть полностью погружены в раствор. Производя измерения, надо обращать внимание, чтобы ни на электродах, ни под ними не было пузырьков воздуха. Сосуд с электролитом помещается в ванну с водой, температуру которой можно изменить по желанию.

Порядок работы. Осторожно вынимают сосуд для электролита из ванны и вынимают электроды. Сосуд и электроды промываются дистиллированной водой, а затем раствором, электропроводность которого определяется. После того как сосуд промыт, его заполняют исследуемым раствором так, чтобы электроды были полностью погружены в раствор, и помещают в ванну. Производят все необходимые включения и регулируют индукторий с помощью винта, проходящего через стойку, по которой подводится ток к молоточку. Правильно отрегулированный прерыватель дает в телефоне чистый тон.

В магазине вынимают один из штепселей и включают ток. После этого добиваются исчезновения звуков в телефоне, для чего перемещают по шкале движок D . Если исчезновение звука происходит при положении подвижного контакта D у края шкалы, то берут в магазине другое сопротивление. Нетрудно сообразить, что если контакт D сдвинут к левому концу, то сопротивление R_2 велико. Вообще не рекомендуется пользоваться участками проволоки, очень близкими к клеммам. Рабочий

участок шкалы обычно ограничивается делениями 0,1 слева и 10 справа. После того как первый отсчет сделан, сопротивление R_2 увеличивают на 10%, что достигается выниманием соседнего штепселя, и делается второе определение R_x . Среднее из двух полученных величин принимают за искомое сопротивление электролита. Следует обратить внимание на постоянство температуры во время опыта. Сопротивление электролита довольно сильно изменяется с температурой, поэтому все опыты производят в ванне, которая задолго до опыта наполняется водой и имеет комнатную температуру. Колебания температуры воды не должны превышать 1°.

После того как измерение закончено, опыт повторяется с раствором более сильной концентрации. Сосуд и электроды промываются этим раствором, и опыт происходит при той же температуре ванны.

Так исследуются четыре раствора постепенно повышающейся концентрации.

Полученные результаты дадут величину полного сопротивления электролита. Для определения удельной проводимости надо, кроме того, знать величину так называемой электролитической емкости сосуда C . Посмотрим, как определяется эта величина.

Сопротивление цилиндрического проводника длиной l и сечением S выражается так:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ — удельное сопротивление проводника.

Величина, обратная удельному сопротивлению, т. е. $\sigma = \frac{1}{\rho}$, называется удельной проводимостью. Вводя ее в предыдущее выражение, получим

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{S}.$$

Строго говоря, это выражение применимо только к цилиндрическому или призматическому проводнику, имеющему по всей длине постоянное сечение S , для проводника же произвольной формы можно только утверждать,

что $R \approx \frac{1}{\sigma}$, или, вводя коэффициент пропорциональности,

$$R = C \frac{1}{\sigma}. \quad (2)$$

Величина C называется электролитической емкостью сосуда. Если сосуд имеет неправильную форму, то его электролитическую емкость приходится определять опытным путем при помощи раствора, проводимость которого σ уже известна. В качестве такого раствора можно взять насыщенный раствор NaCl или нормальный раствор KCl, т. е. содержащий 74,60 г KCl в литре раствора.

Величины проводимости σ некоторых растворов даны в приложенной табл. VI на стр. 177.

Наполняя одним из этих растворов сосуд, определяют сопротивление R_1 электролита и, воспользовавшись формулой (2), находят

$$C = R_1 \cdot \sigma_1.$$

Пользуясь найденным значением C и формулой (2) вычисляют проводимость всех измеренных раньше растворов.

Полученные величины σ наносят на диаграмму. По ординатам откладывают величины σ , а по абсциссам — концентрацию раствора и полученные точки соединяют плавной кривой, показывающей изменение проводимости в зависимости от концентрации раствора.

Работу начинают с определения электролитической емкости C .

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 20. Измерение удельной проводимости электролитов
Определение электролитической емкости C

	σ	R_2	$\frac{l_3}{l_4}$	R	$C = R\sigma$
1					
2					
3					

Среднее $C =$

Исследуемый раствор

№ опыта	R_2	$\frac{l_3}{l_4}$	R_x	$\sigma = \frac{C}{R_x}$	Концентрация
1	1) 2)		Среднее		. . . %
2	1) 2)			Среднее	

и так далее для различных концентраций.

К отчету приложить диаграмму изменения проводимости от концентрации.

Работа № 21. ИЗМЕРЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ И ЕМКОСТИ В ЦЕПЯХ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Приборы: 1) амперметр переменного тока, 2) вольтметр переменного тока 120 В, 3) 2 катушки самоиндукции, 4) конденсатор, 5) потенциометр.

Как известно из теории, емкость и самоиндукция, включенные в цепь переменного тока, создают емкостное и индуктивное сопротивление току. Так как каждая цепь обладает, кроме того, и омическим сопротивлением R , то общее сопротивление цепи складывается из трех сопротивлений: омического, индуктивного и емкостного. Сила тока цепи выражается формулой:

$$I_{\text{эфф}} = \frac{V_{\text{эфф}}}{\sqrt{R_0^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (1)$$

В этом выражении $I_{\text{эфф}}$ — эффективная сила тока. $V_{\text{эфф}}$ — эффективное напряжение, R_0 — омическое сопротивление в омах, L — самоиндукция в генри, C — емкость в фарадах, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ — круговая частота тока, T — период тока.

Для тока городской осветительной сети, который имеет период $T = \frac{1}{50}$ секунды, величина $\omega = 2\pi \cdot \frac{1}{50} = 314$.

Если в цепи идет постоянный ток, то катушки самоиндукции будут обладать только омическим сопротивлением. Величина омического сопротивления определяется для каждой катушки при помощи мостика Уитстона так, как это изложено в работе № 16.

Упражнение 1. Определение самоиндукции катушки.

В частном случае, когда в цепи переменного тока нет конденсатора, формула (1) упрощается и принимает вид:

$$I_{\text{эфф}} = \frac{V_{\text{эфф}}}{\sqrt{R_0^2 + (\omega L)^2}}.$$

Решая это равенство относительно L , получим

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{V_{\text{эфф}}^2}{I_{\text{эфф}}^2} - R_0^2}. \quad (2)$$

Формулой (2) можно воспользоваться, чтобы определить самоиндукцию катушки L . Для этого составляем

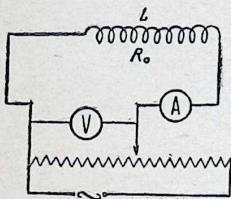


Рис. 44. Самоиндукция в цепи переменного тока.

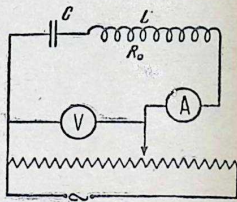


Рис. 45. Емкость и самоиндукция в цепи переменного тока.

схему по рис. 44. Включаем переменный ток и по амперметру и вольтметру отмечаем $I_{\text{эфф}}$ — силу тока и $V_{\text{эфф}}$ — его напряжение. Переменный ток включается в реостат с большим сопротивлением — потенциометр. Часть тока ответвляется в рабочую цепь, в которой включена измеряемая катушка самоиндукции. Измерения производят при различных значениях величины $V_{\text{эфф}}$.

Вводя в формулу (2) найденные значения $I_{эфф}$, $V_{эфф}$ и R_0 и помня, что для городского тока $\omega = 314$, определим коэффициент самоиндукции катушки L . Измерив самоиндукцию обеих катушек, результаты заносят в табл. 1.

Упражнение 2. Определение емкости конденсатора.

При наличии в цепи переменного тока емкости и самоиндукции, сила тока выразится формулой (1). Если упражнение 1 уже сделано, то можно воспользоваться собранной схемой для определения емкости C . Для этого в эту схему последовательно с самоиндукцией включаем емкость, после чего схема примет вид, изображенный на рис. 45.

Меняя при помощи потенциометра напряжение V , находим несколько значений силы тока I и для каждого вычисляем значения емкости C . Для удобства вычислений формулу (1) решаем относительно C :

$$C = \frac{1}{\omega \left(\omega L \mp \sqrt{\frac{V_{эфф}^2}{I_{эфф}^2} - R_0^2} \right)}. \quad (3)$$

В этой формуле значения L и R_0 известны из упражнения 1, $V_{эфф}$ и $I_{эфф}$ определяются по амперметру и вольтметру, включенным в цепь. Результаты заносим в табл. 2 и выражаем C в микрофарадах μF .

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 21. Измерение самоиндукции и емкости в цепях низкой частоты

Упражнение 1. Определение самоиндукции катушки.

Таблица 1

№ опыта	$V_{эфф}$	$I_{эфф}$	$L = \frac{1}{\omega}$	$\sqrt{\frac{V_{эфф}^2}{I_{эфф}^2} - R_0^2}$
1				
2				
3				
4				
5				

$$\text{Среднее } L = \frac{\sum L}{n} =$$

Упражнение 2. Определение емкости конденсатора.

Таблица 2

№ опыта	V	I	C
1			
2			
3			
4			
5			

$$\text{Среднее } C = \frac{\sum C}{n} =$$

9) реостат на 40 Ω , 10) 2 ключа, 11) однополюсный рубильник, 12) катодная лампа, гнездо для лампы и провода, 13) переключатель.

Катодная лампа представляет собой небольшой стеклянный баллон, в который впаяна стеклянная же трубочка — „ножка лампы“. На этой ножке смонтирована вся внутренняя часть лампы, состоящая из трех электродов (рис. 46): 1) катод — вольфрамовая нить, натянутая между двумя металлическими держателями; 2) сетка — спиралька из проволоки, по оси которой натянута нить катода; 3) анод — металлический цилиндр, охватывающий сетку и анод.

Эти части соединены проводниками с четырьмя ножками, укрепленными в цоколе лампы. При этом катод двумя своими полюсами соединен с двумя ножками цоколя. Анод и сетка имеют по одной ножке. Присоединяя батарею к ножкам катода, можно накалить нить (катод) лампы. Воздух из лампы тщательно удален (остаточное давление в лампе поряд-

Работа № 22. ХАРАКТЕРИСТИКА ТРЕХЭЛЕКТРОДНОЙ КАТОДНОЙ ЛАМПЫ

Приборы: 1) аккумулятор для накала катода (нити) на 4 v , 2) анодная батарея на 80—120 v , 3) сеточная батарея на 20 v , 4) миллиамперметр на 15—20 mA , 5) вольтметр постоянного тока на 120 v для измерения разности потенциалов между анодом и нитью, 6) вольтметр на 15—30 v , 7) вольтметр на 5—15 v , 8) потенциометр на 1500—2000 Ω ,

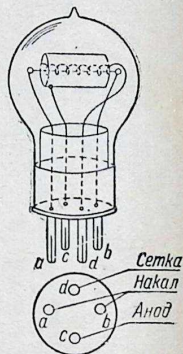


Рис. 46. Лампа с сеткой.

ка 10^{-7} мм). Лампа вставляется в гнездо, которое состоит из фибровой пластинки с вделанными в нее четырьмя металлическими гнездами для ножек цоколя лампы.

Рассмотрим схему, изображенную на рис. 47. Здесь лампа изображена овалом, внутри которого помещены катод K , анод A и сетка C . Нить катода накаливается от батареи в 4 вольта BH , называемой батареей накала. Напряжение тока, накаливающего катод, регулируется реостатом RH и измеряется вольтметром VH . Катод и анод имеют такие названия потому, что к ним присоеди-

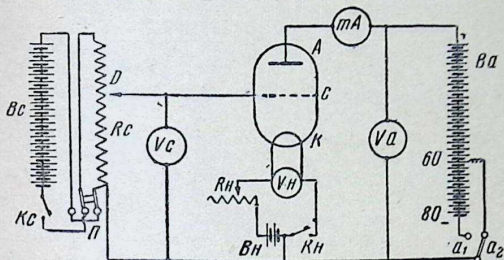


Рис. 47. Схема для снятия характеристики.

нены положительный и отрицательный полюсы большой анодной батареи Ba . Батарея делится на две секции. Ключом a_1a_2 можно включить или всю батарею, или часть ее, и тогда разность потенциалов между анодом и катодом будет или 80 V, или 60 V. Измерение этого напряжения производится вольтметром Va . Анод, батарея и катод образуют анодную цепь, в которую включен еще миллиамперметр на 10—15 миллиампер. Не будем пока касаться левой части схемы и сетки.

Если при помощи ключа KH включить батарею накала BH и раскалить до светлокрасного каления нить катода K , то с него начнут выделяться в окружающее пространство электроны.

Эти электроны окружают нить в виде облака отрицательных зарядов, благодаря чему большая часть „испаряющихся“ электронов будет отталкиваться обратно к

нити. Их притяжению к нити способствует то обстоятельство, что нить, потеряв электроны, приобретает положительный заряд. Если же между анодом и нитью создать разность потенциалов, присоединив к аноду положительный, а к нити отрицательный полюс батареи Ba , то электроны начнут двигаться вдоль силовых линий поля от катода K к положительно заряженному аноду A . Через лампу потечет ток, который называется анодным током. Облако отрицательных зарядов около катода поредет, так как часть электронов уходит к аноду, и чем больше будет напряжение поля (чем больше силовых линий), тем больше будет уходить электронов к аноду. Облако будет постепенно рассеиваться, меньше электронов будет возвращаться к катоду и анодный ток будет возрастать. Наконец, при достаточно большой разности потенциалов между анодом и катодом наступает такой момент, когда все электронное облако около нити будет уничтожено, и все электроны, „испаряющиеся“ с нити, будут доходить до анода. Дальнейшее увеличение напряжения поля уже не вызовет возрастания анодного тока. Этот максимальный ток, зависящий только от количества испаряющихся с катода электронов, носит название тока насыщения. С возрастанием температуры (накала) катода число испаряющихся электронов, а стало быть, и анодный ток, быстро возрастает.

Во всех этих рассуждениях мы предполагали, что сетка у нас совсем отсутствует, т. е. в лампе имеются только два электрода — катод и анод.

Можно получить изменение анодного тока и не изменяя анодного напряжения. Для этой цели служит третий электрод — сетка.

Обратимся к левой части схемы 47. Батарея Bc напряжением 20 V через переключатель Π соединена с реостатом Rc . Реостат включен как потенциометр, т. е. перемещая движок, можно брать с него любое напряжение, допускаемое батареей Bc . Для контроля над напряжением служит вольтметр Vc на 15—30 V. Это напряжение создает дополнительное поле между катодом и сеткой лампы.

Поле анода и поле сетки действуют теперь совместно, облако около нити начнет рассеиваться быстрее, чем при действии одного поля анода, а поэтому больше электро-

нов сможет пройти к аноду. Сетка, расположенная к катоду ближе, чем анод, сильнее действует на облако электронов, поэтому анодный ток быстро возрастает.

Часть электронов захватывается сеткой, но так как ее поверхность невелика, то эта часть весьма незначительна, пока сеточное напряжение невелико. В цепи сетки появляется небольшой ток, называемый сеточным¹.

При помощи переключателя Π можно переменить полюсы сеточной батареи Bc , давая на сетку отрицательный знак.

Если наложить на сетку отрицательный потенциал по отношению к нити, то между сеткой и нитью образуется поле, задерживающее ее электроны, и анодный ток уменьшается. Можно дать на сетку такое отрицательное напряжение, что анодный ток через лампу совсем прекратится.

Задача этой работы состоит в том, чтобы изучить зависимость между анодным током и сеточным напряжением. Эта зависимость называется сеточной характеристикой трехэлектродной лампы.

Соберем схему по рис. 47.

Большое внимание при сборке схемы надо обратить на цепь накала, следя за тем, чтобы сопротивление R_n было введено целиком и между нитью и батареей был поставлен рубильник. Отрицательные полюсы батарей Bc и Ba присоединяются к отрицательному полюсу батареи Bn или к ее средней точке. Вольтметр V_n включается параллельно нити. При установке лампы необходимо обратить внимание на расположение ножек цоколя и ножек подставки. Ключи и рубильник замыкаются после проверки схемы преподавателем.

Производство опыта и измерений. После того как схема собрана и проверена преподавателем, включают рубильник K_n и с помощью реостата R_n увеличивают напряжение на нити до 3,6 В по вольтметру V_n (нормальное напряжение накала). Затем замыкают ключ анодной цепи и ключ K_c в цепи сетки. На анод дают вначале напряжение 60 вольт (для чего ключ анода

¹ Нормально на сетку даются небольшие напряжения, и сеточный ток мал, но при больших напряжениях сеточный ток быстро возрастает и может даже стать больше анодного тока.

приключен к клемме a_2). Напряжение на аноде проверяют по вольтметру Va . С помощью потенциометра Rc задают на сетку потенциал, равный 0, для чего движок D ставят в крайнее положение. Затем постепенно увеличивают напряжение на сетке, передвигая ползушку на потенциометре Rc . Дают последовательно E_c значения: 0; +1,0; +2,0 V, руководствуясь показаниями вольтметра Vc . Отмечают соответствующие значения анодного тока I_a , продолжая опыт до тех пор, пока ток не достигнет максимального значения и при дальнейшем увеличенном напряжении E_c не начнет уменьшаться. Это уменьшение объясняется тем, что сетка, став сильно положительной, начнет забирать все больше электронов, и ток в анодной цепи начинает падать. После этого двигают ползушку потенциометра Rc обратно, давая те же значения для E_c , что и раньше, но уже в обратной последовательности, и снова отмечают значение I_a . Дойдя до 0, переключают с помощью переключателя Π сеточную батарею Vc , давая на сетку отрицательный потенциал, а полюс отводят к катоду.

Увеличивая постепенно отрицательное напряжение на сетке, отмечают соответствующие значения анодного тока до тех пор, пока он при некотором значении E_c не делается равным 0. Затем идут обратно до значения $E_c = 0$ и опять отмечают значения I_a .

Если наблюдения сделаны тщательно, то значения при повышении напряжения E_c и при его понижении должны получиться одни и те же в пределах возможных ошибок наблюдений. Окончательно надо взять среднее значение из двух наблюдений.

Результаты наблюдений записываем в табл. 1.

По полученным данным строим график зависимости анодного тока от сеточного напряжения, т. е. сеточную характеристику трехэлектродной лампы: по оси ординат откладывают I_a , по оси абсцисс E_c и полученные точки соединяют кривой.

Работа повторяется еще один раз, но при анодном напряжении 80 V, для чего выключаем ключ a_2 и переключаем батарею Va на 80 V, отмечая по Va анодное напряжение, и снова аналогичным образом снимаем еще одну характеристику и изображаем ее на том же графике. Результаты наблюдений записываем в табл. 2.

Во время наблюдений необходимо тщательно следить за напряжением накала V_n и держать его строго постоянным, равным 3,6 вольта. Необходимо также следить, чтобы напряжение на аноде во время опыта не менялось. Форма протокола опыта следующая.

Работа № 22. Характеристика трехэлектродной катодной лампы

Схема установки (чертеж)

Таблица 1

Напряжение		Анодный ток I_a при изменении сеточного напряжения		
анодное E_a	сеточное E_c	от 0 до $\pm E_c$	от $\pm E_c$ до 0	среднее значение I_a
60	0 +1,0 и т. д.			

Таблица 2 (составляется по типу таблицы первой)

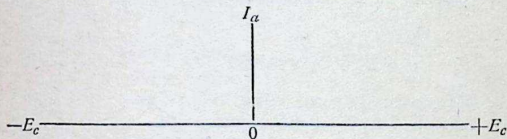


График характеристики лампы.

Работа № 23. ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЙ РЕЗОНАНСА В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Приборы: 1) звуковой генератор, 2) колебательный контур с переменной емкостью, 3) конденсатор, 4) катушка самоиндукции, 5) гальванометр, 6) детектор, 7) батарея накала на 4 В, 8) анодная батарея или кенотронный выпрямитель.

Для получения переменного тока высокой частоты употребляются лампы генераторы, с помощью которых можно осуществить очень большой диапазон частот, начиная от частот звуковых и кончая десятками миллионов колебаний в секунду. Каждый генератор рассчитан обыкновенно на определенный диапазон волн. На рис. 48 дана схема генератора, который состоит из колебательного контура L_0LaC , катодной лампы M , катушки обрат-

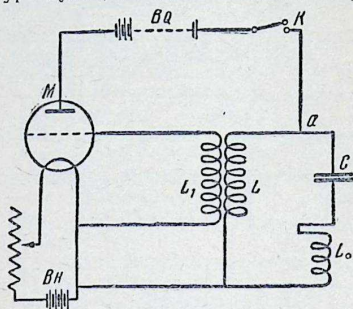


Рис. 48. Схема генератора незатухающих колебаний.

ной связи L_1 , анодной батареи $Ва$ и батареи накала нити лампы $ВН$.

Работа генератора. Колебательный контур состоит из катушек самоиндукции L и L_0 и емкости C . Катушка самоиндукции L_0 отделена от катушки L для связи с резонатором. Период колебательного контура определяется формулой Томсона:

$$T = 2\pi \sqrt{\mathcal{L}C},$$

где $\mathcal{L} = L + L_0$ выражено в генри, C — в фарадах и T — в секундах.

Длина электромагнитной волны, соответствующей периоду контура,

$$\lambda = \nu T,$$

где $\nu = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек, т. е. равна скорости света.

Если зарядить конденсатор колебательного контура от какого-нибудь источника постоянного тока, то, как известно, в контуре возникнут колебания. Это будут затухающие колебания, так как при прохождении тока в контуре происходит нагревание проводников (джоулево тепло) и, кроме того, происходит излучение электромагнитной энергии в окружающую среду. Чтобы получить незатухающие колебания с постоянной амплитудой, необходимо эти потери возмещать, для чего в контур следует добавлять энергию, компенсирующую потери. Следовательно, нужен „резервуар“, из которого бы подавалась эта энергия. Таким резервуаром для осуществления незатухающих колебаний является анодная батарея *Ва*.

Наличия колебательного контура и источника энергии еще недостаточно для генерации незатухающих колебаний. Необходимо, кроме того, чтобы энергия подавалась в контур порциями в такт колебаниям.

Таким приспособлением, регулирующим и управляющим энергией анодной батареи, является катодная лампа и так называемая обратная связь L_1 .

Катушка L_1 присоединена одним концом к сетке, другим — к катоду. Эта катушка обратной связи L_1 индуктивно связана с катушкой L так, что когда в катушке L ток возрастает, то в катушке L_1 образуется наведенная электродвижущая сила, заряжающая сетку знаком плюс, а катод — знаком минус.

С увеличением сеточного напряжения растет ток, проходящий через лампу от анодной батареи, а так как этот ток проходит одновременно и через катушку самоиндукции L , то и в ней ток увеличивается. Увеличение тока в катушке L вызывает увеличение потенциала на сетке лампы. Увеличение напряжения на сетке вызовет еще больший анодный ток и т. д. Этот процесс увеличения тока в лампе и в колебательном контуре будет продолжаться в лучшем случае до тех пор, пока ток не достигнет постоянной величины „тока насыщения“.

Одновременно с возрастанием анодного тока в катушке L возникает электродвижущая сила самоиндукции, противодействующая возрастающему анодному току. При этом происходит зарядка пластин конденсатора: верхней — отрицательным и нижней — положительным

зарядом. По мере приближения тока к максимальной его величине скорость его изменения будет становиться все меньше, а так как электродвижущая сила индукции пропорциональна скорости изменения тока, то в катушке L_1 произойдет уменьшение электродвижущей силы. При этом положительный знак на сетке сохранится, но величина потенциала станет меньше. С этого момента начинается прогрессирующее уменьшение анодного тока.

Ток самоиндукции в катушке L переменит направление, так как самоиндукция теперь будет поддерживать затухающий анодный ток. Через катушку L пойдет затухающий анодный ток, поддерживающий его ток самоиндукции и разрядный ток конденсатора. Путь через лампу уже затруднен, благодаря появившемуся одновременно отрицательному потенциалу сетки. С уменьшением анодного тока направление электродвижущей силы в катушке L_1 изменилось, сетка получила отрицательный знак и „затруднила путь“ анодному току. Поэтому электроны из катушки L идут в нижнюю обкладку конденсатора, и последний заряжается. Теперь у конденсатора минус внизу и плюс сверху.

В следующей стадии колебательного процесса происходит перезарядка пластин конденсатора. Через катушку L пойдет усиливающийся разрядный ток противоположного прежнему анодному току направления. Этот ток поддерживает отрицательный потенциал на сетке, благодаря чему путь для анодного тока все еще закрыт.

Разрядный ток в катушке L достигает наибольшего значения в тот момент, когда конденсатор разряжен. Как только разрядный ток начнет ослабевать, то в силу законов индукции в катушке L_1 переменится направление электродвижущей силы, и на сетке появится положительный потенциал. Лампа вновь станет пропускать электроны и появится анодный ток. В первый момент возникновения анодного тока он еще не может идти в катушку L , так как там имеется встречный ток самоиндукции, поддерживающий разрядный ток конденсатора. Поэтому анодный ток идет в конденсатор и заряжает его, понемногу возрастает в катушке L , и описанный колебательный процесс повторяется вновь.

Описание работы генератора дано схематично, в действительности явления протекают сложнее,

Резонатор служит для определения периода или частоты колебаний генератора. Колебательный контур резонатора состоит из катушки самоиндукции L' , конденсатора переменной емкости C' со включенным параллельно детектором D и гальванометром g . Резонатор индуктивно связывается с генератором, для чего достаточно поставить его недалеко от катушки L_0 генератора (рис. 49).

Упражнение 1. Получение резонансных кривых колебательного контура.

Если генератор работает, то частота колебаний $\nu = \frac{1}{T}$ вполне определена и равна $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. С такой же частотой происходят колебания в резонаторе. Возникающий при этом в резонаторе ток определяется при помощи гальванометра. Так как гальванометр не реагирует на переменный ток, то последовательно с ним включается детектор D , выпрямляющий этот ток. Детектор состоит из кристалла и металлического острия (пружинки) и обладает свойством пропускать ток только в определенном направлении. Если период резонатора не совпадает с периодом генератора, то сила тока I в гальванометре будет мала. Меняя емкость C' , можно приблизить период резонатора к периоду генератора. Чем больше это приближение, тем больше сила тока в резонаторе. Она достигает максимального значения при явлении резонанса, когда период резонатора станет равным периоду генератора. В этом случае

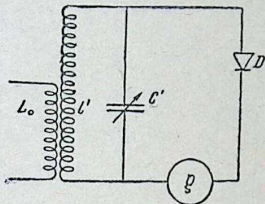


Рис. 49. Резонирующий контур.

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L'C'}}, \text{ т. е. } LC = L'C'.$$

Упражнение состоит в том, что находят силу тока в резонаторе при разных величинах емкости C' . Изменение емкости конденсатора C' производится простым враще-

нием ручки, при этом на шкале конденсатора отсчитывается введенная емкость. Таких определений делают 10—12, последовательно на 10 делений увеличивая емкость и обязательно перейдя через максимальное значение силы тока I . Результаты заносят в таблицу и на график. По ординате откладывается сила тока I , а по абсциссе — емкость конденсатора C' . Соединив отложенные точки, получим „резонансную“ кривую. Она имеет ясно выраженный максимум тока, соответствующий определенной емкости C' . Находим по графику эту емкость. Самоиндукция L' дается при работе. Теперь можем определить период и частоту генератора.

Упражнение 2. Определение емкости конденсатора.

Собранная схема позволит определить величину емкости неизвестного постоянного конденсатора.

Дан конденсатор неизвестной емкости C_x . Включим его в контур резонатора параллельно имеющейся емкости C' и снова снимем резонансную кривую. Максимум тока будет теперь при другой величине переменной емкости резонатора C'' .

Так как период генератора не изменился, то

$$L'C' = L'(C'' + C_x),$$

откуда

$$C_x = C' - C''.$$

Упражнение 3. Определение коэффициента самоиндукции.

Неизвестную катушку самоиндукции L'' включаем в резонатор последовательно с самоиндукцией L' и снимаем резонансную кривую. Определим максимум тока, которому соответствует емкость C''' . Ввиду постоянства периода генератора

$$L'C' = (L' + L_x)C''',$$

откуда

$$L_x = \left(\frac{C'}{C'''} - 1 \right) L'.$$

Форма протокола опыта следующая.

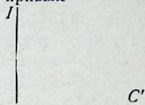
Работа № 23. Изучение явлений резонанса в колебательном контуре

- 1) Схема генератора.
- 2) Схема резонатора.

Упражнение 1. Получение резонансных кривых.

№ отсчетов	Емкость C'	Сила тока I
1		
2		
и т. д.		

График резонансных кривых



Максимум тока соответствует емкости $C' = \dots$
 Самоиндукция $L' = \dots$
 Период $T = 2\pi \sqrt{L'C'} = \dots$
 Длина волны $\lambda = \dots$
 Частота $\nu = \frac{1}{T} = \dots$

Упражнение 2. Определение емкости конденсатора

Таблица — как в упражнении 1. Кривая наносится на тот же график.

$$C' = \dots \quad C_x = C' - C'' = \dots$$

Упражнение 3. Определение коэффициента самоиндукции

Таблица — как в упражнении 1. Кривая наносится на тот же график.

$$C' = \dots \quad C'' = \dots$$

$$L_x = L' \left(\frac{C'}{C''} - 1 \right) = \dots$$

Работа № 24. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ВОЛН (РЕЗОНАНСА)

Приборы: 1) камертон с резонаторным ящиком, 2) стеклянная труба с передвигающимся поршнем, 3) резиновый молоток.

Между частотой колебаний камертона ν , скоростью распространения звуковой волны v и длиной волны λ существует зависимость:

$$v = \lambda \nu \quad (1)$$

Пусть звуковая волна от камертона достигает открытого отверстия трубы. Она распространяется по воздуху внутри трубы, доходит до дна, отражается и идет обратно к отверстию трубы. При этом произойдет сложение падающих и отраженных волн. Эти волны интерферируют друг с другом и при подходящей длине трубы образуют систему стоячих волн.

Около дна трубы должен образоваться узел волны смещений, а в отверстии — пучность. В зависимости от длины трубы и от длины звуковой волны между дном и отверстием трубы может расположиться еще несколько узлов и пучностей. Стоячие волны будут наблюдаться, если в трубе укладывается точно четверть волны или три четверти волны, или вообще, длина трубы L равна нечетному числу $\frac{\lambda}{4}$, т. е.

$$L = \frac{(2N - 1)\lambda}{4}, \quad (2)$$

где N — любое целое число.

Если длина трубы удовлетворяет условию (2), то воздушный столб в трубе резонирует на колебания камертона, и мы услышим усиление звука. По усилению и убеждаемся в наличии резонанса.

Из выражения (2), принимая во внимание, что $\lambda = \frac{v}{\nu}$, определим скорость распространения звука:

$$v = \nu \frac{4L}{2N - 1}. \quad (3)$$

Частота колебаний звуковой волны ν обыкновенно выгравирована на ножке камертона и в дальнейшем считается величиной известной.

В трубе (рис. 50), применяющейся в этой работе, около подвижного поршня P , служащего дном, образуется узел, а в слуховом отверстии A — пучность. Меняя положение поршня, можем настроить трубу на звук любой частоты в пределах, допускаемых длиной трубы.

Порядок измерений. Для производства опыта камертон устанавливается так, чтобы отверстие резо-

наторного ящика было обращено к открытому отверстию трубы и находилось вблизи него.

Устанавливают подвижной поршень на расстоянии 5—8 см от слухового отверстия A , коротким ударом резинового молотка заставляют звучать камертон и передвигают поршень, удаляя его от слухового отверстия. При этом будет слышно постепенное усиление интенсивности звука. При некотором положении поршня звук достигнет максимальной интенсивности и при дальней-

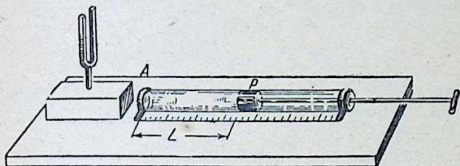


Рис. 50. Резонанс звука.

шем выдвигении поршня будет вновь ослабляться. Следует остановить поршень в том положении, при котором звук наиболее силен, и отсчитать по шкале расстояние L_1 от слухового отверстия до поверхности поршня. В этом случае между поршнем и отверстием укладывается четверть волны, т. е. $L_1 = \frac{\lambda}{4}$. Отодвигая еще дальше поршень, услышим вновь ослабление звука и затем новое усиление, соответствующее новой пучности в слуховом отверстии. Теперь, очевидно, между точкой A и поршнем укладывается три четверти волны $L_2 = \frac{3\lambda}{4}$. Камертон вообще довольно быстро затухает, поэтому его следует перед нахождением второй пучности еще раз возбудить. Положение L_2 также отсчитываем и записываем. Отсчет расстояний L_1 и L_2 производится с точностью до 0,5 см.

При установлении поршня на максимум звука не следует фиксировать свое внимание на положении поршня. Надо установить максимум звука, не глядя на

поршень, а после уже отметить положение поршня и не смущаться тем, что отсчеты положений поршня несколько отличаются друг от друга.

Каждый опыт повторяется 10 раз, и результаты заносятся в таблицу и обрабатываются.

Пользуясь формулой (3), мы получим скорость звука, выраженную в сантиметрах в секунду при температуре комнаты. Обычно ее пересчитывают на метры в секунду. Для определения скорости звука при $t=0^\circ$ следует воспользоваться формулой:

$$v_t = v_0 \sqrt{1 + 0,004t} \text{ м/сек,} \quad (4)$$

где v_t — найденная из опыта скорость звука при температуре лаборатории t° , а v_0 — скорость звука при температуре $t=0^\circ$.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 24. Определение скорости звука методом стоячих волн (резонанса)

№ отсчета	L_1	λ_1	L_2	λ_2	$\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$	$\Delta\lambda$	$(\Delta\lambda)^2$
1							
2							
3							
4							
5							
и т. д.							

$$\Sigma\lambda = \quad \quad \quad \Sigma\Delta^2 =$$

Средняя ошибка результата $E_\lambda = \pm \sqrt{\frac{\Sigma\Delta^2}{n(n-1)}}$

Средняя $\lambda = \frac{\Sigma\lambda}{n} \pm E_\lambda = \dots \pm \dots$

Скорость звука $v_t = v(\lambda \pm E_\lambda) = \dots \pm$

Температура воздуха $t =$

Скорость звука, приведенная к 0° , $v_0 = \frac{v_t \pm E_v}{\sqrt{1 + 0,004t}} = \dots \pm$

Относительная ошибка $D_v = \dots$ или в $\% =$

Работа № 25. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНЫХ РАССТОЯНИЙ И СВЕТОСИЛЫ ЛИНЗ

Приборы: 1) оптическая скамья с тремя ползушками, 2) линза двояковыпуклая, 3) линза двояковогнутая, 4) экран из белой бумаги, 5) лампочка, закрытая непрозрачным футляром, в одной из стенок которого вставлено матовое стекло с нанесенной на нем сеткой.

Лучи, падающие на линзу параллельно ее главной оптической оси, по выходе из линзы пересекаются в ее главном фокусе. Фокуса два — по одному с каждой стороны линзы. Расстояние от фокуса до линзы называется главным фокусным расстоянием. Рассеивающие линзы имеют отрицательное фокусное расстояние.

Вначале рассмотрим методы определения фокусного расстояния выпуклых (собирающих) линз.

1. Метод определения расстояний предмета и его изображения от линзы.

Основная формула линзы

$$\frac{1}{f} + \frac{1}{d} = \frac{1}{F} \quad (1)$$

устанавливает зависимость между главным фокусным расстоянием F , расстоянием предмета от линзы d и расстоянием изображения от линзы f . Поэтому определение главного фокусного расстояния может быть сведено к определению d и f и вычислению F по формуле (1):

$$F = \frac{df}{d + f} \quad (2)$$

Величины d и f определяются непосредственным измерением. Для этого на оптической скамье (рис. 51), на достаточно большом расстоянии друг от друга, ставится предмет A , которым служит нанесенная на матовом стекле сетка, освещенная лампочкой, и экран B , а между ними ставят линзу. Передвигая линзу по оптической скамье, устанавливают ее так, чтобы на экране получилось ясное изображение сетки. По шкале, нанесенной на оптической скамье, отсчитывают расстояние d предмета от линзы и расстояние f изображения от линзы и результаты заносят в табл. 1.

При достаточном расстоянии между A и B , перемещая линзу по скамье, можно получить два изображения предмета на экране, увеличенное и уменьшенное. Для обоих случаев применяют формулу (2) и определяют F .

После этого расстояние между предметом и экраном изменяют и, произведя новую установку линз на наиболее отчетливое изображение сетки, вновь определяют расстояния d и f .

Такие измерения производят 4—5 раз. По данным каждого опыта вычисляют фокусное расстояние F и затем берут его среднее значение.

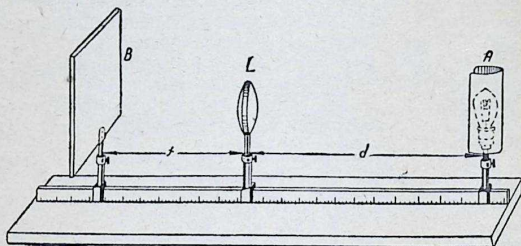


Рис. 51. Оптическая скамья с линзой.

2. Метод зрительной трубы. Если параллельные пучки лучей, падающих на линзу, собираются в точках главной фокальной плоскости, то и лучи, выходящие из точек главной фокальной плоскости, пройдя линзу, дают пучки параллельных лучей. На этом свойстве параллельных лучей основан второй способ определения фокусного расстояния с помощью зрительной трубы. Зрительная труба устанавливается на какой-либо отдаленный предмет, видимый из окна комнаты, так, чтобы этот предмет был ясно виден (установка трубы на бесконечность). Так как лучи от отдаленного предмета практически параллельны, то его изображение получится в главной фокальной плоскости объектива.

После того как труба установлена на бесконечность, снимают экран B , трубу укрепляют на оптической скамье, перед ней устанавливают линзу, а затем через эту си-

стему рассматривают предмет. Находят такое положение линзы, при котором предмет будет ясно виден в трубу. Расстояние от линзы до предмета и будет искомым расстоянием F . Этот опыт повторяется 5 раз, и результаты его заносятся в табл. 2.

Кроме того, для каждой линзы следует вычислить оптическую силу D и светосилу. Оптическая сила, как известно, определяется величиной, обратной фокусному расстоянию, выраженному в метрах. В этом случае она выражается в диоптриях

$$D = \frac{1}{F}.$$

Светосила характеризует яркость изображения, даваемого линзой. Изображение строится лучом, вошедшим в отверстие линзы. Чем меньше фокусное расстояние, тем ярче изображение, и наоборот. Светосила линзы характеризуется отношением $\frac{\delta}{F}$, где δ — диаметр линзы и F — ее фокусное расстояние. Это отношение выражается в виде дроби, числитель которой равен единице, а знаменатель может быть десятичным дробным числом, например, $\frac{1}{4,5}$ или $\frac{1}{6,3}$ и т. п.

Рассеивающая линза. Если несколько тонких линз с фокусными расстояниями $F_1, F_2, F_3 \dots$ и т. д. сложено вместе, то в первом приближении можно считать их эквивалентными одной линзе с фокусным расстоянием F , величина которого находится из уравнения

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2} + \frac{1}{F_3} + \dots \quad (3)$$

Если сложить вместе рассеивающую линзу с фокусным расстоянием F_2 и собирающую — с фокусным расстоянием F_1 , то уравнение (3) даст:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2}, \quad (4)$$

где F — фокусное расстояние нашей системы линз.

Соотношением (3) можно воспользоваться для определения F_2 — главного фокусного расстояния вогнутой

линзы, которая не дает действительного изображения и для которой описанные выше методы не годятся. Для этого вогнутую линзу соединяем в одной оправе с собирающей линзой, имеющей большую оптическую силу. Главное фокусное расстояние F этой комбинации линз определится из формулы (4). Так как мы берем собирающую линзу с большей оптической силой, чем у рассеивающей, то F будет положительно и, значит, наша система линз будет собирающей и даст действительное изображение. В качестве выпуклой линзы можно взять уже измеренную нами линзу, если оптическая сила ее достаточно велика.

Определение общего фокусного расстояния F обеих линз, а если надо, то и фокусного расстояния вспомогательной собирающей линзы F_1 , производится по одному из указанных способов. Величина F_2 определится из формулы (4):

$$F_2 = \frac{F \cdot F_1}{F_1 - F} \quad (5)$$

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 25. Определение фокусных расстояний и светосилы линз

Таблица 1

Определение по расстояниям предмета и изображения

№ опыта	d	f	F
1			
2			
3			
4			
5			

Среднее $F =$
 Оптическая сила $D =$
 Светосила $\frac{\delta}{F} =$

Таблица 2

Определение с помощью зрительной трубы

№ опыта	F
1	
2	
3	
4	
5	

Среднее $F =$
 Оптическая сила $D =$
 Светосила $\frac{\delta}{F} =$

Таблица 3

Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы

№ опыта	F_1	d	f	F	$F_2 = \frac{F \cdot F_1}{F_1 - F}$
1					
2					
3					
4					
5					

Среднее $F_2 =$ Оптическая сила рассеивающей линзы $D_2 =$

Работа № 26. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕЛЕСНЫХ УГЛОВ ПО ВЕЛИЧИНЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ДАВАЕМОГО ЛИНЗОЙ

Приборы: 1) пространственный угломер, 2) миллиметровая или клетчатая бумага, 3) масштаб.

Простейшим методом определения телесных углов является следующий.

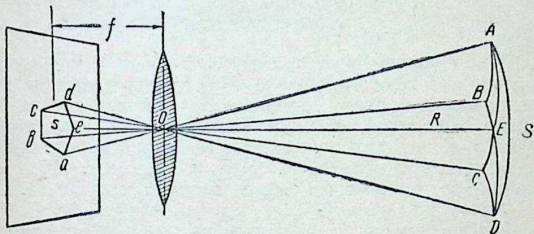


Рис. 52. Построение изображения в линзе.

При построении изображения какого-нибудь тела или части небесного свода $ABCDE$, даваемого линзой, все лучи, проходящие через центр линзы O , не преломляются. Поэтому углы, образуемые ими с главной оптической осью линзы, одинаковы как при входе, так и при выходе из линзы (рис. 52). Это — лучи AOa , BOb , COc ,

DOd и EOe . Если тело достаточно удалено, то изображение будет в главной фокальной плоскости. Оно ограничено периметром $abcde$. При этом телесный угол, опирающийся на изображение и имеющий вершину в центре линзы O , равен телесному углу, под которым из той же точки O видно тело или часть неба.

Чтобы измерить этот угол, воспользуемся следующими соображениями. Пусть сферическая поверхность $ABCDE$ имеет поверхность S см². Телесный угол в 1 стерадиан — это центральный угол, опирающийся на площадь R^2 см. Следовательно, телесный угол с вершиной в O имеет

$$\omega = \frac{S}{R^2} \text{ стерадиан.}$$

Но как S , так и R обычно недоступны измерению. Поэтому измеряется площадь s внутри контура $abcde$ и фокусное расстояние f . Тогда искомым телесный угол будет равен:

$$\omega = \frac{s}{f^2} \text{ стерадиан.}$$

Очевидно что отношение $\frac{s}{f^2}$ сохранит свою величину даже в том случае, если изображение будет внефокальным.

Площадь изображения измеряется при помощи миллиметровой бумаги. После того как изображение получено, его по контуру обводят карандашом. Подсчитывают число квадратов, занятых изображением. Зная сторону одного квадрата, определяют площадь изображения в квадратных сантиметрах. Это и будет s . Расстояние f определяют по масштабной линейке или шкале.

Угломерный прибор состоит из линзы L , передвигающейся по шкале T . У начала шкалы помещен экран P со штифтом в центре его, на который накалывается измерительная бумага C (рис. 53). Штифт совпадает с главной оптической осью линзы. Прибор устанавливается так, чтобы изображение располагалось по возможности симметрично относительно оси. Тогда штифт будет в центре изображения. Совпадение центра изображения со штифтом происходит при некотором наклоне главной оптической оси к горизонту. Для этого линза с экра-

ном и шкалой могут поворачиваться. Угол подъема φ отсчитывается по дуге транспортира B . Винт закрепляет экран, когда изображение заняло на экране центральное место.

Указанные метод и прибор применяются для определения коэффициента естественного освещения в комнате. Если бы не было ни стен, ни крыши, то на горизонтальную поверхность изливался бы световой поток со всего неба, т. е. заключенный в телесном углу 2π . Этот поток создает освещенность L . На самом деле в

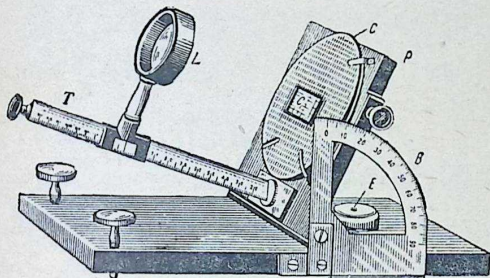


Рис. 53. Угломерный прибор.

комнату проникает свет через окна от очень ограниченного участка неба, заключенного внутри телесного угла, например, ω . Освещенность, создаваемая им на той же горизонтальной поверхности, будет I .

Выраженное в процентах отношение освещенности в комнате I к одновременной освещенности всем небом L называется коэффициентом естественного освещения.

Очевидно, что не всякая область неба одинаково освещает горизонтальную поверхность. Поток ω лучей, падающих перпендикулярно (рис. 54), и такой же поток, падающий наклонно под углом φ , дадут различную освещенность.

Теория показывает, что освещенность L горизонтальной поверхности, создаваемой полусферой неба, равна πI , где I — световой поток, излучаемый с 1 стерадиана поверхности неба.

Освещенность же l небесной поверхностью, видимой через окно внутри телесного угла ω , будет равна $l\omega \sin\varphi$, где φ — угол между световым пучком и горизонтом, отсчитываемый по дуге B .

Поэтому:

$$\frac{l \cdot 100}{L} = \frac{l\omega \sin\varphi \cdot 100}{\pi l} = \frac{\omega \sin\varphi \cdot 100}{\pi} \text{ ‰}.$$

Принято считать освещенность допустимой, если коэффициент естественного освещения не менее 0,5, и хорошей, если он больше 2. При наличии нескольких окон коэффициент естественного освещения равен сумме их коэффициентов. Поэтому коэффициент естественного освещения определяется для каждого окна отдельно.

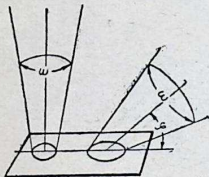


Рис. 54. Освещенность как функция угла падения.

П о р я д о к р а б о т ы.

1. Определить масштаб применяемой клетчатой бумаги и наколоть ее на экран. 2. Установить прибор линзой к окну по уровню E , пользуясь установочными винтами. 3. Поднять линзу со шкалой так, чтобы изображение окна заняло центральное положение на клетчатой бумаге.

Перемещая линзу по шкале, добиваются максимальной яркости и четкости изображения. 4. Закрепить винт и отсчитать угол φ . 5. Обвести острым карандашом контуры окна, всех оконных переплетов, предметов, находящихся внутри комнаты и затеняющих небо, и таких же предметов, затеняющих небо, за окном. Все эти площади выбрасываются при подсчете квадратов как несветящиеся. 6. Подсчитать число квадратов, освещаемых небесным сводом, и их площадь s . 7. Отсчитать f и сделать вычисления.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 26. Измерения телесных углов по величине изображения, даваемого линзой

Начертить схематический план комнаты с указанием на нем расположения окон и положения исследуемой точки.

Приложить зарисованное изображение светового отверстия и указать на нем световую площадь.

янии наилучшего видения $D = 25$ см. На рис. 55 увеличение

$$m = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \psi},$$

но

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{a'b'}{F}$$

и

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{AC}{D}.$$

На основании равенства $AC = a'b' = ab$ можем написать:

$$m = \frac{ab}{F} : \frac{ab}{D} = \frac{D}{F}. \quad (1)$$

В работе № 25 указан объективный метод определения фокусного расстояния F , не зависящий от оптической силы глаза. Зная F , можно вычислить увеличение лупы m для нормального глаза.

В этой же задаче применены другие методы определения фокусного расстояния и увеличения лупы, зависящие от свойств глаза. Эти методы называются субъективными методами.

Упражнение 1. Определение фокусного расстояния и увеличения лупы по методу параллакса.

Для того чтобы определить F из основной формулы линзы $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$, надо знать величины d и f . Если d меньше F , то для определения величины f , т. е. расстояния мнимого изображения от линзы, применяем способ параллакса. Для этого на оптической скамье устанавливаем лупу и предмет — иглу в вертикальном положении так, чтобы, приблизив глаз насколько возможно ближе к лупе, можно было отчетливо видеть ее мнимое изображение. Отодвинув немного глаз, рассматриваем поверх линзы одновременно с мнимым изображением иглы тонкую, вертикально натянутую проволоку, которую перемещаем по скамье, приближая и удаляя от иглы. Проволока должна быть строго параллельна игле. Перемещая проволоку, добиваемся полного совпадения проволоки и мнимого изображения иглы. Признаком та-

кого совпадения будет служить то, что при перемещении глаза наблюдателя вправо или влево верхняя часть проволоки и мнимое изображение иглы не будут смещаться относительно друг друга. После установки отчитываются на шкале расстояние иглы от центра линзы d и расстояние проволоки, равное f , затем вычисляется фокусное расстояние F по формуле линзы. Этот опыт повторяют пять раз, и результаты заносят в табл. 1.

При вычислении F следует величину f считать отрицательной, так как изображение мнимое. Поэтому основная формула линзы будет:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}. \quad (2)$$

Упражнение 2. Определение увеличения лупы по длине изображения и предмета.

На оптической скамье устанавливают линзу и вертикальную миллиметровую шкалу. Приблизив, насколько возможно, глаз к лупе, рассматривают мнимое изображение шкалы, а другим глазом, мимо лупы, рассматривают такую же точно шкалу, поставленную на расстоянии наилучшего видения от линзы. Деления первой шкалы будут казаться значительно больше делений второй шкалы. Отметим, какое число n_1 делений первой шкалы покрывается числом n_2 делений второй шкалы, видимой невооруженным глазом. Очевидно, что увеличение лупы m будет равно $\frac{n_2}{n_1} = \frac{\text{tg } \varphi}{\text{tg } \psi}$.

Опыт повторяют пять раз попеременно одним и другим глазом, причем желательно, чтобы число n_1 , а соответственно и n_2 имели различные значения.

Точно так же обследуется вторая лупа.

Результаты заносят в табл. 2 и сравнивают с результатами табл. 1.

Упражнение 3. Построение сложного микроскопа.

Сложный микроскоп имеет две линзы — объектив и окуляр (рис. 56). Установим на оптической скамье более короткофокусную линзу — объектив, а на расстоянии, немного большем чем ее фокусное расстояние F_1 , поместим подвижную миллиметровую шкалу. Так как фокусное расстояние F_1 известно из упражнения 1, а рас-

стояние шкалы от линзы d_1 определяется по делениям скамьи, то можем вычислить положение изображения f_1 , даваемого линзой-объективом.

Устанавливаем на скамье окуляр так, чтобы изображение предмета помещалось между ним и его главным фокусом F_2 . Приблизив глаз к окуляру и немного перемещая эту линзу по скамье, добиваемся отчетливого изображения предмета.

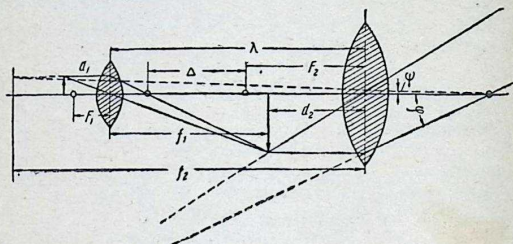


Рис. 56. Ход лучей в микроскопе.

Для определения увеличения микроскопа применяем тот же метод, что и для лупы. Второй миллиметровый масштаб на отдельной подставке устанавливаем на расстоянии 25 см от глаза и одновременно отсчитываем, сколько делений первого масштаба N_1 соответствует числу делений N_2 второго масштаба. Увеличение микроскопа M будет равно

$$M = \frac{N_2}{N_1} = \frac{\text{tg } \varphi}{\text{tg } \varphi'}.$$

Опыт повторяют три раза, причем d_1 от предмета до объектива должно оставаться постоянным.

Найденное увеличение микроскопа M , очевидно, будет соответствовать только взятому нами расстоянию предмета от объектива d_1 , зависящему от него расстоянию изображения f_1 и расстоянию от изображения до окуляра d_2 . Последнее расстояние — величина постоянная, так как окуляр устанавливается по отношению к действительному изображению так, чтобы мнимое изображение было на расстоянии наилучшего видения. Что же касается расстояний d_1 и f_1 , то они могут меняться.

Действительно, если увеличить расстояние d_1 , отодвинув немного предмет от линзы, то уменьшится расстояние f_1 и уменьшится величина действительного изображения предмета. Для того чтобы получить мнимое изображение предмета, придется сдвинуть и линзу окуляра, а тем самым уменьшить расстояние между линзами λ .

Фабрики, выпускающие микроскопы, дают в прилагаемых к микроскопам паспортах увеличение для вполне определенного расстояния λ между линзами. Это расстояние обусловлено применяемыми ахроматическими линзами, которые дают наилучший эффект на расстоянии λ .

Чтобы убедиться в том, что увеличение микроскопа зависит от расстояния между предметом и объективом, повторяют упражнение 3 в несколько измененных условиях.

Миллиметровую шкалу, служащую „предметом“, отодвигают немного от объектива и затем устанавливают окуляр так, чтобы получилось мнимое изображение предмета, после чего определяют увеличение M_1 и сравнивают полученные результаты с ранее определенным увеличением M . Результаты заносят в табл. 3.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 27. Определение увеличения лупы и построение микроскопа

Таблица 1

Определение увеличения лупы по методу параллакса

№ опыта	Лупа №...			Увеличение $m_1 = \frac{25}{F_1}$
	d_1	f_1	F_1	
1				
2				
3				
4				
5				

Среднее $m_1 =$

Таблица 2

Определение увеличения лупы по длине предмета и изображения

№ опыта	Лупа №...			
	n_1	n_2	$m_2 = \frac{n_2}{n_1}$	F_2
1				
2				
3				
4				
5				

Среднее $m_2 =$

Увеличение системы двух линз, образующих микроскоп

№ опыта	d_1	N_1	N_2	$M = \frac{N_2}{N_1}$	M_1
1					—
2					—
3		Среднее $M =$			—
4				—	
5				—	
6				—	
				Среднее $M_1 =$	

Работа № 28. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ МАЛЫХ ОБЪЕКТОВ И ЧИСЛОВОЙ АПЕРТУРЫ МИКРОСКОПА

Приборы: 1) микроскоп, 2) окулярный микрометр, 3) объективный микрометр, 4) препараты.

Как окулярный, так и объективный микрометры представляют собой короткую, нанесенную на стеклянной пластинке шкалу с делениями по 0,1 мм. Окулярный микрометр обыкновенно заключен в оправу и вставлен в тубус окуляра. Шкала окулярного микрометра должна находиться в одной плоскости с изображением, даваемым объективом микроскопа, т. е. на расстоянии d_2 от окуляра (рис. 56). В этом положении при рассматривании изображения в окуляр шкала и изображение будут совмещены.

Прежде всего устанавливают по глазам окулярный микрометр. Окуляр микроскопа, обычно сложный, состоит из двух линз, между которыми помещается микрометр. Вдвигая или выдвигая глазную линзу окуляра, добиваются того, что шкала микрометра становится отчетливо видимой. Затем убеждаются, что плоскость изображения предмета действительно совпадает с плоскостью окулярного микрометра, для чего рассматривают в микроскоп какой-нибудь предмет — лучше всего шкалу объективного микрометра, который кладут на столик микроскопа делениями вверх. Затем, перемещая при помощи

кремальеры микроскоп, устанавливают его так, чтобы изображение совпало с изображением окулярной шкалы.

После того как шкалы объективного и окулярного микрометров будут видны в поле зрения, следует немного сместить глаз вправо или влево. Если при этом изображения шкал не сместятся относительно друг друга, то окулярный микрометр лежит в плоскости изображения. Если же будет наблюдаться параллактическое смещение шкал, то надо кремальерой или перемещением передней линзы окуляра изображения совместить. После того как окулярный микрометр установлен, приступают к опыту.

Упражнение 1¹. Определение увеличения объектива.

Вращая окуляр и перемещая объективный микрометр по столику микроскопа, устанавливают обе шкалы параллельно. Находят совпадающие на обеих шкалах штрихи делений, между которыми укладывается целое число делений шкалы объектива $N_{об}$ и целое число $N_{ок}$ делений окуляра. Тогда одному делению объективной шкалы будет соответствовать $\frac{N_{ок}}{N_{об}}$ (например, 20) делений окулярной шкалы. Это значит, что деление объективной шкалы кажется увеличенным в $\frac{N_{ок}}{N_{об}} = 20$ раз по сравнению со шкалой окулярного микрометра.

Таким образом, увеличение выразится величиной

$$M = \frac{N_{ок}}{N_{об}}.$$

Этот опыт повторяется для всех объективов, приложенных к микроскопу, и для каждого из них определяется M . Результаты заносят в табл. 1

Примечания. 1. Вместо объективного микрометра можно применить счетную камеру для крови. Эта камера имеет сетку, разбивающую поле зрения на квадраты (рис. 57). Линии, образующие сетку, проведены через 0,05 мм. Некоторые промежутки между линиями разделены пополам новыми линиями. Эти дополнительные линии принимать в расчет не следует, а надо ориентироваться только на квадра-

¹ Прежде чем приступать к работе, следует вычертить ход лучей в микроскопе с окуляром Гюйгенса.

тики. Измерения производятся так же, как с объективным микрометром, но так как деления счетной камеры вдвое мельче делений окулярной шкалы (0,05:0,1), то увеличение объектива будет

$$M = \frac{N_{\text{ок}}}{\frac{1}{2} N_{\text{об}}} = 2 \frac{N_{\text{ок}}}{N_{\text{об}}}.$$

2. Увеличение объектива обычно обозначается на его оправе числом, за которым стоит знак \times . Это

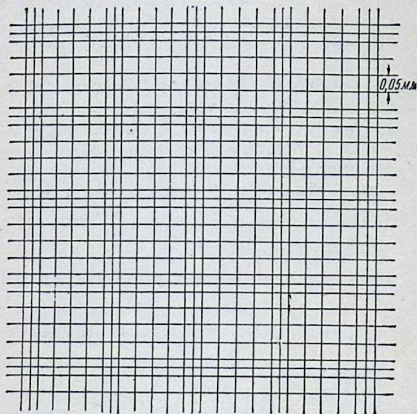


Рис. 57. Сетка счетной камеры.

число, однако, не совпадает с найденным нами увеличением объектива — оно будет больше. Несовпадение величин объясняется тем, что в окуляре Гюйгенса так называемая полевая линза, обращенная к объективу, несколько уменьшает изображение от объектива, которое мы измеряли окулярным микрометром.

Пусть изображение объекта, рассматриваемого в микроскоп, имеет длину, равную N делениям окулярного микрометра. Если бы со шкалой совпадал сам пред-

мет, то его длина была бы равна $N \cdot 0,1$ мм, так как деление шкалы равно 0,1 мм. Но со шкалой совпадает не сам предмет, а его изображение, которое увеличено в M раз. Поэтому истинная длина предмета l будет в M раз меньше длины изображения.

Отсюда

$$l = 0,1 \cdot \frac{N}{M} \text{ мм.}$$

Выражение $\frac{0,1}{M} = b$ называют ценой деления окулярного микрометра.

Упражнение 2. Определение размеров малых объектов.

Пользуясь последним выражением, определяют размеры приложенных к работе микроскопических препаратов. Для этого снимают со столика микроскопа объективный микрометр и на его место ставят препарат. Совмещают изображение предмета с изображением окулярной шкалы и определяют величину N . Результаты заносят в табл. 2.

Упражнение 3. Определение числовой апертуры микроскопа.

Пользуясь микроскопом, стремятся сделать видимыми мельчайшие подробности исследуемого объекта. Однако если даваемое объективом изображение не передает некоторых характерных для предмета подробностей его структуры, то, очевидно, эти подробности не могут появиться в изображении и после увеличения его окуляром. Поэтому важно знать предел возможности объектива давать изображения тончайших структурных подробностей объекта, или так называемую разрешающую способность.

Из теории микроскопа известно, что наименьшая рассматриваемая в микроскоп величина равна

$$d = \frac{\lambda}{\mu \sin u},$$

где d и выражает разрешающую способность. Она зависит от длины волны применяемого света и от величины $\mu \sin u$, которая носит название числовой апертуры A . Очевидно, чем больше числовая апертура, тем меньше детали можно рассматривать в микроскоп.

Рассмотрим точку O объекта, лежащую на главной оптической оси микроскопа (рис. 58). Проведем из этой

точки два луча к концам диаметра передней линзы объектива. Угол, образованный этими лучами, называется отверстием углом объектива, а половина его, т. е.

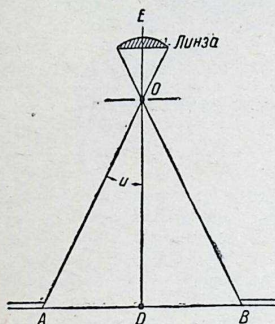


Рис. 58. Апертура микроскопа.

угол между оптической осью микроскопа и одним из крайних лучей, падающих на фронтальную линзу объектива, и есть угол u .

Вторая входящая в формулу апертуры величина μ есть показатель преломления среды, заполняющей пространство между объектом и объективом.

Для воздуха $\mu = 1$, для воды — 1,33, для кедрового масла — 1,51.

Зная числовую апертуру, можем заранее определить предел рассматриваемой в микроскоп величины. Пусть, например, числовая апертура объектива равна 0,65. Для белого света, длина волны которого равна в среднем $\lambda = 0,55 \mu$, разрешающая способность будет равна

$$d = \frac{0,55}{0,65} = 0,85 \mu.$$

Это значит, что если объектив будет применен для исследования структуры, которая состоит из тонких линий, удаленных друг от друга на расстояние меньше $0,85 \mu$, то в полученном изображении нельзя будет различить отдельных линий, следовательно, структура не будет раскрыта. При таких обстоятельствах даже сочетание сильного окуляра с этим объективом будет бесполезно; надо применить другой объектив с большей апертурой, например, равной 1,25; наименьшие видимые детали будут иметь тогда размер:

$$d = \frac{0,55}{1,25} = 0,44 \mu.$$

Для определения апертуры при величине $\mu = 1$ применяют следующий прием.

На столике микроскопа укрепляют тонкую металлическую пластинку с маленьким отверстием O и устанавливают ясную видимость краев отверстия. Затем отклоняют в сторону осветительное зеркало микроскопа и под объективом на расстоянии 8—10 см от него помещают шкалу со скользящими по ней белыми указателями. Вынимают окуляр и рассматривают в микроскоп действительное, обратное и уменьшенное изображение этой шкалы. Так как изображение уменьшенное, то непосредственный отсчет делений шкалы затруднителен, поэтому пользуются передвижными указателями. Сместив глаз влево, передвигают правый передвижной указатель так, чтобы он стоял как раз на границе поля зрения микроскопа в точке A . Затем сместив глаз вправо, устанавливают левый указатель в точке B , тоже на границе поля зрения. Как видно из рисунка, крайние входящие в объектив микроскопа лучи будут определены точками A и B , так как они дадут изображение ab . Теперь легко определить числовую апертуру. Угол u будет равен, очевидно, углу AOD — половине угла AOB . Синус этого угла равен $\frac{AD}{OA}$.

Расстояние OA определяют миллиметровым масштабом, AB отсчитывают по шкале.

Производят 3—5 таких определений и среднее принимают за искомое значение числовой апертуры A .

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 28. Определение размеров малых объектов

Таблица 1

Определение увеличения объектива

№ отчета	объектив № ...	Число делений шкалы		Увеличение $M = \frac{N_1}{N_2}$	Цена делений окулярного микрометра $b = \frac{0,1}{M}$
		окулярного микрометра N_1	объект. микрометра N_2		
1					
2					
3					

Таблица 2

Определение размеров малых объектов
 Препарат

№ опыта	Число делений N	Увеличение M	Размер в мм $l = N \frac{0,1}{M}$
1			
2			
3			

Среднее $l =$

Такая же форма и для других препаратов.

Таблица 3

Определение числовой апертуры микроскопа

№ измерений	Левый указатель	Правый указатель	AD	OA	Апертура $A = \mu \sin u$	
1						Среднее значение $A = \pm$
2						
3						

Работа № 29. ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРОСКОПА ПРЯМОГО ЗРЕНИЯ

Приборы: 1) спектроскоп прямого зрения и штатив к нему или держатель, 2) газовая горелка, 3) маленький индуктор с источником тока, реостатом и ключом, 4) спектральные трубки и держатель к ним, 5) электрический осветитель для шкалы спектроскопа, 6) пробирки с растворами солей Na, K, Ca, Ba, Sr; к каждой пробирке имеется проволока с прикрепленным к ней асбестовым фитилем, 7) набор цветных стекол и окрашенных растворов.

Всякая прозрачная призма разлагает белый луч на составные цвета, т. е. дает спектр, причем все лучи отклоняются к основанию призмы. Красный луч откло-

няется от направления белого луча меньше всего, фиолетовый — больше всего. Можно, однако, приготовить такую комбинируемую призму, которая будет разлагать белый свет, но не будет отклонять желтого (сред-



Рис. 59. Ход лучей в спектроскопе прямого зрения.

него) луча от направления падающих белых лучей. Поэтому эта призма и носит название призмы прямого зрения (рис. 59).

Спектроскоп, в который вставляется такая призма, называется спектроскопом прямого зрения. Он состоит из двух трубок: трубки коллиматора со

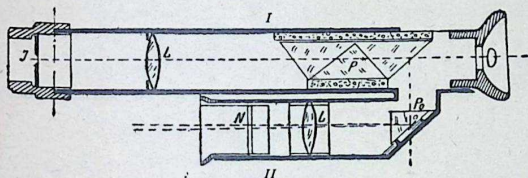


Рис. 60. Общий вид спектроскопа прямого зрения.

щелью I и трубки со шкалой II, соединенных вместе (рис. 60).

Длинная трубка I имеет щель I, установленную в главном фокусном расстоянии линзы L, линзу L и призму прямого зрения P. Призма P, комбинируемая из трех призм разного стекла, дает спектр достаточной ширины, видимый в окуляр O. Ширина щели регулируется кольцом на конце коллиматора.

В короткой трубке II помещается шкала N, сделанная на стекле. Эта шкала освещается маленькой не показанной на рисунке лампочкой, питаемой от трансфор-

матора. С помощью призмы полного внутреннего отражения P_0 и линзы L можно получить изображение шкалы, наложенное на изображение спектра.

Впереди и сбоку от щели укреплено зеркальце, которое может вращаться. Около самой щели имеется еще призмочка полного внутреннего отражения, которая может закрывать нижнюю половину щели I . С помощью зеркальца и призмочки можно одновременно с лучом, проходящим непосредственно через верхнюю половину щели, осветить нижнюю половину щели другим источником света. Эти лучи, отразившись от зеркала и призмы, дадут в поле зрения второй спектр. Таким путем можно одновременно рассматривать и сравнивать два спектра, расположенных один над другим.

Твердые и жидкие раскаленные тела дают сплошной непрерывный спектр, в котором красный цвет переходит незаметно в оранжевый, оранжевый в желтый и т. д.

Раскаленные пары и газы дают линейный спектр испускания, состоящий из ряда цветных узких полосок, между которыми расположены темные промежутки. Каждый химический элемент имеет свой характерный спектр испускания, отличающийся цветом линий, т. е. длиной их волны, числом, расположением и яркостью отдельных линий. Например, для спектра натрия характерной будет двойная желтая линия с длиной волны $589 \text{ м}\mu$, для стронция — красная линия и т. д. На изучении линейных спектров и основан спектральный анализ, т. е. определение тех или иных химических веществ по их спектру.

Строение спектров объясняется свойствами излучающих атомов и теперь оно детально изучено, после того как появилась теория квант Планка и основанная на ней теория атома Бора.

Белые лучи, проходя через окрашенные среды, в различной степени поглощаются. Поэтому такие среды в проходящем белом свете представляются окрашенными. Их цвет определяется совокупностью лучей, прошедших через тело. Спектр белых лучей, частично поглощенных цветной средой, называется спектром поглощения. Обычно в спектре поглощения получается одна или несколько темных полос, по положению которых можно судить о том, какие лучи поглощает дан-

ное тело. В спектрах поглощения некоторых растворов появляются довольно резко выраженные характерные полосы поглощения, по положению которых можно определить химический состав растворенного вещества.

Упражнение 1. Градуировка спектроскопа.

Шкала спектроскопа позволяет определить только относительное положение спектральных линий и их взаимное расстояние, но не длину волн соответствующих линий. Поэтому, прежде чем приступить к изучению спектров, следует проградуировать спектроскоп на длины волн. Спектры светящихся газов теперь хорошо известны, важнейшие данные помещены в таблице на стр. 180. Пользуясь этими данными, можно построить кривую дисперсии спектроскопа, т. е. кривую, по которой можно определить длину волны спектральной линии, если известно ее положение на шкале спектроскопа.

Спектроскоп укрепляется на штативе или на специальной подставке так, чтобы удобно было в него смотреть и делать наблюдения. В качестве источников света употребляются наполненные газом трубки, светящиеся под влиянием электрических разрядов. Для зажигания их употребляется индукторная катушка. При этом вводы, находящиеся на концах трубки, присоединяются к выводным клеммам вторичной обмотки индукторной катушки.

Необходимо установить спектральную трубку так, чтобы ее узкая часть приходилась как раз перед щелью спектроскопа. После этого можно замкнуть ключ, и трубка начнет светиться характерным светом, зависящим от наполняющего трубку газа.

Регулируют щель спектроскопа так, чтобы линии, видимые в спектре, были узкими, но достаточно ясно видимыми. Для установки прибора по глазам перемещают щель, вдвигая и выдвигая коллиматор до тех пор, пока линии не будут резко очерчены. Если изображение шкалы при этом получается размытым, то, не трогая окуляра, вдвигают и выдвигают трубку II так, чтобы шкала стала ясно видна. Зеркальце и призма при этих наблюдениях не нужны, поэтому призма отодвигается в сторону.

Первым рассмотрим спектр водорода. Для него отметим положение красной и синей линий на шкале.

Затем рассмотрим трубки с He и Ne и тоже отметим положение главнейших спектральных линий. Результаты наблюдений занесем во вторую и третью графы табл. 1. Для заполнения третьей графы воспользуемся данными, приведенными в табл. VIII и IX на стр. 180. Теперь можно построить кривую дисперсии спектроскопа.

Для этого на миллиметровой (или клетчатой) бумаге проводят оси координат и откладывают на оси абсцисс деления шкалы спектроскопа, а по оси ординат — длины волн в миллимикронах. Соединив плавной кривой полученные таким образом точки, находят кривую дисперсии или кривую градуировки спектроскопа. Пользуясь этой кривой, можно определить длину волны любой спектральной линии, если известно положение ее на шкале спектроскопа. Для этого отмечают деление шкалы, на котором лежит линия, и из точки на оси абсцисс, соответствующей этому делению, восстанавливают перпендикуляр до пересечения с кривой. Длина этого перпендикуляра и определит длину волны соответствующей линии.

Упражнение 2. Изучение спектра раскаленных паров металлов.

Перед щелью спектроскопа, на расстоянии 3—5 см от нее, зажигается газовая горелка. Затем, намочив асбестовый фитиль в растворе NaCl, вносят его в пламя горелки, которое приобретает яркожелтую окраску. В спектроскопе на фоне слабого спектра горелки ясно выступает желтая линия натрия. Отмечают на шкале положение этой желтой линии и заносят в табл. 2. Затем исследуют растворы солей K, Ba, Sr и Ca и записывают положение наиболее характерных линий. Эти линии принадлежат спектру металлов, входящих в состав исследуемых солей, так как металлоиды в условиях описанных опытов не дают заметного спектра.

Надо заметить, что для каждой соли следует употреблять свой особый фитиль. Вносить фитиль в пламя следует осторожно, чтобы не загрязнить горелки, иначе в спектре могут появиться линии того элемента, которым загрязнена горелка.

После того как спектры перечисленных выше металлов изучены, определяют длины волн их спектральных линий с помощью кривой дисперсии. В качестве конт-

рольной задачи к этому упражнению следует определить спектроскопически металлы, входящие в раствор каких-нибудь двух солей. Контрольную задачу, а также необходимый для работы чистый фитиль следует получить у руководителя. Газовую горелку необходимо проверить и, если нужно, вычистить, чтобы в ее пламени не было заметно каких-либо спектральных линий. Результаты работы заносятся в табл. 2.

Упражнение 3. Изучение спектров поглощения.

Для изучения спектров поглощения в качестве источника света берут электрическую лампу накаливания. В спектроскопе виден сплошной спектр. С помощью рычажка поднимают призму полного внутреннего отражения так, что теперь видна только нижняя часть спектра. Устанавливают боковое зеркало так, чтобы часть лучей лампы, отраженная от зеркальца, попала через призму на нижнюю половину щели спектроскопа. Укрепляют перед щелью последовательно трубочки с растворами красящих веществ. Теперь будут видны два спектра: вверху — спектр поглощения и внизу — спектр сравнения. Отмечают, какие части спектра полностью поглощаются теми или иными веществами и какие ослабляются. Результат наблюдений заносится в табл. 3.

Затем вместо раствора исследуются цветные стекла и результаты тоже заносятся в табл. 3.

Форма протокола следующая.

Работа № 29. Изучение спектров с помощью спектроскопа прямого зрения

Упражнение 1. Градуировка спектроскопа

Таблица 1

Название газа	Цвет линии	Положение линии на шкале	Длина волны в $m\mu$
Водород			
Гелий			
Неон			

Приложить кривую дисперсии.

Упражнение 2. Изучение спектров металлов

Таблица 2

Состав соли	Цвет наблюдаемых линий	Положение линий на шкале	Длина волны в $m\mu$	В неизвестном растворе находятся соли
Na K Ba Sr			 и
Неизвестный раствор				

Упражнение 3. Изучение спектров поглощения

Таблица 3

Название раствора или № стекла	Цвет раствора	Какие лучи поглощаются в $m\mu$	Какие лучи ослабляются в $m\mu$
		от . . . до . . .	от . . . до . . .

Работа № 30. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ СВЕТА ЛАМПОЧКИ НАКАЛИВАНИЯ

Приборы: 1) оптическая скамья с тремя ползушками, 2) фотометр Жолли, 3) эталонная лампа с измеренной силой света, 4) лампа для исследования, 5 и 6) два зачерненных изнутри чехла для ламп, 7) вольтметр, 8) реостат, 9) ключ.

Единицей силы света является международная свеча. Если этот источник света точечный, то он равномерно посылает световую энергию в окружающее пространство. За единицу светового потока принимается люмен — световая энергия, испускаемая точечным световым источником в 1 свечу внутри телесного угла в 1 стерадиан.

Если в шаре с радиусом в единицу, например, в 1 м, вырезать телесный угол с вершиной в центре шара, то такой телесный угол измеряется площадью, которую он вырезает на поверхности шара. Если эта площадь равна единице — 1 м², то телесный угол также равен единице и называется с т е р а д и а н о м.

Так как шаровая поверхность имеет 4π единиц, то источник в одну международную свечу испускает световой поток 4π люменов.

Световой поток в 1 люмен, равномерно распределенный по поверхности в 1 м², создает освещенность в 1 люкс. Следовательно, источник с силой света в 1 международную свечу, помещенный в центре шара радиусом в 1 м, создает на внутренних стенках его освещенность в 1 люкс.

Другими словами, освещенность на расстоянии 1 м от источника света в 1 свечу равна 1 люксу. Если источник света имеет *i* свечей, то излучаемая им световая энергия $I = 4\pi i$ люменов.

Освещенность, создаваемая таким источником на расстоянии *R* от него, равна

$$E = \frac{4\pi i}{4\pi R^2} = \frac{i}{R^2}. \quad (1)$$

Пусть другой источник света силой *i*₁ свечей дает освещенность *E*₁ на расстоянии *R*₁. Для него мы можем написать

$$E_1 = \frac{4\pi i_1}{4\pi R_1^2} = \frac{i_1}{R_1^2}. \quad (1')$$

Если обе освещенности *E* и *E*₁ равны, то

$$\frac{i}{R^2} = \frac{i_1}{R_1^2},$$

откуда

$$i_1 = i \frac{R_1^2}{R^2}. \quad (2)$$

Следовательно, если имеем эталонный источник света силой в *i* международных свечей и получим одинаковую освещенность какой-нибудь поверхности от этого источника и от неизвестного источника с силой *i*₁, то, измерив

расстояние от источников света R и R_1 до освещаемой поверхности, можем по формуле (2) выразить неизвестную силу света i в международных свечах.

Для сравнения освещенностей применим фотометр Жолли, который состоит из двух прямоугольных кусков парафина, помещенных в черном металлическом экране, имеющем форму четырехугольной усеченной пирамиды

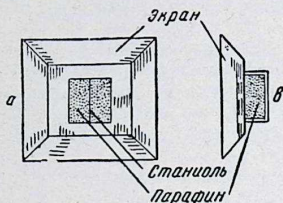


Рис. 61. Фотометр Жолли.

(рис. 61: вид спереди — a , вид сбоку — b). Оба куска парафина разъединены непрозрачной перегородкой, например, станиолем, и освещаются с боков каждый отдельным источником света (рис. 62).

Благодаря рассеянию света внутри парафина каждый кусок будет равномерно освещен.

Если освещение справа и слева одинаково, то граница между кусками исчезает. Если освещенность не одинакова, то кусок, освещенный слабее, кажется более темным.

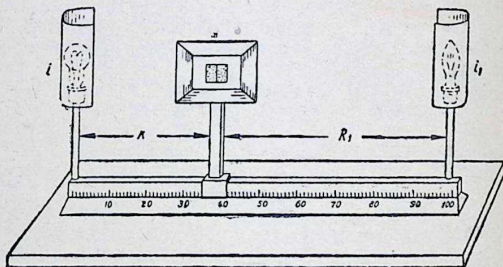


Рис. 62. Скамья с фотометром и лампами.

Опыты производятся на оптической скамье. Она представляет металлическую линейку с продольными пазами, по которым перемещаются три ползушки.

На линейке нанесена шкала, по которой можно отсчитать положение каждой ползушки.

Упражнение 1. Определение силы света лампочки накаливания.

Установив фотометр на средней ползушке скамьи между эталонной и исследуемой электрическими лампочками, передвигаем его вдоль скамьи, пока не добьемся одинаковой освещенности обоих кусков парафина (исчезновения границы раздела). Определяем по шкале скамьи расстояния R и R_1 , подставляем их значения, а также силу света известного источника в формулу (2) и вычисляем величину i_1 . Опыт следует проделать пять раз, каждый раз меняя расстояние между i и i_1 . Из всех наблюдений вычислить среднюю величину. Результаты измерений записать в табл. 1.

Упражнение 2. Определение силы света лампочки накаливания в зависимости от напряжения.

Световая отдача лампочки зависит от температуры накала нити, а температура нити зависит от силы тока, которая в свою очередь зависит от напряжения на вводах лампы. Количественный математический анализ этих соотношений очень сложен, поэтому мы его не даем. Но опытным путем зависимость между напряжением тока и силой света лампы может быть легко получена и изображена графически.

Для регулирования напряжения на клеммах лампы собираем схему по рис. 63.

Реостат R включается как потенциометр. Передвигая подвижной контакт, можно регулировать напряжение на клеммах лампы. Вначале определяют силу света при максимальном напряжении на клеммах лампы. Для этого движок реостата приводится в крайнее положение. Лампочки раздвигаются на наибольшее расстояние, допускаемое оптической скамьей, после чего измеряют описанным выше методом силу света лампы i_1 и записывают напряжение и силу света в табл. 2. Вводят реостат, понижают

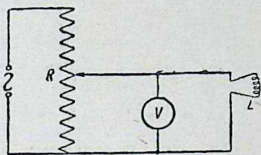


Рис. 63. Схема питания лампы.

напряжение на 10 V, после чего опять находят силу света i_1 . При этом фотометр перемещают к испытуемой лампе, оставляя расстояние между лампами постоянным. Снижая каждый раз напряжение на 10 V, продолжают измерение силы света лампы, пока это будет возможно.

Следует отметить, что сравнение силы света двух источников возможно только тогда, если свет их спектрально близок. Например, фотометром Жолли невозможно сравнивать интенсивность красной и зеленой лампочек. Поэтому при большом падении напряжения — до 40—50 V, когда свет лампочки становится красным, сравнение со стандартной лампочкой невозможно, и опыт прекращают. В конце опыта определяется напряжение, при котором исчезнет свечение нити.

Результаты измерений заносятся в табл. 2 и изображаются в виде графика. В прямоугольной системе координат по абсциссам откладываются напряжения, по ординатам — соответствующая сила света. При этом на пересечении осей координат ставят то значение напряжения, при котором прекращают измерения, а большие напряжения откладывают в условном масштабе вправо по оси абсцисс.

Построив полученные точки, соединяют их плавной кривой, проходящей через начало координат.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 30. Определение силы света лампочки накаливания

Таблица 1

Упражнение 1. Определение силы света лампочки

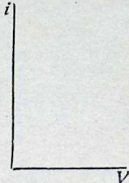
Отсчет	i	R	R_1	$i_1 = i \frac{R_1^2}{R^2}$
1 . . .				
. . .				
. . .				
. . .				
5 . . .				

Таблица 2

Упражнение 2. Изменение силы света лампочки накаливания в зависимости от напряжения

График

Отсчет	i	R	R_1	$i_1 = i \frac{R_1^2}{R^2}$	V
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					



Работа № 31. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Приборы: 1) двухтрубный спектроскоп, 2) дифракционная решетка, 3) электрическая лампочка, 4) растворы солей Na и Li, 5) ширма.

Теория дифракционного спектра дает основную формулу дифракционной решетки, которая устанавливает зависимость между длиной световой волны λ , расстоянием между соседними штрихами решетки a и углом φ отклонения лучей, образующих спектр, от нормали к решетке,

$$n\lambda = a \sin \varphi, \quad (1)$$

где n может иметь значения различных целых чисел от $n=0$ до $n = \frac{a}{\lambda}$; величина a носит также название „постоянной“ дифракционной решетки.

Решив уравнение (1) относительно λ

$$\lambda = \frac{a \sin \varphi}{n}, \quad (2)$$

можно определить длину световой волны различных спектральных линий, если известен порядковый номер спектра n и величины a и φ .

Определение постоянной a решетки, т. е. расстояния между двумя соседними штрихами, производится при помощи микроскопа с окулярным микрометром по методу, изложенному в работе № 28. Такой микроскоп выставлен в лаборатории и к нему дана цена окулярного деления в миллиметрах.

Определить величину отдельного интервала трудно, поэтому определяют длину l сразу нескольких промежутков между штрихами и сосчитывают число промежутков m . Делением длины l на число m получают

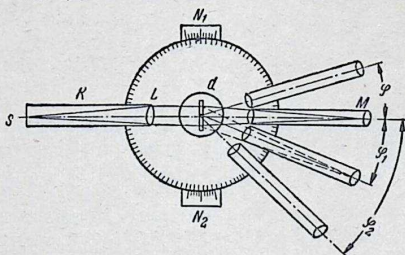


Рис. 64. Двухтрубный спектрометр.

расстояние между двумя штрихами. Для большей точности определения a не ограничиваются однократным его измерением, а повторяют 2—3 раза и берут среднее из полученных величин.

Для определения величины φ применяют двухтрубный спектроскоп (спектрометр), изображенный на рис. 64. Он состоит из круглого столика с градусными делениями, на котором размещены коллиматорная трубка K и зрительная M . Оси труб постоянно направлены к центру столика. Угол смещения трубы отсчитывается по нониусам N_1 и N_2 . Лучи от щели S падают на линзу L и выходят из нее параллельным пучком. Пройдя дифракционную решетку, они образуют ряд расходящихся пучков параллельных лучей. Каждый из этих пучков может быть собран в зрительной трубе, для чего ось трубы должна совпадать с направлением пучка, что достигается вращением зрительной трубы

вокруг вертикальной оси, совпадающей с центром столика и плоскостью дифракционной решетки. Угол отклонения трубы от нормали к решетке может быть определен по делениям. Это и есть угол φ , который необходим для определения длины волны λ .

Порядок работы. Прежде всего, вынув из своего гнезда зрительную трубу, добиваются резкого изображения натянутой в окуляре нити. Для этого слегка перемещают переднюю линзу окуляра. Затем зрительная труба спектроскопа устанавливается на бесконечность, как это указано в работе № 25, и ставится обратно на свое место в спектроскоп.

Перед щелью S ставится электрическая лампочка с матовой колбой или закрытая бумагой. Для того чтобы лишний свет не мешал наблюдениям, между щелью и лампочкой ставится асбестированная ширма с отверстием для щели спектроскопа.

Зрительная труба устанавливается так, чтобы в поле зрения ясно была видна щель S и чтобы изображение щели совпало с натянутой в окуляре нитью. Если края щели размыты, это значит, что она не в фокусе линзы L и, перемещая щель, получают ясное ее изображение. Щель должна быть расположена вертикально, соответственно расположена и нить в окуляре; ширину щели не следует брать слишком большой. Чем уже щель, тем точнее определяется положение нити, которая должна быть расположена вдоль изображения щели по середине. Затем удаляют лампу и на ее место ставят горелку, в пламя которой вносят фитиль, смоченный раствором соли NaCl .

Будем измерять длину световой волны желтой линии натрия. На столик спектроскопа ставят дифракционную решетку d . Подставка решетки имеет штифт, а в столике спектроскопа — отверстие для него, совпадающее с осью вращения зрительной трубы. Если теперь изображение в зрительной трубе смещено, то это произошло потому, что плоскость решетки не вполне перпендикулярна потоку лучей. Легким вращением решетки, не трогая зрительной трубы, совмещают изображение щели с нитью и закрепляют решетку.

Здесь мы рассматриваем так называемый нулевой спектр. Затем смещают трубу немного вправо или влево,

находят новое изображение щели и устанавливают трубу так, чтобы нить совпала с новым изображением. Это будет изображение первого порядка, соответствующее значению $n=1$ в формуле (2). Определяют положение трубы, затем передвигают ее еще на некоторый угол, находят изображение 2-го порядка, затем 3-го и т. д., определяя для каждого из них положение трубы φ на угломерном приборе.

Исследовав все возможные изображения справа от нулевого, исследуют такие же изображения слева, записывая каждый раз угол отклонения зрительной трубы. При этом каждый отсчет соответствует определенному значению n формулы (2).

Так как угол φ должен быть одинаков при отклонении трубы как вправо, так и влево от нулевого положения, то величину угла φ вычисляют как среднее из правого и соответствующего левого положения трубы, т. е.

$$\varphi_n = \frac{\varphi_{n \text{ прав}} + \varphi_{n \text{ лев}}}{2}.$$

Результаты работы заносятся в табл. 2.

После определения длины волны желтой линии натрия определяют таким же способом длину волны красной линии лития.

Определение длины световой волны без спектрометра

Дифракционная решетка P устанавливается на неподвижном столике. За решеткой на расстоянии $L=3-5$ м от нее располагают шкалу с сантиметровыми и дециметровыми делениями (рис. 65). Нуль шкалы на ее середине и деления возрастают направо и налево. Шкала располагается параллельно плоскости решетки на одной высоте с ней. В нулевой точке шкалы устанавливается газовая горелка с натровым пламенем. Пламя прикрыто непрозрачным цилиндром со щелью $Ш$. Лучи от щели, проходя дифракционную решетку, отклоняются на углы φ_1, φ_2 и т. д. Поэтому глаз, помещенный за дифракционной решеткой, будет видеть мнимые изображения пламени в точках O_1, O_2, \dots и т. д. Это будут лучи, соответствующие спектрам 1-го, 2-го... порядка.

Угол отклонения лучей легко определить, так как

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{l_1}{L}; \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{l_2}{L}.$$

Расстояния $l_1, l_2 \dots$ отсчитываются по шкале, а L измеряется при установке шкалы. По найденным тангенсам углов определяют синусы их по таблице X стр. 181.

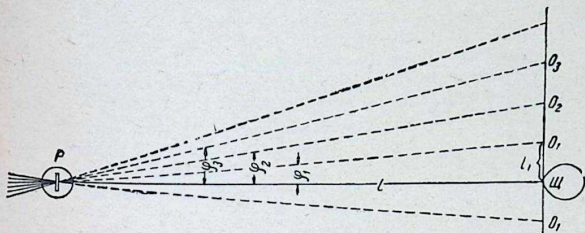


Рис. 65. Определение λ без спектрометра.

Вставив величины $\sin \varphi_1, \sin \varphi_2$ в формулу (2), находят соответствующие значения длины световой волны желтой линии натрия. Результаты вносят в табл. 3.

После измерения углов отклонения на правой стороне шкалы переходят к измерениям на левой. Отметить, при каких углах получаются более точные результаты—при малых или больших, и объяснить.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 31. Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки

Таблица 1

Цена деления окулярного микрометра	= мм
... делений решетки соответствуют . . . делениям микрометра	$a =$
... " " " " " "	$a =$
... " " " " " "	$a =$
	Среднее $a =$

Таблица 2

№ спектра вправо	Угол φ	№ спектра влево	Угол φ	Среднее $\varphi = \frac{\varphi_{\text{прав}} + \varphi_{\text{лев}}}{2}$	$\lambda = \frac{a \cdot \sin \varphi}{n}$
0					
1					
2					
и т. д.					

Таблица 3

Длина $L = \dots$

№ спектра	Отсчеты вправо			Отсчеты влево			Среднее $\sin \varphi$	λ
	l	$\text{tg } \varphi$	$\sin \varphi$	l	$\text{tg } \varphi$	$\sin \varphi$		

Работа № 32. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ САХАРИМЕТРОМ ПРОЦЕНТНОГО СОДЕРЖАНИЯ САХАРА В РАСТВОРЕ

Приборы: 1) поляриметр, 2) бикварц, 3) матовая лампочка, 4) горелка с натриевым пламенем, 5) исследуемые растворы сахара, 6) ширма с диафрагмой.

Удельным вращением α твердых тел (кристаллов) называют угол вращения плоскости колебаний поляризованного луча, отнесенный к единице пути луча в теле.

Для жидкостей и растворов угол вращения плоскости поляризации пропорционален концентрации раствора K и длине l — пути луча в растворе. Можно записать, что угол вращения $L \sim Kl$. Вводя коэффициент пропорциональности α , который зависит от оптических свойств растворенного вещества, получим:

$$L = \alpha Kl,$$

откуда

$$\alpha = \frac{L}{Kl}. \quad (1)$$

Из этой формулы видно, что удельное вращение раствора α численно равно углу, на который поворачивается плоскость колебаний луча, если луч проходит в растворе путь, равный единице, и концентрация раствора также равна единице. Обычно концентрация K выражается количеством граммов растворенного вещества в 1 см³ раствора, а длина l — в дециметрах.

Если известны величины α , L и l в уравнении (1), то можно определить концентрацию раствора.

Угол вращения зависит еще от спектрального состава света и обычно возрастает с увеличением показателя преломления, благодаря чему образуется дисперсия при вращении. Поэтому для одного и того же раствора α различно для лучей разной длины волны.

Большое практическое значение имеет исследование растворов сахара, обладающего свойством вращать плоскость поляризации. Такие исследования часто применяются в клинической и лабораторной практике.

Удельное вращение растворенного в воде тростникового сахара, почти не зависящее от температуры, для натриевого света равно

$$\alpha_D = 66,5,$$

т. е. плоскость колебаний желтого луча натриевого света при прохождении 1 дм раствора, содержащего 1 г сахара на 1 см³, вращается на 66,5°. Если концентрацию выразить в процентах или в граммах на 100 см³ раствора, то удельное вращение

$$\alpha_D = \frac{66,5}{100} = 0,665.$$

Если концентрация раствора K ‰ и путь луча в растворе l дм, то угол вращения $L_D = 0,665 Kl$, откуда концентрация сахара:

$$K = \frac{L_D}{0,665 \cdot l} = 1,504 \frac{L_D}{l} \text{ г в } 100 \text{ см}^3 \text{ раствора.} \quad (2)$$

Для белого света принимают в среднем $\alpha = 0,71$:

$$L = 0,71 Kl,$$

откуда

$$K = 1,41 \frac{L}{l}. \quad (2')$$

Простейшим прибором для определения вращения плоскости поляризации является поляриметр с вращающимся николем и бикварцем Солейля (рис. 66). Прибор состоит из неподвижного поляризатора P и анализатора — окулярного николя A . Николь A может вращаться вместе с оправой вокруг горизонтальной оси. Его оправа соединена с диском D , имеющим на своей окружности угловой нониус. Другой неподвижный диск K раз-

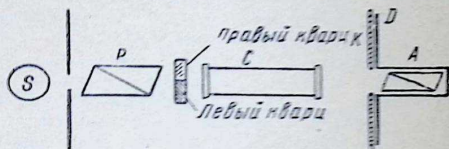


Рис. 66. Схема сахариметра.

делен по окружности на градусы, поэтому угол поворота диска D (т. е. анализатора) относительно диска K может быть определен весьма точно. Николь P , анализатор A и диск D устанавливаются при изготовлении прибора так, чтобы при параллельных николях нули нониуса и шкалы совпали. Перед поляризатором или непосредственно за ним вставляется двойная кварцевая пластинка — бикварц. Она состоит из двух вырезанных перпендикулярно к оси кварцевых пластинок толщиной около 3,75 мм, из которых одна вращает плоскость поляризации вправо, другая — симметрично влево на столько же градусов. Обе пластинки склеены так, как показано на рисунке (вид сверху). Бикварц устанавливается строго перпендикулярно к оси прибора. Если смотреть в анализатор, то обе пластинки при параллельных николях и белом свете дают так называемую чувствитель-

ную фиолетовую окраску. При малейшем изменении симметрии одна пластинка окрашивает поле в голубой цвет, другая — в красный. Бикварц является очень чувствительным индикатором вращения плоскости поляризации.

Позади прибора ставят перед черной ширмой лампочку S или натриевое пламя, в зависимости от условий задачи. Вставляют между николевыми призмами чистую заполненную водой трубку C и, вращая окулярный николь, устанавливают равномерную окраску обеих половинок поля на чувствительный оттенок. Затем вставляют трубку C , наполненную раствором сахара. При этом симметрия вращения, вызванная бикварцем, нарушится, и поле зрения станет неравномерно окрашенным. Для восстановления прежнего чувствительного оттенка следует повернуть анализатор на некоторый угол. Число градусов, на которое следует повернуть анализатор, и есть угол вращения плоскости поляризации L .

В тех случаях, когда дисперсия вращения значительна, установка на чувствительный оттенок не удастся. Тогда применяют вместо лампочки монохроматический свет натриевого пламени. При монохроматическом свете бикварц не дает чувствительного окрашивания. Оба поля будут одинаково окрашены в желтый цвет, если николи параллельны. Если же один из николей вращать, то равномерность окраски полей нарушится: одно поле начнет темнеть, другое светлеть.

Порядок работы. Устанавливается чувствительный оттенок при трубке с водой и отмечается положение нуля нониуса диска D на шкале диска K .

Затем трубка заполняется растворами сахара различной концентрации, начиная с более слабого, и для каждого раствора определяется угол вращения L при желтом и белом свете отдельно. Эти предварительные опыты дают знакомство с прибором. Затем исследуют неизвестные растворы и определяют концентрацию сахара, пользуясь формулами (2) или (2'), в зависимости от условий опыта. Результаты заносятся в табл. 1.

Форма протокола опыта следующая.

Работа № 32. Определение поляризационным сахариметром процентного содержания сахара в растворе

Таблица 1

Жидкость	Длина трубки в дм l	Угол вращения L		Содержание сахара	
		в натриевом свете	в белом свете	$K = 1,504 \frac{L}{l}$	$K = 1,41 \frac{L}{l}$
Вода					
Сахар... ⁰ / ₀					
Сахар... ⁰ / ₀					
Сахар					
1-е иссл.					
2-е "					

Работа № 33. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕМЕНТА

Приборы: 1) купроксный фотоэлемент, 2) зеркальный гальванометр, 3) лампочка накаливания 25 W, 4) оптическая скамья с установкой для вращения лампочки накаливания, 5) реостат, 6) вольтметр, 7) низковольтная эталонная лампочка с аккумулятором и вольтметром.

В 1888 г. профессор Московского университета Столетов демонстрировал на съезде врачей явление фотоэффекта. Явление это состоит в том, что свет, падающий на поверхность металла, вырывает электроны. При этом металл, теряя электроны, заряжается положительно. Вырывание электронов с атомных орбит происходит за счет полученной энергии падающих на металл квантов света—фотонов. Количество вылетающих из металла электронов пропорционально падающей на металл энергии данного спектрального состава.

В зависимости от судьбы вырванных электронов, различают следующие виды фотоэффекта. 1. Внутренний фотоэффект, когда электроны, выбитые из атома, остаются внутри тела. Они увеличивают электропроводность вещества. Таким свойством обладает селен—Se, который увеличивает свою электропроводность при освещении. 2. Внешний фотоэффект, когда вырванные

электроны покидают тело и вылетают в газ или в вакуум. 3. Фотоэффект в запирающем слое, когда электроны выходят из одного тела в другое твердое тело или жидкость.

В нашей работе применяется фотоэлемент последнего типа. Он состоит из медной пластинки, на которой осаждена закись меди (*Cuprum oxydatum*). Такой фотоэлемент носит название „купроксного“ или „купрокса“. Под действием света электроны переходят от закиси меди к меди.

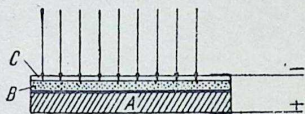


Рис. 67. Устройство фотоэлемента.

Поэтому закись меди приобретает положительный заряд, а медь — отрицательный. Если на закись меди нанести тончайший прозрачный слой какого-нибудь металла — золота, серебра и пр., то закись меди будет иметь два запирающих слоя (рис. 67) с медью внизу и с нанесенным металлом сверху. Она будет под действием света отдавать свои электроны как меди, так и металлу С. Верхний запирающий слой освещен сильнее, чем нижний, так как в первом случае лучи поглощаются только тонким слоем С, а потом, уже ослабляясь в закиси меди, достигают нижнего запирающего слоя — меди.

Так как эмиссия электронов с поверхности окиси меди пропорциональна силе света, то верхний металл приобретет больший отрицательный заряд, чем медь, и потенциал его будет больше потенциала меди. Если соединить оба металла проводником, то между ними потечет ток, выравнивающий разность их потенциалов. Этот ток увеличит потенциал меди и часть электронов перейдет на закись меди и далее под действием света на металл С и создаст фотоэлектрический ток в цепи. Весь фотоэлемент для сохранности помещен в стеклянную колбу, в цоколе которой имеются два вывода $+$ и $-$.

Очень важным свойством фотоэлемента является пропорциональность между силой тока I и световым потоком L , освещающим фотоэлемент. Эта зависимость

наблюдается в очень больших пределах и позволяет применить фотоэлемент как фотометр. В отличие от фотометра Жолли, описанного в работе № 30, где сравнивается освещенность двух полей и оценивается глазом, субъективно, фотоэлемент дает объективные показания. Они не зависят от состояния зрительного органа наблюдателя. Метод объективной фотометрии вытесняет в последнее время субъективный метод, а фотоэлемент находит все большие области применения.

Для ознакомления со свойствами фотоэлемента произведем следующие работы.

Упражнение 1. Определение чувствительности фотоэлемента. Чтобы измерить абсолютную величину освещенности, надо знать количественное соотношение между силой фототока I и освещенностью L . Источник света в i свечей создает на расстоянии r

$$\text{освещенность } L = \frac{i}{r^2}.$$

Отношение

$$\mu = \frac{I}{L} = \frac{Ir^2}{i}$$

называется „чувствительностью“ фотоэлемента. Сила тока I определяется по гальванометру, зная цену деления его шкалы. Так как сила тока в цепи зависит от сопротивления гальванометра и фотоэлемента, то найденная чувствительность μ характеризует данную установку, т. е. фотоэлемент с определенным гальванометром.

Освещенность L создается эталонным источником света. Это — маленькая лампочка накаливания, горящая под контролем вольтметра от аккумулятора или трансформатора. Она включена последовательно с реостатом, который позволяет регулировать напряжение на ее клеммах. Сила света лампочки i указана в приложенном к ней паспорте. Лампочка устанавливается на оптической скамье на таком расстоянии от фотометра, чтобы отклонение стрелки гальванометра не превышало 3—4 делений шкалы. Записывается расстояние r и отклонение стрелки n . Затем лампочка подвигается к фотометру и производится ряд последовательных измерений r и n . Результаты заносят в табл. 1. Чувствительность в амперах вычисляют один раз по среднему значению n .

Для этого умножают среднее значение $\frac{nr^2}{i}$ на цену одного деления шкалы гальванометра a , т. е. $\mu = \frac{nar^2}{i}$.

Упражнение 2. Исследование светового потока лампочки накаливания. Лампочка накаливания вставлена во вращающуюся подставку так, что может совершать с нею вращение вокруг оси, перпендикулярной к оси лампы (рис. 68). Угол поворота лампы определяется по угломерной шкале. Лампочку установ-

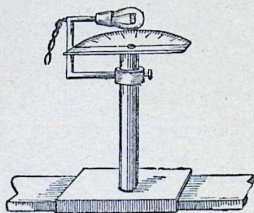


Рис. 68. Вращающаяся лампа.

ливают на расстоянии 0,25—0,30 м от фотоэлемента так, чтобы дно колбы было обращено к последнему. Это положение соответствует 0° на угломерной шкале. Отмечают положение стрелки гальванометра n_0 . Такие измерения производят при разных положениях лампы, вращая ее последовательно на 10° до угла 180° .

Световой поток, падающий на фотоэлемент, равен $\frac{is}{r^2}$, где s — площадь фотоэлемента, r — расстояние лампы от фотоэлемента и i — сила света лампочки в свечах. При постоянных r и s отклонения гальванометра $n_0, n_{10}, n_{20} \dots$ и т. д. пропорциональны силе света i .

Световой поток лампочки накаливания распределяется в разных направлениях неравномерно. Наши измерения дают возможность графически изобразить распределение силы света лампочки. Для этого в системе полярных координат проведем из центра радиусы-векторы через 10° и на них отложим силу света i , определяемую из

выражения $i = \frac{\mu r^2}{L}$ свечей. Соединив плавной кривой концы радиусов векторов, получим кривую распределения силы света лампочки. График приложить к протоколу. Форма протокола опыта следующая.

Работа № 33. Исследование фотоэлемента

Таблица 1

Упражнение 1. Исследование чувствительности фотоэлемента

Расстояние r	Свещенность $L = \frac{i}{r^2}$	Отклонение стрелки n	Среднее отклонение $\frac{n}{L}$
			Цена деления гальванометра $\alpha = 1^\circ = \dots$ Чувствительность фотоэлемента $\mu = \frac{n\alpha}{L}$

Таблица 2

Упражнение 2. Исследование светового потока лампочки накаливания

	Угол поворота лампы	Отсчет стрелки n	Сила света $i = \frac{\mu r^2}{L}$
Приложить график распределения силы света	0°		
	10°		
	20°		

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица I

Температура кипения воды t° при
барометрическом давлении H

H мм	t°	H мм	t°	H мм	t°	H мм	t°
700	97,71	720	98,49	740	99,26	760	100,00
01	,75	21	,53	41	,29	61	,04
02	,79	22	,57	42	,33	62	,07
03	,83	23	,61	43	,37	63	,11
04	,87	24	,65	44	,41	64	,15
05	,91	25	,69	45	,44	65	,18
06	,95	26	,72	46	,48	66	,22
07	97,99	27	,76	47	,52	67	,26
08	98,03	28	,80	48	,56	68	,29
09	,07	29	,84	49	,59	69	,33
710	,11	730	,88	750	,63	770	,37
11	,14	31	,91	51	,67	71	,40
12	,18	32	,95	52	,70	72	,44
13	,22	33	98,99	53	,74	73	,48
14	,26	34	99,03	54	,78	74	,51
15	,30	35	,07	55	,82	75	,55
16	,34	36	,10	56	,85	76	,58
17	,38	37	,14	57	,89	77	,62
18	,42	38	,18	58	,93	78	,66
19	,45	39	,22	59	99,96	79	,69
720	98,49	740	99,26	760	100,00	780	100,73

Таблица II

Давление насыщающего пара E в миллиметрах
ртутного столба

t°	E мм	t°	E мм	t°	E мм	t°	E мм
0,0	4,6	+10,0	9,1	+20,0	17,4	+30,0	31,5
+0,5	4,7	10,5	9,5	20,5	17,9	30,5	32,4
1,0	4,9	11,0	9,8	21,0	18,5	31,0	33,4
1,5	5,1	11,5	10,1	21,5	19,0	31,5	34,3
2,0	5,3	12,0	10,4	22,0	19,6	32,0	35,3
2,5	5,5	12,5	10,8	22,5	20,2	32,5	36,3
3,0	5,7	13,0	11,1	23,0	20,9	33,0	37,4
3,5	5,9	13,5	11,5	23,5	21,5	33,5	38,4
4,0	6,1	14,0	11,9	24,0	22,2	34,0	39,5
4,5	6,3	14,5	12,3	24,5	22,8	34,5	40,6
5,0	6,5	15,0	12,7	25,0	23,5	35,0	41,8
5,5	6,7	15,5	13,1	25,5	24,2	35,5	43,0
6,0	7,0	16,0	13,5	26,0	25,0	36,0	44,2
6,5	7,2	16,5	14,0	26,5	25,7	36,5	45,4
7,0	7,5	17,0	14,4	27,0	26,5	37,0	46,7
7,5	7,7	17,5	14,7	27,5	27,3	37,5	48,0
8,0	8,0	18,0	14,9	28,0	28,1	38,0	49,3
8,5	8,3	18,5	15,6	28,5	28,9	38,5	50,6
9,0	8,6	19,0	16,3	29,0	29,7	39,0	52,0
+9,5	8,8	19,5	16,8	29,5	30,6	39,5	53,4

Таблица III

Плотность растворов спирта C_2H_5OH

Весовые % C_2H_5OH	При 10°С			При 20°С			При 30°С		
	d	t°	d	t°	d	t°	d	t°	d
60	0,90742		0,89944		0,88304				
80	0,85215		0,84366		0,83433				
100	0,79788		0,78945		0,78096				

Таблица IV

Плотность воды d при разных температурах

t°	d	t°	d	t°	d
0	0,99987	10	0,99973	20	0,99823
1	0,99993	11	0,99963	21	0,99802
2	0,99997	12	0,99952	22	0,99780
3	0,99999	13	0,99940	23	0,99757
4	1,00000	14	0,99927	24	0,99733
5	0,99999	15	0,99913	25	0,99707
6	0,99997	16	0,99897	26	0,99681
7	0,99993	17	0,99880	27	0,99654
8	0,99988	18	0,99862	28	0,99626
9	0,99981	19	0,99843	29	0,99507

Таблица V
Поверхностное натяжение воды α и коэффициент внутреннего трения η

t°	$\frac{dH}{CM}$	η	t°	$\frac{dH}{CM}$	η
10	74,01	0,0130	18	72,82	0,0105
11	73,85	0,0126	19	72,67	0,0103
12	73,70	0,0123	20	72,52	0,0101
13	73,55	0,0120	21	72,37	0,0098
14	73,40	0,0117	22	72,22	0,0095
15	73,26	0,0114	23	72,07	0,0093
16	73,11	0,0111	24	71,92	0,0091
17	72,96	0,0108	25	71,78	0,0089

Таблица VI
Проводимость σ растворов NaCl и KCl

t°	NaCl насыщ.	KCl норм.	KCl $\frac{1}{10}$ норм.	KCl $\frac{1}{50}$ норм.
15	0,2015	0,09254	0,01048	0,002243
16	0,2063	0,09443	0,01072	0,002294
17	0,2112	0,09633	0,01095	0,002345
18	0,2161	0,09824	0,01119	0,002397
19	0,2210	0,10016	0,01143	0,002449
20	0,2260	0,10209	0,01167	0,002501
21	0,2310	0,10402	0,01191	0,002553

Примечание. Насыщенный раствор хлористого натрия приблизительно 26%. Перед употреблением взболтать с избытком соли. Нормальный раствор хлористого калия содержит 74,55 г KCl в литре раствора.

Четырехзнач

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Разности								
											1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0000	0043	0086	0128	0170	0212	0253	0249	0334	0374	4	8	12	17	21	25	29	33	37
11	0414	0453	0492	0531	0569	0607	0645	0682	0719	0755	4	8	11	15	19	23	26	30	34
12	0792	0828	0864	0899	0934	0969	1004	1038	1072	1106	3	7	10	14	17	21	24	28	31
13	1139	1173	1206	1239	1271	1303	1335	1367	1399	1430	3	6	10	13	16	19	23	26	29
14	1461	1492	1523	1553	1584	1614	1644	1673	1703	1732	3	6	9	12	15	18	21	24	27
15	1761	1790	1818	1847	1875	1903	1931	1959	1987	2014	3	6	8	11	14	17	20	22	25
16	2041	2068	2095	2122	2148	2175	2201	2227	2253	2279	3	5	8	11	13	16	18	21	24
17	2304	2330	2355	2380	2405	2430	2455	2480	2504	2529	2	5	7	10	12	15	17	20	22
18	2553	2577	2601	2625	2648	2672	2695	2718	2742	2765	2	5	7	9	12	14	16	19	21
19	2788	2810	2833	2856	2878	2900	2923	2945	2967	2989	2	4	7	9	11	13	16	18	20
20	3010	3032	3054	3075	3096	3118	3139	3160	3181	3201	2	4	6	8	11	13	15	17	19
21	3222	3243	3263	3284	3304	3324	3345	3365	3385	3404	2	4	6	8	10	12	14	16	18
22	3424	3444	3464	3483	3502	3522	3541	3560	3579	3598	2	4	6	8	10	12	14	15	17
23	3617	3636	3655	3674	3692	3711	3729	3747	3766	3784	2	4	6	7	9	11	13	15	17
24	3802	3820	3838	3856	3874	3892	3909	3927	3945	3962	2	4	5	7	9	11	12	14	16
25	3979	3997	4014	4031	4048	4065	4082	4099	4116	4133	2	3	5	7	9	10	12	14	15
26	4150	4166	4183	4200	4216	4232	4249	4265	4281	4298	2	3	5	7	8	10	11	13	15
27	4314	4330	4346	4362	4378	4393	4409	4425	4440	4456	2	3	5	6	8	9	11	13	14
28	4472	4487	4502	4518	4533	4548	4564	4579	4594	4609	2	3	5	6	8	9	11	12	14
29	4624	4639	4654	4669	4683	4698	4713	4728	4742	4757	1	3	4	6	7	9	10	12	13
30	4771	4786	4800	4814	4829	4843	4857	4871	4886	4900	1	3	4	6	7	9	10	11	13
31	4914	4928	4942	4955	4969	4983	4997	5011	5024	5038	1	3	4	6	7	8	10	11	12
32	5051	5065	5079	5092	5105	5119	5132	5145	5159	5172	1	3	4	5	7	8	9	11	12
33	5185	5198	5211	5224	5237	5250	5263	5276	5289	5302	1	3	4	5	6	8	9	10	12
34	5315	5328	5340	5353	5366	5378	5391	5403	5416	5428	1	3	4	5	6	8	9	10	11
35	5441	5453	5465	5478	5490	5502	5514	5527	5539	5551	1	2	4	5	6	7	9	10	11
36	5563	5575	5587	5599	5611	5623	5635	5647	5658	5670	1	2	4	5	6	7	8	10	11
37	5682	5694	5705	5717	5729	5740	5752	5763	5775	5786	1	2	3	5	6	7	8	9	10
38	5798	5809	5821	5832	5843	5855	5866	5877	5888	5899	1	2	3	5	6	7	8	9	10
39	5911	5922	5933	5944	5955	5966	5977	5988	5999	6010	1	2	3	4	5	7	8	9	10
40	6021	6031	6042	6053	6064	6075	6085	6096	6107	6117	1	2	3	4	5	6	8	9	10
41	6128	6138	6149	6160	6170	6180	6191	6201	6212	6222	1	2	3	4	5	6	7	8	9
42	6232	6243	6253	6263	6274	6284	6294	6304	6314	6325	1	2	3	4	5	6	7	8	9
43	6335	6345	6355	6365	6375	6385	6395	6405	6415	6425	1	2	3	4	5	6	7	8	9
44	6435	6444	6454	6464	6474	6484	6493	6503	6513	6522	1	2	3	4	5	6	7	8	9
45	6532	6542	6551	6561	6571	6580	6590	6599	6609	6618	1	2	3	4	5	6	7	8	9
46	6628	6637	6646	6656	6665	6675	6684	6693	6702	6712	1	2	3	4	5	6	7	7	8
47	6721	6730	6739	6749	6758	6767	6776	6785	6794	6803	1	2	3	4	5	5	6	7	8
48	6812	6821	6830	6839	6848	6857	6866	6875	6884	6893	1	2	3	4	4	5	6	7	8
49	6902	6911	6920	6928	6937	6946	6955	6964	6972	6981	1	2	3	4	4	5	6	7	8
50	6990	6998	7007	7016	7024	7033	7042	7050	7059	7067	1	2	3	3	4	5	6	7	8
51	7076	7084	7093	7101	7110	7118	7126	7135	7143	7152	1	2	2	3	4	5	6	7	8
52	7160	7168	7177	7185	7193	7202	7210	7218	7226	7235	1	2	2	3	4	5	6	7	7
53	7243	7251	7259	7267	7275	7284	7292	7300	7308	7316	1	2	2	3	4	5	6	6	7
54	7324	7332	7340	7348	7356	7364	7372	7380	7388	7396	1	2	2	3	4	5	6	6	7

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Разности								
											1	2	3	4	5	6	7	8	9
55	7404	7412	7419	7427	7435	7443	7451	7459	7466	7474	1	2	2	3	4	5	5	6	7
56	7482	7490	7497	7505	7513	7520	7528	7536	7543	7551	1	2	2	3	4	5	5	6	7
57	7559	7566	7574	7582	7589	7597	7604	7612	7619	7627	1	2	2	3	4	5	5	6	7
58	7634	7642	7649	7657	7664	7672	7679	7686	7694	7601	1	1	2	3	4	4	5	6	7
59	7709	7716	7723	7731	7738	7745	7752	7760	7767	7774	1	1	2	3	4	4	5	6	7
60	7782	7789	7706	7803	7810	7818	7825	7832	7839	7846	1	1	2	3	4	4	5	6	6
61	7853	7860	7868	7875	7882	7889	7896	7903	7910	7917	1	1	2	3	4	4	5	6	6
62	7924	7931	7938	7945	7952	7959	7966	7973	7980	7987	1	1	2	3	3	4	5	6	6
63	7993	8000	8007	8014	8021	8028	8035	8041	8048	8055	1	1	2	3	3	4	5	5	6
64	8062	8069	8075	8082	8089	8096	8102	8109	8116	8122	1	1	2	3	3	4	5	5	6
65	8129	8136	8142	8149	8156	8162	8169	8176	8182	8189	1	1	2	3	3	4	5	5	6
66	8195	8202	8209	8215	8222	8228	8235	8241	8248	8254	1	1	2	3	3	4	5	5	6
67	8261	8267	8274	8280	8287	8293	8299	8306	8312	8319	1	1	2	3	3	4	5	5	6
68	8325	8331	8338	8344	8351	8357	8363	8370	8376	8382	1	1	2	3	3	4	4	5	6
69	8388	8395	8401	8407	8414	8420	8426	8432	8439	8445	1	1	2	2	3	4	4	5	6
70	8451	8457	8463	8470	8476	8482	8488	8494	8500	8506	1	1	2	2	3	4	4	5	6
71	8513	8519	8525	8531	8537	8543	8549	8555	8561	8567	1	1	2	2	3	4	4	5	5
72	8573	8579	8585	8591	8597	8603	8609	8615	8621	8627	1	1	2	2	3	4	4	5	5
73	8638	8639	8645	8651	8657	8663	8669	8675	8681	8686	1	1	2	2	3	4	4	5	5
74	8692	8698	8704	8710	8716	8722	8727	8733	8739	8745	1	1	2	2	3	4	4	5	5
75	8751	8756	8762	8768	8774	8779	8785	8791	8797	8802	1	1	2	2	3	3	4	5	5
76	8808	8814	8820	8825	8831	8837	8842	8848	8854	8859	1	1	2	2	3	3	4	5	5
77	8865	8871	8876	8882	8887	8893	8899	8904	8910	8915	1	1	2	2	3	3	4	4	5
78	8921	8927	8932	8938	8943	8949	8954	8960	8965	8971	1	1	2	2	3	3	4	4	5
79	8976	8982	8987	8993	8998	9004	9009	9015	9020	9025	1	1	2	2	3	3	4	4	5
80	9031	9036	9042	9047	9058	9053	9063	9069	9074	9079	1	1	2	2	3	3	4	4	5
81	9085	9090	9096	9101	9106	9112	9117	9122	9128	9133	1	1	2	2	3	3	4	4	5
82	9138	9143	9149	9154	9159	9165	9170	9175	9180	9186	1	1	2	2	3	3	4	4	5
83	9191	9196	9201	9206	9212	9217	9222	9227	9232	9238	1	1	2	2	3	3	4	4	5
84	9243	9248	9253	9258	9263	9269	9274	9279	9284	9289	1	1	2	2	3	3	4	4	5
85	9294	9299	9304	9309	9315	9320	9325	9330	9335	9340	1	1	2	2	3	3	4	4	5
86	9345	9350	9355	9360	9365	9370	9375	9380	9385	9390	1	1	2	2	3	3	4	4	5
87	9398	9400	9405	9410	9415	9420	9425	9430	9435	9440	0	1	1	2	2	3	3	4	4
88	9445	9450	9455	9460	9465	9469	9474	9479	9484	9480	0	1	1	2	2	3	3	4	4
89	9494	9499	9504	9509	9513	9518	9523	9528	9533	9538	0	1	1	2	2	3	3	4	4
90	9542	9547	9552	9557	9562	9566	9571	9576	9581	9586	0	1	1	2	2	3	3	4	4
91	9590	9695	9600	9605	9609	9614	9619	9624	9628	9633	0	1	1	2	2	3	3	4	4
92	9638	9643	9647	9652	9657	9661	9666	9671	9675	9680	0	1	1	2	2	3	3	4	4
93	9685	9689	9694	9699	9703	9708	9713	9717	9722	9727	0	1	1	2	2	3	3	4	4
94	9731	9736	9741	9745	9750	9754	9759	9763	9768	9773	0	1	1	2	2	3	3	4	4
95	9777	9782	9786	9791	9795	9800	9805	9809	9814	9818	0	1	1	2	2	3	3	4	4
96	9823	9827	9832	9836	9841	9845	9850	9854	9859	9863	0	1	1	2	2	3	3	4	4
97	9868	9872	9877	9881	9886	9890	9894	9899	9903	9908	0	1	1	2	2	3	3	4	4
98	9912	9917	9921	9926	9930	9934	9939	9943	9948	9952	0	1	1	2	2	3	3	4	4
99	9956	9961	9965	9969	9974	9978	9983	9987	9991	9996	0	1	1	2	2	3	3	4	4

Таблица VIII

Длины волн некоторых спектральных линий

Элемент	Цвет линии	Длина волны в μ	Элемент	Цвет линии	Длина волны в μ
Ba	Зеленая	516	K	Фиолетовая	405
	Зеленая	527		Желтая	580
	Желто-зеленая	554		Красная	767
	Голубая	461		Красная	770
Ca	Зеленая	560	Li	Фиолетовая	413
	Оранжевая	616		Голубая	460
H	Фиолетовая	410	Na	Оранжевая	610
	Синяя	434		Красная	671
He	Зеленая	486	Sr	Желтая	589
	Красная	656		Голубая	461
	Фиолетовая	403	Sr	Красная	639
	Синяя	447		Красная	641
	Голубая	471			
	Зеленая	492			
	Зеленая	502			
	Желтая	586			
Красная	658				
Красная	707				

Таблица IX

Длины волн некоторых спектральных линий неона

Положение и цвет линии	Относительная яркость	Длина волны μ
Яркокрасная	10	640,2
Красно-оранжевая, левая из двух близких линий	10	614,3
Оранжевая, первая заметная влево от желтой	5	594,5
Желтая	20	585,2
Светлозеленая, первая заметная вправо от желтой	4	576,0
Зеленая, левая из двух одиноких линий	6	540,0
Зеленая, правая из двух одиноких линий	8	533,0
Зеленая, правая из пяти равноудаленных линий	5	503,1
Сине-зеленая одинокая	8	484,9

Таблица X

Значение синусов и тангенсов для углов 0—60°

Гра- дусы	Синусы	Тан- генсы	Гра- дусы	Синусы	Тан- генсы
0	0,0000	0,0000	30	0,5000	0,5774
1	0,0175	0,0175	31	0,5150	0,6009
2	0,0349	0,0349	32	0,5299	0,6249
3	0,0523	0,0524	33	0,5446	0,6494
4	0,0698	0,0699	34	0,5592	0,6745
5	0,0872	0,0875	35	0,5736	0,7002
6	0,1045	0,1051	36	0,5878	0,7265
7	0,1219	0,1228	37	0,6018	0,7536
8	0,1392	0,1405	38	0,6157	0,7813
9	0,1564	0,1584	39	0,6293	0,8098
10	0,1736	0,1763	40	0,6428	0,8391
11	0,1908	0,1944	41	0,6561	0,8693
12	0,2079	0,2126	42	0,6691	0,9004
13	0,2250	0,2309	43	0,6820	0,9325
14	0,2419	0,2493	44	0,6947	0,9657
15	0,2588	0,2679	45	0,7071	1,0000
16	0,2756	0,2867	46	0,7193	1,036
17	0,2924	0,3057	47	0,7314	1,072
18	0,3090	0,3249	48	0,7431	1,111
19	0,3256	0,3443	49	0,7547	1,150
20	0,3420	0,3640	50	0,7660	1,192
21	0,3584	0,3839	51	0,7771	1,235
22	0,3746	0,4040	52	0,7880	1,280
23	0,3907	0,4245	53	0,7986	1,327
24	0,4067	0,4452	54	0,8090	1,376
25	0,4226	0,4663	55	0,8192	1,428
26	0,4384	0,4877	56	0,8290	1,483
27	0,4540	0,5095	57	0,8387	1,540
28	0,4695	0,5317	58	0,8480	1,600
29	0,4848	0,5543	59	0,8572	1,664
30	0,5000	0,5774	60	0,8660	1,732

Таблица XI

Приведение показаний барометра с латунной шкалой к 0°

Температура барометра	Показания ртутного барометра в мм								
	690	700	710	720	730	740	750	760	770
	Из показаний барометра вычитается поправка в мм								
+ 10°	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3
11	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4
12	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5
13	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6
14	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7	1,8
15	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	1,9
16	1,8	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0
17	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1
18	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,3
19	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4
20	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5
21	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6
22	2,5	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6	2,7	2,7	2,7
23	2,6	2,6	2,7	2,7	2,7	2,8	2,8	2,8	2,9
24	2,7	2,7	2,8	2,8	2,8	2,9	2,9	3,0	3,0
25	2,8	2,8	2,9	2,9	3,0	3,0	3,0	3,1	3,1
26	2,9	3,0	3,0	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2	3,2
27	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2	3,2	3,3	3,3	3,3
28	3,1	3,2	3,2	3,3	3,3	3,4	3,4	3,5	3,4
29	3,2	3,3	3,3	3,4	3,4	3,5	3,5	3,6	3,5

Таблица XII

Некоторые физические константы

	Плотность 0°	Теплоем- кость при 18°	Теплопровод- ность	Удельное со- противление метр-мм²	Коэффициент вязкости при 18°	Поверхност- ное натяжение при 18°
Алюминий	2,70	0,209	0,50	0,029		
Железо	7,9	0,119	0,14	0,1		
Латунь	8,4—8,7	0,0917	0,26	0,018—0,059		
Медь	8,93	0,0911	0,92	0,017		
Платина	21,4	0,0320	0,166	0,107		

Продолж. табл. XII

	Плотность при 0°	Теплоемкость при 18°	Теплопровод- ность	Удельное со- противление метр-мм ²	Коэффициент вязкости при 18°	Поверхност- ное натяжение при 18°
Стекло	2,4—2,8	0,17	0,0016	—		
Вода	1,0	0,999	0,0014	—	0,0105	72,8
Глицерин	1,260	0,576	—	—	10,7	65
Керосин	0,8	0,51	—	—	0,018	30
Ртуть	13,595	0,033	0,020	—	0,0159	491
Спирт эти- ловый	0,806	0,593	0,0043	—	0,0122	22,0
Воздух	1,293 г в 1 литре	0,237 С _p	5,65.10 ⁻⁵	—	1,74.10 ⁻⁴	—

Редактор
Д. А. Катренко

Технический редактор
А. Ефимова

A04620. М-У-1. Подписано к печати 5/V
1948 г. Ф. бум. 84×108/32. Заказ 7781. Печ.
л. 11,5. Уч.-пзд. л. 9,6. Знак. в 1 п. л. 38000.
Тираж 12 000 экз. Цена 3 р. 35 к. Пере-
плет 1 руб.

1-я Образцовая типография треста „Поли-
графкнига“ Огиза при Совете Министров
СССР, Москва, Валуевая, 28.

