

Дополнительные указания ко всем лабораторным работам или указания к лабораторной работе "минус один".

Основная цель практических занятий, проводимых в виде лабораторных работ, состоит в том, чтобы студенты что-нибудь поделали своими руками. Вторая цель лабораторных работ — научить студентов работать с погрешностями. Третья цель — научить строить графики по результатам измерений.

Вы как студент должны что-то поделать своими руками. Имеется в виду не Ваш сосед по лабораторному столу, а именно Вы. По этой причине каждый студент должен делать каждую лабораторную работу самостоятельно, а не одну работу на двоих, троих и т.п. Исключения возможны только в тех случаях, когда лабораторных работ не хватает на всех студентов. Если для выполнения каких-то операций Вам не хватает рук или глаз, то можете попросить соседа помочь Вам независимо от того, какую лабораторную работу выполняет сосед.

В процессе выполнения работы у Вас могут возникнуть затруднения двух типов. Во-первых, Вам может быть непонятно, что дальше делать или почему что-то не получается. В таком случае обратитесь за помощью к преподавателю, за которым Вы закреплены. Во-вторых, Вам может чего-то не хватать для выполнения работы или что-то, по Вашему мнению, сломалось. В таком случае обратитесь к лаборанту, обслуживающему данную комнату. В любом случае гораздо лучше, если Вы обратитесь к преподавателю или лаборанту (как правило, с высшим образованием) по имени и отчеству, а не со словами "Э-э-э ...", "А вот тут у меня ...", "А как тут ...". Вы не обязательно сразу запомните, как зовут преподавателя и лаборанта.

На сегодняшний день лабораторные работы первого курса поддерживают в работоспособном состоянии следующие лаборанты:

Наталья Ивановна,
Марксана Николаевна,
Людмила Михайловна,
Анастасия Валентиновна,
Наталья Тимофеевна,
Лена,
Марина.

Заведите специальную тетрадь для лабораторных работ — рабочий журнал. Начните журнал с того, что запишите полное имя Вашего преподавателя и лаборанта. Оставьте несколько строк для имен лаборантов, так как в каждой комнате может быть свой лаборант, а работы Вы будете выполнять в разных комнатах. Эта рекомендация полезна не только для лабораторных работ, но и для любых других занятий. К Вам гораздо лучше будут относиться, если Вы будете обращаться к преподавателю, ведущему семинарские занятия или лекции, по имени и отчеству, а не со слов "А вот ...".

Все, что Вы делаете при выполнении лабораторных работ, записывайте в Ваш лабораторный журнал. Не должно быть никаких, даже черновых, записей на листочках. Если случилось невозможное, и Вы забыли свой рабочий журнал, то дома после выполнения работы, вклейте листочки с записями в свой рабочий журнал. Ваш лабораторный журнал — это и есть Ваш черновик (чистовиком будет отчет по каждой лабораторной работе). Если Вы сделали что-то неправильно (неправильно сосчитали, неправильно измерили, неправильно нарисовали электрическую схему), то ни в коем случае не вырывайте листок с ошибочными записями из рабочего журнала. Перечеркните записи, но так, чтобы при желании их можно было прочесть. Не зачеркивайте записи до неузнаваемости. Часто бывает, что, глядя в свои старые записи, думаешь "Каким же я был глупым, чтобы такое написать?". Но через некоторое время начинаешь понимать "Э нет. Все было сделано правильно, и не таким уж был и глупым".

Насколько подробными должны быть записи в Вашем лабораторном журнале? Подробность записей должна быть не больше и не меньше, чем это необходимо, для того чтобы через пять лет Вы могли понять, что сегодня было сделано и какие результаты получены. Требования к подробности отчета такие же. Предположим, Вы защищаете отчет по лабораторной работе, которую выполнили пару месяцев назад, и преподаватель спрашивает Вас, что у Вас тут написано. Вы не имеете права сказать, что не помните, потому что это было давно. Вы не должны помнить, Вы должны быть в состоянии разобраться, что у Вас написано.

После выполнения лабораторной работы я, как преподаватель, подписываю Ваши результаты измерений в Вашем лабораторном журнале, чтобы гарантировать, что результаты не взяты из головы и не списаны с другого студента. Другие преподаватели, возможно, поступают иначе.

Результаты выполнения каждой лабораторной работы нужно сдавать преподавателю на следующем занятии в виде отчета, оформленного на отдельном листе. Этот отчет — чистовик. Его нужно не просто сдать преподавателю, его нужно защитить (от преподавателя), обосновать правильность выполнения работы и оформления результатов. Если результаты измерений неудачны, то я не буду к Вам придирается, но, как поведут себя в таком случае другие преподаватели, я не знаю.

Подготовиться к выполнению лабораторной работы Вы должны дома заранее. Подготовка идет по описанию лабораторной работы, которое можно получить в читальном зале библиотеки либо по книге В. А. Соловьева и В. Е. Яхонтовой "Руководство к лабораторным работам по физике". Составленные мною дополнительные указания к лабораторным работам не являются ни необходимым, ни достаточным материалом при подготовке к выполнению работы. Прежде чем начать выполнение лабораторной работы Вы должны получить допуск к работе у Вашего преподавателя. Во время этой процедуры преподаватель проверяет, что Ваших знаний о данной лабораторной работе достаточно для ее выполнения. По результатам проверки преподаватель может не допустить Вас к работе. Не получив допуска, Вы не выполните работу. Не выполнив работу, на следующем занятии Вы не сдадите отчет по работе. Пока Вы не сдадите отчеты по всем работам, Вам не поставят зачет по "физическому практикуму". Пока Вы не получите все зачеты, Вас не допустят к сдаче экзаменов. Два несданных экзамена к концу сессии — отчисление. Получив у преподавателя допуск, можно договориться с ним, выполнить работу в другой день и в другое время, когда у Вас будет свободное время и одновременно будет открыта учебная лаборатория. А будет ли у Вас свободное время? Постарайтесь не пропускать лабораторные работы, догонять будет трудно.

Погрешности.

В каждой лабораторной работе у каждой измеренной или рассчитанной физической величины должна быть указана ее погрешность.

Измерение любой физической величины, если по своей природе она не является целочисленной, происходит с некоторой неизбежной ошибкой. Погрешность — это модуль характерной ошибки. В простейшем случае в качестве погрешности принимают такую величину, что вероятность ошибки меньше погрешности равна примерно $2/3$. Выражение " $c = (299792.5 \pm 0.5)$ км/сек" означает, что некоторая величина " c " равна 299792.5 км/сек с погрешностью 0.5 км/сек.

Есть несколько источников ошибок и соответственно погрешностей. Если считать, что разные погрешности одной и той же физической величины являются независимыми, то они складываются как корень квадратный из суммы квадратов (как если бы они были ортогональны). Например, если у Вас три источника погрешности с величинами погрешностей 3, 4 и 12, то суммарная погрешность равна 13. Обратите внимание, что суммарная погрешность близка к наибольшей из складываемых погрешностей. Поэтому обычно вместо суммарной погрешности просто оставляют наибольшую из складываемых

погрешностей. Это вполне допустимо, потому что обычно сама величина погрешности известна с очень небольшой точностью.

Физическая величина может быть либо непосредственно измеряемая, либо рассчитываемая по формуле через измеряемые величины. Обсудим сначала погрешность непосредственно измеряемой величины. Эта погрешность складывается (как корень квадратный из суммы квадратов) из трех частей: погрешности градуировки прибора, погрешности отсчета и погрешности по разбросу.

Погрешность градуировки или погрешность прибора.

Погрешность прибора определяется классом точности прибора. Возьмите две школьные линейки разной формы или конструкции и прислоните их друг к другу. Вы с удивлением обнаружите, что двадцать сантиметров по одной линейке не равны двадцати сантиметрам по другой. При изготовлении линейки шкалу наносят не слишком точно, и эта неточность может быть настолько большой, что видна просто на глаз. Если длину стола измерить тщательно и аккуратно одной из этих двух линеек, то измеренная величина все равно не будет очень точной.

Для учета погрешности прибора ее указывают на самом приборе. В нулевой лабораторной работе Вы будете измерять размеры тела штангенциркулем и микрометром, на которых указана погрешность соответствующего прибора. На микрометре должна быть указана погрешность прибора 0.01 мм, на штангенциркуле — 0.1 мм или 0.05 мм. Если на приборе ничего не указано, как, например, на школьной линейке, то подразумевается, что погрешность прибора равна цене наименьшего деления шкалы прибора (или половине цены деления, на Ваше усмотрение). Для школьной линейки — это один миллиметр.

Если прибор достаточно сложен и на нем не указана погрешность прибора, то она указана в его техническом описании.

Вместо величины погрешности прибора часто указывается класс точности прибора. Во многих лабораторных работах Вы будете использовать стрелочные приборы: вольтметры для измерений напряжений, амперметры для измерений токов. Если где-то рядом со шкалой прибора есть надпись с десятичной запятой, например, "0,2" или "0,5" или "1,0", то это и есть класс точности прибора. Величина класса точности прибора позволяет вычислить погрешность прибора. Шкала прибора состоит из делений, около некоторых делений стоят числа. Последнее (правое) число соответствует всей шкале прибора в условных единицах (делениях шкалы). Погрешность прибора равна числу процентов от всей шкалы прибора, равному классу точности прибора. Пусть вся шкала прибора — 150 делений, класс точности прибора — "0,2". Умножаем 150 на 0.2 и делим на 100, так как класс точности выражен в процентах. Получаем, что погрешность рассматриваемого прибора равна трем десятым одного деления шкалы прибора.

В некоторых случаях класс точности прибора не позволяет на прямую вычислить погрешность прибора. В этих случаях класс точности прибора является просто номером и не содержит десятичной запятой. К подобным приборам относятся весы и разновески (гирьки), используемые в нулевой лабораторной работе. Соответствующие погрешности приборов нужно искать по таблицам справочников.

Погрешность отсчета.

Если миллиметровые деления школьной линейки поставлены идеально точно, то и в этом случае линейка не позволит измерять расстояния с точностью выше одной десятой миллиметра. С большей точностью не удастся снять показания с линейки, она для этого не предназначена. Точность или погрешность, с которой удастся снять показания по шкале прибора, и является погрешностью отсчета. Погрешность отсчета никогда не бывает меньше десятой доли деления шкалы прибора. Величину этой погрешности Вы оцениваете на глаз. С какой точностью лично Вы можете снять показания по шкале данного Вам прибора.

Казалось бы, эту погрешность никогда не нужно учитывать, так как она всегда меньше погрешности прибора. Это так за исключением случаев, когда Вы хотите измерить очень малое изменение показаний прибора. Например, Вы хотите измерить школьной линейкой расстояние, величина которого находится в пределах от одного до двух миллиметров. Казалось бы, погрешность прибора равна одному миллиметру, и этим прибором нельзя измерить расстояние с меньшей погрешностью. На самом деле на глаз удается измерить такое расстояние с точностью, определяемой погрешностью отсчета, примерно две десятых миллиметра. Дело в том, что погрешность измерения равна погрешности прибора при измерении расстояний, сравнимых с длиной линейки. Для меньших расстояний погрешность становится меньше, поэтому возможны случаи, когда нужно учитывать только погрешность отсчета. В каких именно случаях можно не учитывать погрешность прибора остается на совести экспериментатора, то есть на Вашей совести.

Погрешность по разбросу.

Погрешностями по разбросу занимается раздел математики "теория ошибок" или "математическая статистика". По этому разделу математики написано много книг, и мы не сможем здесь рассмотреть этот вопрос в полном объеме, а ограничимся лишь очень кратким и не слишком логичным рассмотрением.

Пусть два разных студента измеряют одно и то же расстояние (ширину стола) одной и той же метровой линейкой. Один из них получил значение 873.3 мм, а другой, не зная результата первого студента, получил значение 874 мм. Кто из них прав? Оба правы. Если Вы сами будете измерять эту длину несколько раз, не стараясь получить один и тот же результат, то результаты будут чуть-чуть различными. В таком случае в качестве оценки истинного значения измеряемой ширины стола разумно взять среднее арифметическое значение полученных измерений (все результаты сложить и разделить на их количество). Если Вы хотите знать ширину стола как можно точнее, то нужно сделать несколько измерений, например, пять. Пусть результаты пяти измерений дали следующие значения: 870 мм, 876 мм, 873 мм, 879 мм, 882 мм. Среднее арифметическое значение (876 мм) нужно принять в качестве оценки истинного значения ширины стола. А чему равна погрешность полученного значения? Погрешность прибора — один миллиметр, но результаты измерений имеют больший разброс значений, поэтому и погрешность должна быть больше. Часто в электрических измерениях разброс измеряемых значений оказывается заметно больше погрешности прибора.

Рассмотрим подробнее, как рассчитать величину погрешности по разбросу. Забудем на время об остальных видах погрешности. Трудность состоит в том, что погрешность по разбросу является несколько четырехзначной величиной. Есть погрешность по разбросу, и есть оценка погрешности по разбросу, есть погрешность единичного измерения и есть погрешность среднего арифметического измеренных значений. Рассмотрим подробнее погрешность единичного измерения.

Если какую-либо физическую величину измерять бесконечно много раз, то предел, к которому стремится среднее арифметическое значение измерений, называется математическим ожиданием этой физической величины или ее истинным значением. Для физической величины X обозначим математическое ожидание или среднее по бесконечному числу измерений (по бесконечной выборке) как $\langle X \rangle$. В качестве погрешности единичного измерения σ_1 принято считать среднеквадратичное отклонение единичного измерения от среднего значения $\langle X \rangle$ или корень квадратный из дисперсии единичного измерения $\sigma_1 = \sqrt{D_1}$, где D_1 (дисперсия) — среднее по бесконечной выборке значение квадрата отклонения единичного измерения от математического ожидания $D_1 = \langle (X - \langle X \rangle)^2 \rangle$. Чтобы найти погрешность единичного измерения σ_1 нужно сделать

бесконечное число измерений. По конечной выборке измеренных значений мы можем сделать только оценку погрешности единичного измерения, обозначим ее как δX_1 .

Чтобы оценить отклонение от истинного значения физической величины нужно сначала оценить само истинное значение. Будем обозначать как \bar{X} оценку истинного значения $\langle X \rangle$. В качестве оценки \bar{X}_N для выборки из N измерений возьмем среднее

арифметическое из этих измерений $\bar{X}_N = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$, где X_i — результат i -ого измерения. В

качестве оценки для среднеквадратичного отклонения единичного измерения по выборке из

N измерений принимают величину $\delta X_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_N)^2}{N-1}}$, что очень похоже на

среднеквадратичное отклонение измеренных значений X_i от оценки истинного \bar{X}_N вместо отклонения от самого истинного $\langle X \rangle$ значения величины X . Похоже, но не в точности совпадает, так как среднеквадратичное отклонение должно было бы иметь знаменатель дроби N , а не $N-1$. Почему $N-1$, а не N ? Причина в том, что измеренные значения X_i лежат ближе к среднему по выборке \bar{X}_N , чем к истинному $\langle X \rangle$ значению, и отклонение от среднего по выборке нужно несколько увеличить, чтобы оценить отклонение от истинного значения. Это особенно хорошо видно, если выполнено всего одно измерение. Тогда среднее по выборке из одного измерения равно самому измерению. Отклонение измерения от среднего по выборке равно нулю, а отклонение измерения от истинного значения не равно нулю и, следовательно, больше отклонения от среднего по выборке. Если измерений много, то разница между $N-1$ и N становится несущественной.

Мы рассмотрели погрешность единичного измерения. Обсудим теперь погрешность среднего арифметического значения из N измерений. Среднее арифметическое значение будет обычно ближе к истинному значению, чем большинство единичных измерений. Следовательно, погрешность σ_N среднего арифметического значения должна быть меньше погрешности σ_1 единичного измерения. Как показывает теория в случае гауссовского распределения случайных отклонений — в \sqrt{N} раз меньше. Если истинные значения отличаются в \sqrt{N} раз, то и оценка погрешности δX_N среднего из N измерений тоже в \sqrt{N} раз меньше оценки погрешности δX_1 единичного измерения. Поэтому

$$\delta X_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_N)^2}{N \cdot (N-1)}}.$$

Окончательно учет погрешности по разбросу (без учета погрешностей градуировки и

отсчета) приводит нас к результату $X = \bar{X}_N \pm \delta X_N$, где N — число измерений, $\bar{X}_N = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$

— среднее арифметическое измеренных значений, $\delta X_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_N)^2}{N \cdot (N-1)}}$ — оценка

погрешности среднего арифметического измеренных значений, X_i — результат i -ого измерения.

Погрешность измеряемой величины с учетом всех видов погрешностей в теории равна корню квадратному из суммы квадратов погрешности градуировки прибора, погрешности отсчета и погрешности по разбросу. На практике в качестве суммарной погрешности достаточно взять наибольшую из трех указанных погрешностей.

Как получить оценку для физической величины и ее погрешности, если эта величина не является непосредственно измеряемой, а лишь выражается в виде формулы через измеряемые величины? Например, в нулевой лабораторной работе объем цилиндра $V = H \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ выражается через его высоту H и диаметр D , которые непосредственно измеряются.

Сначала получают оценку величины и погрешности для каждой измеряемой величины (высота, диаметр), входящей в формулу расчета интересующей нас величины (объема).

Например, для высоты получаем $H = \bar{H}_N \pm \delta H_N$, где $\bar{H}_N = \frac{\sum_{i=1}^N H_i}{N}$ — среднее арифметическое

значение высоты из N измеренных значений, $\delta H_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (H_i - \bar{H}_N)^2}{N \cdot (N-1)}}$ — оценка

среднеквадратичного отклонения среднего арифметического значения высоты от истинного

значения. Аналогично для диаметра $D = \bar{D}_N \pm \delta D_N$, где $\bar{D}_N = \frac{\sum_{i=1}^N D_i}{N}$, $\delta D_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (D_i - \bar{D}_N)^2}{N \cdot (N-1)}}$.

Затем находим оценку \bar{V} для объема, подставляя в теоретическую формулу для объема в качестве значений высоты и диаметра только что полученные их оценки $\bar{V} = \bar{H}_N \cdot \frac{\pi \cdot \bar{D}_N^2}{4}$.

Погрешность полученного таким образом значения величины объема определяют как сумму вкладов в погрешность каждой из измеряемых величин. Вклады независимы, поэтому они

суммируются как корень квадратный из суммы квадратов $\delta V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial H} \cdot \delta H_N\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial D} \cdot \delta D_N\right)^2}$.

Здесь $\frac{\partial V}{\partial H}$ и $\frac{\partial V}{\partial D}$ — частные производные от объема по высоте и по диаметру. Частная производная от функции по одной из ее переменных — это обычная производная, при вычислении которой считают, что остальные переменные кроме той, по которой идет дифференцирование, остаются постоянными. Так для функции $V = H \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ имеем

$\frac{\partial V}{\partial H} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ и $\frac{\partial V}{\partial D} = H \cdot \frac{\pi \cdot D}{2}$, где в качестве значений H и D нужно подставить их оценки \bar{H}_N и \bar{D}_N .

Окончательно для объема получаем $V = \bar{V} \pm \delta V$, где $\bar{V} = \bar{H}_N \cdot \frac{\pi \cdot \bar{D}_N^2}{4}$ — оценка объема,

$\delta V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial H} \cdot \delta H_N\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial D} \cdot \delta D_N\right)^2}$ — оценка погрешности объема, $\frac{\partial V}{\partial H} = \frac{\pi \cdot \bar{D}_N^2}{4}$,

$\frac{\partial V}{\partial D} = \bar{H}_N \cdot \frac{\pi \cdot \bar{D}_N}{2}$, $\delta H_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (H_i - \bar{H}_N)^2}{N \cdot (N-1)}}$ — погрешность по разбросу измерения высоты (она

может быть заменена в формуле для δV погрешностью прибора или отсчета, если они

больше погрешности по разбросу), $\delta D_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (D_i - \bar{D}_N)^2}{N \cdot (N-1)}}$ — погрешность по разбросу

измерения диаметра (она может быть заменена в формуле для δV погрешностью прибора

или отсчета, если они больше погрешности по разбросу), $\bar{H}_N = \frac{\sum_{i=1}^N H_i}{N}$ — оценка величины

высоты, $\bar{D}_N = \frac{\sum_{i=1}^N D_i}{N}$ — оценка величины диаметра, N — число измерений высоты H и

диаметра D (для простоты — одинаковое), H_i — результат i -ого измерений высоты, D_i — результат i -ого измерения диаметра. Для другой формулы зависимости неизвестной величины от измеряемых величин можно вывести аналогичные формулы вычисления погрешности.

Относительная погрешность — это отношение погрешности (абсолютной погрешности) к значению самой величины. Относительную погрешность часто выражают в процентах. Часто бывает, что рассчитываемая физическая величина выражается как произведение или частное нескольких измеряемых величин. В таком случае проще сначала найти относительную погрешность вычисляемой величины, и лишь затем абсолютную погрешность умножением на значение самой величины. Для физической величины, равной произведению (или частному от деления) любого количества измеряемых величин, относительная погрешность складывается (как корень квадратный из суммы квадратов) из относительных погрешностей сомножителей (делимого, делителей).

В рассматриваемом примере с объемом цилиндра $V = H \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ один из сомножителей (диаметр) входит в квадрате. Эта двойка проявится в выражении для относительной погрешности $\frac{\delta V}{V} = \sqrt{\left(\frac{\delta H}{H}\right)^2 + \left(2 \frac{\delta D}{D}\right)^2}$ в виде сомножителя перед дробью $\frac{\delta D}{D}$.

Аналогичная поправка справедлива и для любой другой степени.

Относительная погрешность позволяет легко оценить правдоподобность погрешности рассчитываемой по формуле физической величины. Относительная погрешность произведения (частного от деления) всегда немного больше наибольшей относительной погрешности входящих в формулу величин. Всегда полезно делать такую проверку результирующей погрешности.

С какой точностью нужно вести расчеты по предложенным формулам?

Казалось бы, с какой точностью считает калькулятор с такой и нужно проводить расчеты. Например, если калькулятор считает с 99-ю знаками, то столько знаков и выписывать. Однако, как показывает опыт, из этих 99-и знаков Вы в пяти – десяти знаках обязательно ошибетесь при переписывании. Все знаки после первого ошибочного не имеют никакого смысла, если не считать, что они вводят в заблуждение. Есть такое ощущение, что не нужно 99-и знаков. Может быть достаточно 12-и знаков? А может быть достаточно вообще двух знаков или одного?

Необходимое число знаков определяется из величины погрешности. Погрешность — это величина возможной ошибки. Нет никакого смысла указывать знаки определяемой величины, которые составляют меньше десятой доли погрешности этой величины. В самой погрешности имеет смысл только одна значащая цифра. Например, ± 200 или ± 0.07 , но не ± 220 и не ± 0.067 . Писать погрешность с двумя знаками не только излишняя тщательность, а просто ошибка.

В некоторых научных статьях приводятся результаты с двузначными погрешностями. Как правило, такая погрешность относится к единичному измерению, а не к погрешности среднего арифметического значения. Кроме того, два знака в погрешности означают, что усреднение проводилось по большому числу измерений (от 100 до 10000). Если Вы указываете такую погрешность, Вы как бы намекаете, что результат может быть очень близок к среднему арифметическому, но Вы не знаете, в какой мере можно пренебречь погрешностью градуировки прибора. Уверяю Вас, никого не интересует, чего Вы не знаете. Мы и сами многого не знаем. Пишите о том, что знаете, а не о том, чего не знаете.

Итак, будем оставлять в погрешности только один десятичный знак, например ± 200 или ± 0.07 или ± 4 (но не ± 4.0). В промежуточных данных при вычислении погрешности нужно оставлять две значащих цифры, например 220 или 0.067. Занижая величину погрешности, Вы обманываете читателя гораздо больше, чем, завышая ее величину. Поэтому при округлении погрешности принято округлять вниз только цифры 1 и 2, остальные цифры — вверх. Так результат расчета погрешности 220 нужно округлить до значения ± 200 , а результат 230 — до ± 300 .

В выражении самой физической величины, для которой мы обсуждаем погрешность, нужно оставлять при округлении младший разряд тот, в котором выражается погрешность величины. Например, $X = 17.83 \pm 0.06$ или $X = 178.3 \pm 0.6$ или $X = 1783 \pm 6$ или $X = 178300 \pm 600$ или $X = 0.01783 \pm 0.00006$. В промежуточных результатах при вычислении физической величины приходится оставлять больше знаков, но не злоупотребляйте их количеством.

На самом деле научный мир склоняется к тому, чтобы использовать значения погрешности только с шагом в полтора раза. Например, для одного и того же рассчитанного значения величины $X = 4.241$ и разной величины погрешности результат может быть записан следующим образом: $X = 4.24 \pm 0.01$ или $X = 4.240 \pm 0.015$ или $X = 4.24 \pm 0.02$ или $X = 4.24 \pm 0.03$ или $X = 4.24 \pm 0.05$ или $X = 4.24 \pm 0.07$ или $X = 4.25 \pm 0.10$ или $X = 4.25 \pm 0.15$ или $X = 4.2 \pm 0.2$ или $X = 4.2 \pm 0.3$ или $X = 4.2 \pm 0.5$ или $X = 4.2 \pm 0.7$ или $X = 4 \pm 1$ или $X = 4.0 \pm 1.5$ или $X = 4 \pm 2$ и т.д. Если Вы находитесь в моей подгруппе студентов, то будет лучше, если Вы будете пользоваться правилами, изложенными в этом абзаце.

Требования к графикам.

Рассмотрим требования, предъявляемые к оформлению графиков на примере зависимости тока от напряжения в некоторой гипотетической схеме. Пусть результаты измерений представлены в виде таблицы.

U (В)	I (А)
-0.7 ± 0.2	0.000 ± 0.003
0.0 ± 0.2	0.000 ± 0.003
0.5 ± 0.2	0.001 ± 0.003
0.7 ± 0.2	0.007 ± 0.003
1.1 ± 0.2	0.020 ± 0.003
1.7 ± 0.2	0.055 ± 0.005
1.9 ± 0.2	0.045 ± 0.005
2.3 ± 0.2	0.060 ± 0.005
2.7 ± 0.2	0.055 ± 0.005
3.1 ± 0.2	0.063 ± 0.005

В первую очередь нужно решить, какая из двух переменных величин будет отложена по горизонтали (по оси абсцисс или по оси X), а какая — по вертикали (по оси ординат или по оси Y). Нужно стараться причину откладывать по оси абсцисс, а следствие — по оси ординат. В нашем примере логично предположить, что приложенное к схеме напряжение является причиной тока. Напряжение отложим по оси X, а силу тока — по оси Y.

Во вторую очередь нужно определить диапазон изменения каждой из двух переменных величин. В рассматриваемом примере напряжение U меняется от -0.7 Вольт до 3.1 Вольта, сила тока I изменяется в пределах от 0 Ампер до 0.063 Ампера.

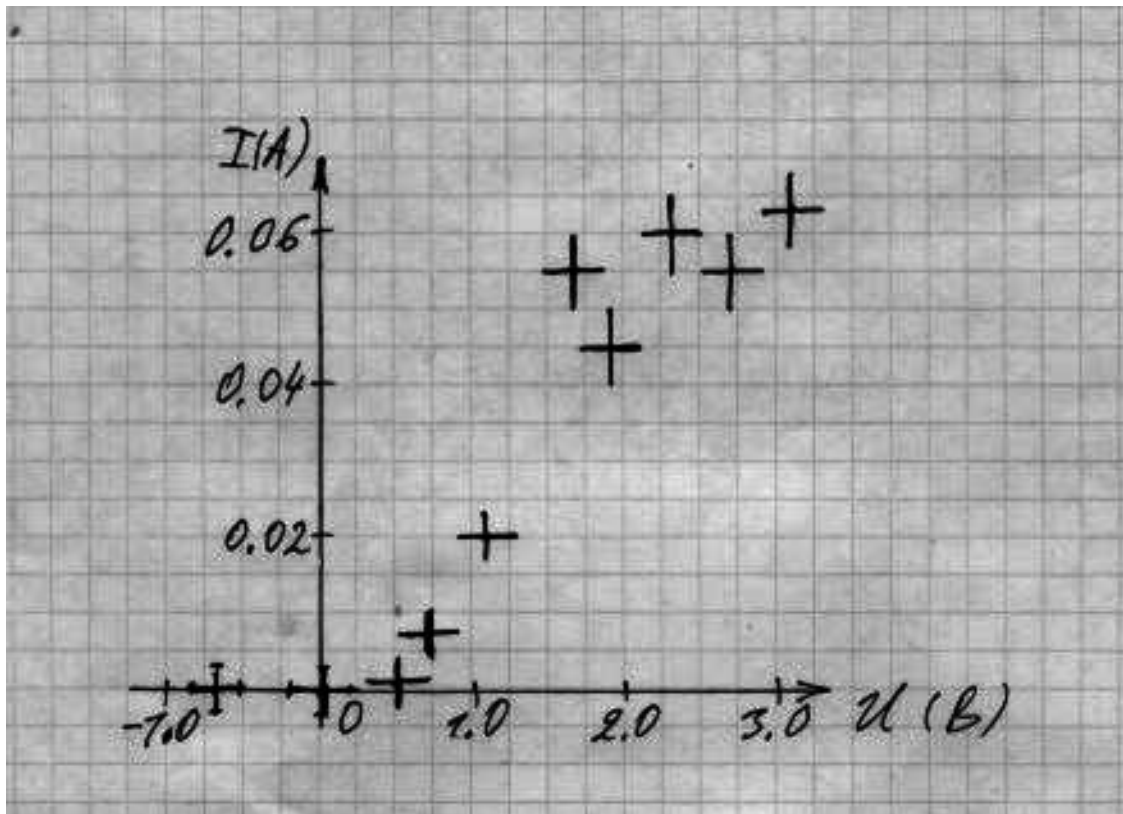
Далее нужно выбрать величину шага меток, которые будут по осям графика. Метки могут быть двух типов: с подписями в виде чисел и без них. Мы будем обсуждать только метки с подписями. Метки без подписей можно поставить между метками с подписями в два или пять раз чаще. Метки нужно ставить через круглые значения или через удвоенные круглые значения или через упятеренные круглые значения. Никогда не ставьте метки кратные трем (тем более семи) единицам. По каждой оси нужно поставить от трех до девяти меток. Диапазон изменения меток должен быть таким же или чуть шире, чем диапазон изменения соответствующей переменной величины.

Разберемся с метками по оси напряжений. Если взять метки с шагом 0.5 Вольта, то метки надо ставить в диапазоне от -1.0 Вольта до 3.5 Вольта. Всего десять меток. Это чуть больше, чем хотелось бы, но вполне допустимо. Если взять метки с шагом 1 Вольт, то диапазон изменения меток можно взять от -1 Вольта до 3 Вольт. Всего пять меток. Формально нужно было бы поставить еще метку 4 Вольта, но можно ее и не ставить, так как метка 3 Вольта очень близка к наибольшему значению напряжения 3.1 Вольта. Если брать метки с шагом 2 Вольта, то диапазон меток от -2 Вольт до 4 Вольт. Всего четыре метки. Что тоже допустимо, но лучше остановиться на шаге в 1 Вольт.

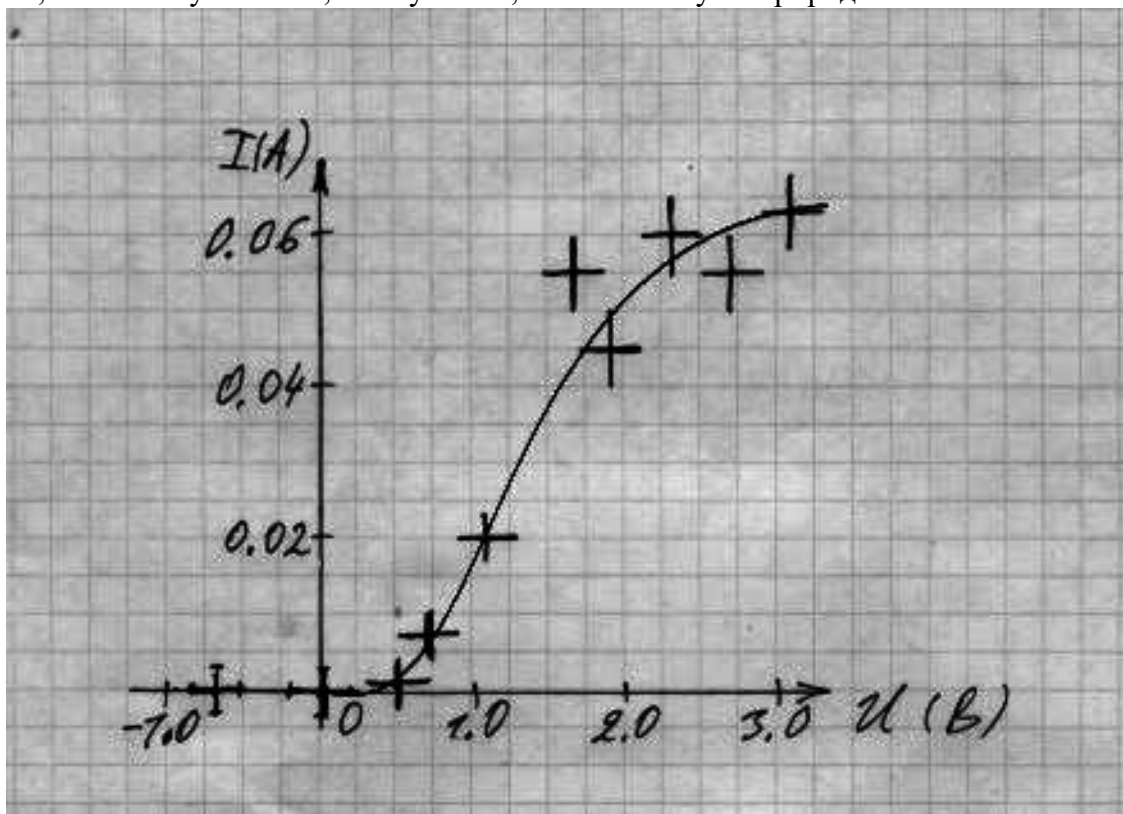
Метки по оси ординат удобно выбрать с шагом 0.01 Ампера (от 0 Ампер до 0.07 Ампера) или с шагом 0.02 Ампера (от 0 Ампер до 0.06 Ампер или до 0.08 Ампер). Все три варианта одинаково приемлемы. Выберем второй вариант.

Если график строится без помощи компьютера, то нужно выбрать величину расстояния между соседними метками в миллиметрах миллиметровки или в клетках, если бумага в клетку. При выборе нужно следить за тем, чтобы график получился достаточно квадратным и чтобы расстояние между соседними метками выражалось круглым числом сантиметров (или клеток) или удвоенным или упятеренным круглым числом. Никогда не делайте расстояние между метками в три клетки или пятнадцать миллиметров (тем более в полторы, шесть или семь клеток). В нашем примере выберем расстояние между соседними метками 2 см по каждой оси.

Возьмем бумагу в клетку, нарисуем оси координат, расставим метки по осям, поставим точки на плоскости, соответствующие экспериментальным значениям тока и напряжения. Каждую экспериментальную точку на графике нужно обозначить крестиком, размер которого по горизонтали и вертикали соответствует погрешностям измерения данной точки.



Теперь через экспериментальные точки нужно провести линию графика. Линия не должна быть ломаной, она не должна соединять центры всех точек. Линия должна быть плавной. Если Вы считаете, что точки должны лежать на прямой линии, то можно приложить линейку и, подобрав на глаз наклон и смещение, провести прямую. Если точки не обязаны лежать на прямой линии, то проведите плавную линию с тем количеством изгибов, которые, по Вашему мнению, не случайны, а соответствуют природе явления.



Если график строится с помощью компьютера, то возможно Вы не знаете, как поставить крестики нужного размера, и как провести плавную кривую. Пусть тогда

компьютер не рисует ни того, ни другого. Экспериментальные точки пусть только наметит маленькими точками, а крестики нужного размера и плавную кривую (или прямую) нарисуйте авторучкой.

Если все значения какой-то переменной смещены далеко от нуля, то изображение ортогональной оси можно провести не через нулевую точку данной переменной, а через удобную смещенную точку, но только совпадающую с одной из меток оси.

Ни в коем случае не отмечайте на осях графика значения экспериментальных точек, отмечайте только круглые значения меток. Некоторые студенты умудряются откладывать по осям не экспериментальные значения, а номера точек. А значения приписывают по осям вместо меток. В результате независимо от природы измеряемых величин получается прямая линия под 45 градусов. Надеюсь, Вы так делать не будете.

Электрические работы.

Многие лабораторные работы из тех, что Вам придется выполнить, связаны с электрическими измерениями. Это так называемые электрические работы. Они имеют свою специфику.

Электрические лабораторные работы выполняются за лабораторными столами. На каждом из таких столов указан номер лабораторной работы и собраны все необходимые для выполнения работы приборы. В выдвижном ящике стола находятся провода, концы которых приспособлены для подключения к клеммам элементов электрической схемы. Проводов должно быть достаточно для работы.

На лабораторный стол выведены клеммы, на которые может быть подано напряжение, необходимое для выполнения данной лабораторной работы. Напряжение подается включением рубильника, номер которого указан на лабораторном столе. Ни в коем случае не включайте рубильник сами. Сначала Вы собираете электрическую схему, соответствующую данной работе, затем преподаватель (или лаборант) проверяет правильность схемы. И только после этого преподаватель, а не Вы, включает рубильник.

Учебная лаборатория постепенно переходит на новые настольные источники питания вместо старых источников, где питание подавалось через рубильник к клеммам на лабораторном столе. Теперь обычно используются источники питания до 50 Вольт DC POWER SUPPLY HY5003 или до 30 Вольт DC POWER SUPPLY HY3003.

Настольный источник питания включается и выключается нажатием кнопки Power. Выход источника питания оформлен в виде трех клемм. Средняя клемма в работах не используется. Две крайние клеммы источника обозначены знаками "-" (левая клемма) и "+" (правая клемма).

В источнике питания можно одновременно задавать значения стабилизации напряжения и тока. Ручками под надписью Current (сила тока), Fine (тонкая регулировка) и Coarse (грубая регулировка), можно задать стабилизируемое значение силы тока источника. Ручками под надписью Voltage (напряжение), Fine (тонкая регулировка) и Coarse (грубая регулировка), можно задать стабилизируемое напряжение источника.

Силу тока и напряжение источник стабилизирует не одновременно, а или – или. Если нагрузка, подсоединенная к источнику, потребляет мало тока (меньше, чем заданное ручками стабилизируемое значение), то источник стабилизирует выходное напряжение между клеммами "-" и "+". При этом светится индикаторный светодиод под надписью Voltage (напряжение). Если уменьшать сопротивление нагрузки, то ток источника возрастает. Когда ток источника достигает заданного ручками значения тока стабилизации, источник переключается из режима стабилизации напряжения в режим стабилизации силы тока. При этом загорается индикаторный светодиод под надписью Current (сила тока). В результате напряжение источника, и сила тока ограничены заданными ручками значениями.

Прежде чем собирать любую схему на столе Вы должны нарисовать принципиальную электрическую схему в Вашем рабочем журнале. Нарисовать схему в журнале Вы должны

заранее во время домашней подготовки к лабораторной работе. Преподаватель проверяет правильность собранной Вами схемы, сравнивая ее со схемой в Вашем рабочем журнале.

Сборка, как и проверка, схемы происходит по следующему алгоритму. Сначала нужно собрать основную токовую цепь схемы, цепь, по которой течет наибольший ток. Начните от одной из клемм источника напряжения и закончите на другой клемме. Затем присоедините к этой цепи другие цепи вспомогательных токов. В последнюю очередь присоедините вольтметры для контроля напряжения. При таком алгоритме Вы, по крайней мере, никогда не соберете схему, в которой ток течет в никуда.

Если схема содержит измерительные приборы постоянного тока, то следите за полярностью их включения: плюс амперметра к плюсу источника, плюс вольтметра, тоже к плюсу источника.

Большинство электрических схем содержат в качестве элементов схемы переменные резисторы. В учебной лаборатории используются переменные резисторы двух типов: реостаты и магазины сопротивлений. Реостаты рассчитаны на большие токи (величина максимального тока указана на реостате) и имеют три клеммы. Реостат представляет собой нихромовую проволоку, намотанную на керамический цилиндр. Края нихромовой проволоки соединены с двумя нижними клеммами реостата. С верхней клеммой соединен перемещаемый скользящий контакт, который может быть соединен с любым местом нихромовой проволоки. Реостат может быть подключен к электрической схеме двумя или всеми тремя клеммами.

В отличие от реостата магазин сопротивлений подключается к схеме только двумя клеммами. Величина сопротивления между этими клеммами может быть задана с высокой точностью (класс точности "0,2") с помощью переключателей магазина. Магазин сопротивлений имеет шесть десятипозиционных переключателя. Положения каждого переключателя нумеруются от 0 до 9. Левый переключатель в дальнем ряду устанавливает величину сопротивления между клеммами магазина с шагом 10000 Ом, средний переключатель в дальнем ряду — с шагом 1000 Ом, и т.д. Сопротивления, установленные разными переключателями магазина, суммируются. В результате каждый переключатель оказывается ответственен за одну из десятичных цифр величины сопротивления подключенного между клеммами магазина. Магазин имеет четыре клеммы. Левая из них всегда является одной из подключенных к схеме клемм. Второй подключаемой клеммой почти всегда служит клемма с надписью 99999,9. В редких случаях, когда величина требуемого переменного сопротивления не превышает 9,9 Ом или 0,9 Ом, второй подключаемой клеммой служит одна из двух оставшихся клемм. Это сделано, чтобы уменьшить сопротивление контактов, которое при малых сопротивлениях магазина может заметно изменять его величину. При подключении второго контакта к клемме 9,9 или к клемме 0,9 старшие разряды (и их контакты) сопротивления магазина оказываются отключенными от схемы, и их положение не влияет на величину сопротивления магазина.

Если собираемая Вами схема содержит реостаты (или магазины сопротивлений), то прежде чем обратиться к преподавателю с просьбой о проверке схемы, установите движок каждого реостата (переключатели магазина сопротивлений) в наиболее безопасное начальное положение. Не ставьте движок в крайнее положение, чтобы в случае Вашей ошибки у Вас или у Вашего преподавателя хватило времени реакции выключить схему до ее перегорания.

Один и тот же электрический прибор, например амперметр, может использоваться для измерения токов различающихся по величине на несколько порядков. С этой целью амперметр может быть снабжен переключателем диапазонов. Переключатель имеет метку в виде клюва или точки. При повороте переключателя напротив его метки оказываются разные числа. Например, для трехдиапазонного амперметра они могут быть равны 0,25; 0,5 и 1,0. Это соответствует тому, что вся шкала прибора, например 100 делений, в первом положении переключателя соответствует силе тока 0.25 Ампера, во втором положении — 0.5 Ампера, и

в третьем — 1.0 Ампера. Работая с таким прибором, удобно записывать показания прибора в делениях шкалы, а не в Амперах. Измеренные значения делений шкалы позднее можно будет пересчитать в Амперы, если только Вы не забудете записать значение диапазона, на котором производились измерения. Поэтому перед началом измерений запишите значение всей шкалы прибора в делениях и в Амперах (для амперметра). Иногда для работы в различных диапазонах прибора используется подключение к различным клеммам прибора. При этом одна из клемм используется при любом виде подключения и обозначается звездочкой "*" или знаком общий провод "⊥" или знаком "—", если это прибор постоянного тока. Обычно это левая клемма. В качестве второй клеммы может быть любая из оставшихся клемм. При этом напротив каждой из оставшихся клемм указано значение, соответствующее всей шкале прибора (в Амперах или Вольтах).

Обратите внимание, что некоторые амперметры и вольтметры предназначены для измерений только постоянных токов (и напряжений), а другие приборы годятся как для постоянных, так и для переменных токов. Реже бывают приборы, предназначенные только для переменных токов. На приборах для постоянных токов есть горизонтальная черточка "—", а на клеммах указана полярность включения "—" и "+". На приборах, предназначенных только для цепей переменного тока, указан знак в виде волны "~". Деления на шкале такого прибора обычно расположены неравномерно, начальный участок шкалы сильно сжат. Такой же вид имеют шкалы приборов, предназначенных как для переменных, так и для постоянных токов. Приборы последнего типа обозначают двумя знаками "—" и "~", расположенными один под другим.

Некоторые электрические приборы имеют рядом со шкалой под стрелкой зеркальную полосу — это так называемая зеркальная шкала. Дело в том, что стрелка прибора находится не вплотную к шкале, а несколько приподнята над шкалой прибора. Если Вы смотрите на стрелку прибора не вертикально вниз, а несколько справа или слева, то напротив стрелки оказывается соответственно несколько меньшее или несколько большее показание шкалы. Зеркальная шкала служит для уменьшения погрешности отсчета связанной с тем, что смотреть на стрелку прибора можно из разных направлений. В приборе с зеркальной шкалой на стрелку нужно смотреть одним глазом и так, чтобы стрелка прибора проходила посередине отражения зрачка глаза в зеркале шкалы.

Крылов Игорь Ратмирович

Составленные мною дополнительные указания к лабораторным работам можно найти на сайте:

<http://igor-krylov.narod.ru/Laba.htm>

Описания многих лабораторных работ можно найти на каждом из двух идентичных сайтов:

<http://genphys1.phys.spbu.ru/physlab1.html>

<http://qelectr-phys-spbu.narod.ru/physlab1.html>

Подсказки к работе с программным пакетом Origin можно найти на сайте:

<http://helplab1.narod.ru/>