

Центр по работе с одаренными детьми

*Методические рекомендации по
проведению лабораторного практикума
для подготовки к экспериментальному
туру олимпиад в 10 классе*

Составители: Сазонов А.Р.,
Токарева Н.С.

2013 г

Содержание

Введение	3
Указания к выполнению заданий экспериментального тура олимпиады по физике.	4
Этапы выполнения работы.	4
Подготовка таблиц для записи экспериментальных результатов и их обработки.	8
Погрешность измерения.....	9
Построение графиков	13
Сессия 1	18
Лабораторная работа № 1. Пинг-понг.	18
Лабораторная работа № 2. Ускорение шарика.	18
Лабораторная работа № 3. Намокание.....	18
Сессия 2	20
Лабораторная работа № 1. Монетки.	20
Лабораторная работа № 2. Энергия вращения.....	20
Лабораторная работа № 3. Негуковская резинка.....	20
Сессия 3	21
Лабораторная работа № 1. Избыточное давление.	21
Лабораторная работа № 2. Мыльный пузырь.	21
Указания к выполнению	22
Сессия 1.....	22
Сессия 3.....	24
Литература.	25

Введение

Поскольку экспериментальные задачи являются обязательной частью физических олимпиад, то приобретение навыков решения таких задач – одна из необходимых составляющих подготовки учащихся к олимпиадам.

Задание экспериментального тура заметно отличается от постановки традиционных лабораторных работ школьного курса, поскольку его целью является *исследование* физического явления. При решении олимпиадной экспериментальной задачи учащийся должен сам придумать, как ему провести измерения, выбрать наилучшую методику, а затем обработать полученные экспериментальные данные и оценить точность полученных результатов.

В связи с тем, что при обучении физике в школе практически не уделяется внимание развитию экспериментальных навыков учащихся, решение задач практического тура вызывает значительные затруднения у школьников.

В данном пособии для учащихся 10 классов общеобразовательных школ, проходящих подготовку в Центре по работе с одаренными детьми ГБОУ РМЭ «Многопрофильный лицей-интернат», содержатся указания к выполнению практических заданий, включая основные этапы выполнения работы, обработку и графическое представление результатов. А также задания лабораторного практикума трех сессий, часть которых имеет подробное решение.

Указания к выполнению заданий экспериментального тура олимпиады по физике.

Этапы выполнения работы.

Каждое экспериментальное задание имеет свои собственные специфические особенности, которые могут потребовать особых подходов в решении. Однако знание общих методов проведения экспериментальных исследований не сможет навредить. Поэтому рассмотрим основные традиционные этапы выполнения экспериментального задания.

1. Ознакомление с условием задания и предлагаемым оборудованием.

По ходу внимательного изучения условия задачи необходимо четко уяснить смысл предлагаемого задания, понять его основные этапы, увидеть взаимосвязи между различными его частями.

Обязательно следует сразу ознакомиться с перечнем предлагаемого оборудования, убедиться в его наличии, вспомнить название и назначение каждого прибора.

В результате изучения условия следует предельно конкретно сформулировать цели, которые должны быть достигнуты в ходе выполнения каждого пункта задания. Эта проблема отпадает, если задание требует определение численного значения какой-либо физической величины. В том же случае, когда задача заключается в изучении какого-либо закона, либо в экспериментальной проверке формулы, требуется конкретизация – какие именно зависимости следует получить.

2. Построение математической модели изучаемого явления (теоретическое описание).

Экспериментальное задание, как правило, не требует решения сложных теоретических задач. Однако вид исследуемых зависимостей желательно знать заранее.

Следует подумать о возможном упрощении полученных функций, о возможности их линеаризации. Заметим, что графическое представление полученных результатов является почти обязательным, а обработка линейных зависимостей значительно проще всех остальных.

В ходе теоретического анализа необходимо выяснить, численные значения каких физических параметров необходимо знать (или измерять) обязательно, а без каких можно обойтись.

Здесь нелишне запомнить одну из заповедей экспериментатора: *чем меньше величин надо измерять, тем лучше схема эксперимента*. Уменьшение числа измеряемых параметров упрощает эксперимент, сокращает время его проведения, как правило, повышает точность и достоверность полученных результатов.

Результатом теоретического анализа должен быть план проведения измерений – какие физические величины и зависимости должны быть измерены, с какой точностью, каким методом полученные результаты будут обрабатываться. Не вредно также представить себе примерные численные значения ожидаемых результатов.

3. Разработка схемы экспериментальной установки, ее реализация, проведение предварительных измерений.

Следует подготовить предварительный эскиз экспериментальной установки, на которой следует измерять те величины, которые фигурируют в ранее разработанном плане.

При непосредственной сборке экспериментальной установки следует стремиться к ее надежности, устойчивости, удобству работы.

Проведение предварительных измерений является обязательным условием успешного выполнения задания – эта недолгая процедура позволяет проверить работоспособность установки, выявить наличие ожидаемых эффектов, оценить диапазоны изменения варьируемых параметров, оценить достижимость требуемой точности, или вернуться к разработке иного теоретического описания.

4. Проведение измерений.

Настоятельно рекомендуется вести аккуратную запись полученных данных. Заранее подготовленная таблица для записи *существенно экономит время*, как при проведении эксперимента, так и на этапе обработки его результатов.

При исследовании зависимостей необходимо варьировать в максимально возможных пределах задаваемые параметры – стремиться расширить диапазон их изменения. По меньшей мере, расширение диапазона повышает точность окончательного результата, не говоря уже о том, что больший диапазон внушает больше доверия к обоснованности теоретических построений.

Если теоретическая модель предсказывает линейную зависимость, то это не значит, что экспериментально достаточно снять показания для двух точек (даже на предельных значениях параметров)! Во-первых, где гарантия, что эти точки не окажутся в чем-то особенными? Во-вторых, ваша теоретическая модель может не подтверждаться экспериментально, и зависимость на самом деле не линейна. В-третьих, увеличение числа точек увеличивает точность измерений.

Снимая показания приборов, записывайте результаты с той максимальной точностью, которую обеспечивает ваша установка - отбросить лишние цифры вы всегда успеете. Конечно, если вы заранее, в ходе предварительных измерений оценили точность окончательного результата, то показания приборов сразу можно округлять, не забывая все же оставить одну запасную цифру.

Очень полезно в ходе измерений постоянно мысленно анализировать получаемые данные. Может быть, ваши данные вынудят вас остановиться, и, не теряя напрасно времени, пересмотреть свой план эксперимента. Однако к этому совету относитесь с осторожностью - вполне возможно, что надежно полученные результаты натолкнут вас на новые оригинальные идеи, как в теоретическом описании, так и в продолжение эксперимента.

5. Обработка результатов измерений.

Обработка результатов измерений включает в себя:

- вычисление численного значения измеряемых физических величин;
- оценку их погрешностей;

- правильное округление результата;
- грамотное построение графиков;
- обработку графических зависимостей.

Не следует сильно увлекаться расчетом погрешностей, но нельзя им пренебрегать - любой эксперимент без оценки погрешностей *имеет нулевую ценность*.

К сожалению, достаточно часто встречаются работы, в которых расчет погрешностей занимает основное место, явно в ущерб ее содержательной части; еще большее сожаление вызывают работы, в которых результаты измерения по методу «на глазок» приведены с десятью значащими цифрами.

Последний, но возможно самый важный совет: будьте честны перед собой – подгонка результатов (как умышленная, так и неумышленная) иногда может принести несколько лишних баллов, но чаще видна не вооруженным глазом (особенно если авторы задания заложили некоторый подвох), и не к чему хорошему не приводит.

6. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами.

Ценность любого физического исследования обусловлена разумным согласованием теоретических и экспериментальных результатов. Поэтому логичным завершением эксперимента является сравнение полученных данных с результатами теоретического анализа. Трудно ожидать полного соответствия между ними – причины возможных расхождений могут быть самыми различными: погрешности измерений, недостаточная точность методов измерений, влияние побочных факторов, приближенность теоретической модели и т.д. Поэтому необходимо провести качественный анализ полученных результатов и сделать обоснованные выводы типа:

- эксперимент полностью подтверждает теоретические данные (что маловероятно);
- экспериментальные данные в пределах погрешности измерений совпадают с теоретическими расчетами (оптимальный вариант);
- эксперимент качественно подтверждает теорию (тоже неплохо);
- экспериментальные данные опровергают теоретическую модель.

В любом случае полезно указать основные причины возможных расхождений и, возможно, найти способы устранения имеющихся расхождений. Особое внимание следует обратить на экспериментальное обоснование сложных теоретических зависимостей: линейная зависимость проявляется гораздо нагляднее, чем замысловатые теоретические построения.

7. Оформление работы.

Правила олимпиады не предусматривают каких-либо жестких правил оформления работы. Тем не менее, имеется несколько общих рекомендаций.

Не следует стремиться к тому, чтобы работа занимала десятки страниц, так как, во-первых, на это просто может не хватить времени, во-вторых, подробные описания и арифметические выкладки не всегда интересны, наконец, следует просто пожалеть проверяющих, которым предстоит прочитать не только вашу работу.

К сожалению, часто бывает, что участник олимпиады не успевает полностью оформить работу, поэтому советуем приступать к оформлению каждого пункта задания, непосредственно после его выполнения.

Перечислим и кратко охарактеризуем, что должно содержаться в грамотно оформленной работе.

- название работы (или одного из пунктов задания);
- формулировка цели не должна дословно повторять название работы, а конкретизировать ее;
- в теоретическом описании необходимо кратко изложить вывод тех формул, которые в дальнейшем будут использованы как для экспериментальной проверки, так и для расчетов требуемых физических величин; эта часть работы должна заканчиваться выводами о том, какие физические величины, зависимости должны быть измерены, как будут обрабатываться результаты;
- схема установки должна присутствовать в работе, достаточно указать основные элементы вашей установки, обеспечивающие измерение нужных физических величин; из схемы должны быть понятны все методики измерения; при проведении электрических измерений необходимо привести принципиальную электрическую схему с использованием стандартных обозначений;
- все результаты измерений, которые вы считаете необходимыми, должны быть представлены в одной или нескольких таблицах результатов измерений; обработку результатов прямых измерений удобно также представлять в виде граф таблицы (при этом необходимо указать формулы, по которым проводилась такая обработка);
- описание обработки результатов косвенных измерений также должно быть предельно кратким – достаточно записать расчетные формулы (или сослаться, если они приведены в теоретическом описании) и привести конечные результаты, не забыв при этом их правильно округлить и записать;
- сделайте выводы из своей работы: если цель работы получить численное значение – приведите его (число, погрешность, размерность); если следует получить зависимость – сформулируйте полученный закон, можете дать его обоснование.

Подготовка таблиц для записи экспериментальных результатов и их обработки.

Как указывалось выше, удобство использования таблиц окупают затраты времени на ее подготовку. Кроме удобства ведения записей, таблицы позволяют быстро оценить ход работы, выявить возможные ошибки эксперимента, и, что немаловажно, их подготовка помогает осмыслить организацию выполнения задания в целом.

Приведем некоторые рекомендации. Во-первых, таблиц не должно быть слишком много, например, не следует записывать результаты каждого эксперимента в отдельную таблицу, если можно записать в одну, указав в специальном столбце (или строке) номер эксперимента. Если позволяет место, в этой же таблице можно привести результаты промежуточных расчетов и расчет погрешностей. В ином случае результаты обработки данных надо оформить отдельной таблицей.

Во-вторых, обязательно укажите наименование каждого столбца (словами не обязательно, можно физическим символом, если его значение общеизвестно, или указано в работе выше) с указанием размерности. В некоторых случаях в наименовании столбца удобно привести формулу, по которой будут рассчитываться его значения.

Погрешность измерения

Типы погрешностей.

Любые измерения всегда производятся с какими-то погрешностями, связанными с ограниченной точностью измерительных приборов, неправильным выбором, и погрешностью метода измерений, физиологией экспериментатора, особенностями измеряемых объектов, изменением условий измерения и т.д. Поэтому в задачу измерения входит нахождение не только самой величины, но и погрешности измерения, т.е. интервала, в котором вероятнее всего находится истинное значение измеряемой величины. Например, при измерении отрезка времени t секундомером с ценой деления $0,2$ с можно сказать, что истинное значение его находится в интервале от $t_1 = (t - 0.2)$ с до $t_2 = (t + 0.2)$ с. Таким образом, измеряемая величина всегда содержит в себе некоторую погрешность $\Delta x = X - x$, где X и x – соответственно истинное и измеренное значения исследуемой величины. Величина Δx называется *абсолютной погрешностью* (ошибкой) измерения, а выражение $\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%$, характеризующее точность измерения, называется *относительной погрешностью*.

Вполне естественно стремление экспериментатора произвести всякое измерение с наибольшей достижимой точностью, однако такой подход не всегда целесообразен. Чем точнее мы хотим измерить ту или иную величину, тем сложнее приборы мы должны использовать, тем больше времени потребуют эти измерения. Поэтому точность окончательного результата должна соответствовать цели проводимого эксперимента. Теория погрешностей дает рекомендации, как следует вести измерения и как обрабатывать результаты, чтобы величина погрешности была минимальной.

Все возникающие при измерениях погрешности обычно разделяют на три типа – систематические, случайные и грубые ошибки (промахи).

Систематические погрешности обусловлены ограниченной точностью изготовления приборов (приборные погрешности), недостатками выбранного метода измерений, неточностью расчетной формулы, неправильной установкой прибора и т. д. Таким образом, систематические погрешности вызываются факторами, действующими одинаковым образом при многократном повторении одних и тех же измерений. Величина этой погрешности систематически повторяется либо изменяется по определенному закону. Некоторые систематические ошибки могут быть исключены (на практике этого всегда легко добиться) путем изменения метода измерений, введение поправок к показаниям приборов, учета постоянного влияния внешних факторов.

Хотя систематическая (приборная) погрешность при повторных измерениях дает отклонение измеряемой величины от истинного значения в одну сторону, мы никогда не знаем в *какую именно*. Поэтому приборная погрешность записывается с двойным знаком

Случайные погрешности вызываются большим числом случайных причин (изменением температуры, давления, сотрясения здания и т.д.), действия которых на каждое измерение различно и не может быть заранее учтено. Случайные погрешности происходят также из-за несовершенства органов чувств экспериментатора. К случайным погрешностям относятся и погрешности обусловленные свойствами измеряемого объекта.

Исключить случайные погрешности отдельных измерений невозможно, но можно уменьшить влияние этих погрешностей на окончательный результат путем проведения многократных измерений. Если случайная погрешность окажется значительно меньше приборной (систематической), то нет смысла дальше уменьшать величину случайной погрешности за счет увеличения числа измерений. Если же случайная погрешность больше приборной, то число измерений следует увеличить, чтобы уменьшить значение случайной погрешности и сделать ее меньше или одного порядка с погрешностью прибора.

Промахи, или грубые ошибки, – это неправильные отсчеты по прибору, неправильная запись отсчета и т.п. Как правило, промахи, обусловленные указанными причинами хорошо заметны, так как соответствующие им отсчеты резко отличаются от других отсчетов. Промахи должны быть устранены путем контрольных измерений. Таким образом, ширину интервала в котором лежат истинные значения измеряемых величин, будут определять только случайные и систематические погрешности.

Оценка погрешности.

При прямых измерениях значение измеряемой величины отсчитывается непосредственно по шкале измерительного прибора. Ошибка в отсчете может достигать нескольких десятых долей деления шкалы. Обычно при таких измерениях величину систематической погрешности считают равной половине цены деления шкалы измерительного прибора. Например, при измерении штангенциркулем с ценой деления 0,05 мм величина приборной погрешности измерения принимают равной 0,025 мм.

Цифровые измерительные приборы дают значение измеряемых ими величин с погрешностью, равной значению одной единицы последнего разряда на шкале прибора. Так, если цифровой вольтметр показывает значение 20,45 мВ, то абсолютная погрешность при измерении равна $\pm 0,01$ мВ.

Систематические погрешности возникают и при использовании постоянных величин, определяемых из таблиц. В подобных случаях погрешность принимается равной половине последнего значащего разряда. Например, если в таблице значение плотности стали дается величиной, равной $7,9 \cdot 10^3$ кг/м³, то абсолютная погрешность в этом случае равна $\pm 0,1$ кг/м³.

Для оценки случайных погрешностей необходимо провести многократные измерения (серию экспериментов) a_i (где i – номер эксперимента) искомой величины a . тогда за приближенное значение измеряемой величины берут среднее арифметическое

$$a_{\text{cp}} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}$$

Чем больше будет проведено экспериментов, тем ближе будет среднее арифметическое к истинному значению измеряемой величины.

Среднее арифметическое, вообще говоря, не совпадает с истинным значением измеряемой величины. Как же найти границу интервала, в котором находится истинное значение? Эта граница называется границей случайной погрешности $-\Delta a_{\text{cp}}$.

В случае самых простых измерений (например, измерение длины линейкой) можно считать, что

$$\Delta a_{\text{cp}} = \frac{\Delta a_1 + \Delta a_2 + \dots + \Delta a_n}{n},$$

где Δa_{cp} – среднее отклонение от среднего, $\Delta a_1 = |a_{cp} - a_1|$, $\Delta a_2 = |a_{cp} - a_2|$ и т. д. Результат записывается в виде:

$$a = a_{cp} \pm \Delta a_{cp}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta a_{cp}}{a_{cp}} \cdot 100\%$$

В более общем случае Δa_{cp} определяем следующим образом.

$$\Delta a_{cp} = t \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - a_{cp})^2}{n(n-1)}}$$

где Δa_{cp} – среднеквадратичное отклонение от среднего,

$$\sum_{i=1}^n (a_i - a_{cp})^2 = (a_1 - a_{cp})^2 + (a_2 - a_{cp})^2 + \dots + (a_n - a_{cp})^2,$$

n – количество экспериментов в серии,

t – коэффициент Стьюдента.

Таблица ниже содержит некоторые значения коэффициента Стьюдента.

n	p		
	0.90	0.95	0.99
2	6,3	12,7	63,7
3	2,9	4,3	9,9
5	2,1	2,8	4,6
10	1,8	2,3	3,3

Здесь n – количество экспериментов в серии, p – доверительная вероятность, то есть вероятность того, что истинное значение попадает в интервал Δa_{cp} . Как видно, при высоких значениях p и малом количестве экспериментов n , значение Δa_{cp} оказывается большим настолько, что измерение теряет смысл.

Граница случайной погрешности среднего значения стремится к нулю при увеличении числа опытов в серии. Это не значит, однако, что можно проводить абсолютно точные измерения – ведь приборы, с помощью которых мы получили результаты, также имеют погрешности. Поэтому погрешность среднего при бесконечном увеличении числа опытов стремится к погрешности прибора.

Очевидно, что число опытов имеет смысл выбрать таким, чтобы случайная погрешность среднего сравнялась с погрешностью прибора, либо стала меньше ее. Дальнейшее увеличение числа измерений теряет смысл, так как не увеличивает точность получаемого результата.

В ходе измерений по разным причинам приходится проводить округление результата, в связи с чем, неизбежно появление ошибки округления. Величина этой ошибки принимается равной половине интервала округления. Например, если показания амперметра вы округляете до 0,1 А, то погрешность округления принимается равной 0,05А.

Полная погрешность прямого измерения (объединяющая все типы ошибок) имеет вид

$$\Delta a = \sqrt{(\Delta a_{сист})^2 + (\Delta a_{случ})^2 + (\Delta a_{округл})^2}$$

Здесь $\Delta a_{сист}$ – систематическая (приборная) ошибка,

$\Delta a_{\text{случ}}$ – случайная ошибка,

$\Delta a_{\text{округл}}$ – ошибка округления.

Если окончательный экспериментальный результат получается в ходе вычислений над результатами прямых измерений, то такое измерение называется косвенным. В таком случае значение Δa удобно определять с использованием относительной погрешности ε .

Допустим, в эксперименте измеряются величины a и b , погрешность измерения которых Δa и Δb , соответственно, $\varepsilon_a = \frac{\Delta a}{a}$ и $\varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b}$ определены. Тогда для расчета искомой величины можно придерживаться правил, собранных в таблице:

№	Формула вычисления физической величины x	Относительная погрешность вычисления, ε	Абсолютная погрешность вычисления, Δx
1	$x = a + b$	$\varepsilon = \frac{\sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2}}{a + b}$	$\Delta x = \sqrt{(\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$
2	$x = a - b$	$\varepsilon = \frac{\sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2}}{a - b}$	$\Delta x = \sqrt{(\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$
3	$x = a \cdot b$	$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_a^2 + \varepsilon_b^2}$	$\Delta x = \varepsilon \cdot x$
4	$x = \frac{a}{b}$	$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_a^2 + \varepsilon_b^2}$	$\Delta x = \varepsilon \cdot x$

Например, требуется определить площадь сечения проволоки. Методом рядов найден ее радиус r . Поскольку $S = \pi r^2$, то есть $S = \pi(r \cdot r)$, то подходит правило под номером 3. Получим

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_r^2 + \varepsilon_r^2} = \sqrt{2\varepsilon_r^2} = \sqrt{2} \cdot \frac{\Delta r}{r}$$

и

$$\Delta S = \varepsilon \cdot S = \sqrt{2} \cdot \frac{\Delta d_{\text{ср}}}{d_{\text{ср}}} \cdot S$$

Построение графиков

Для чего нужны графики?

В экспериментальной физике графиками пользуются для разных целей. Во-первых, графики строят, чтобы определить некоторые величины, – обычно наклон или отрезок, отсекаемый на оси координат, прямой, изображающей зависимость между двумя переменными. Хотя в элементарных курсах физики упор часто делается именно на это, на самом деле роль графика здесь сравнительно невелика, так как есть методы, позволяющие определять эти величины более надежно не по графикам, как таковым, а по исходным числовым данным. Непосредственно же по графику определить наклон можно только в том случае, если провести через точки на глаз наилучшую прямую. Это довольно грубый метод. Его не следует сбрасывать со счета, но он пригоден лишь тогда, когда мы оцениваем результат, полученный наиболее точным методом или когда наклон кривой не очень важен для окончательного результата.

Во-вторых, и это, пожалуй, самое главное, – графиками пользуются для наглядности. Графики позволяют также более наглядно проводить сравнение экспериментальных данных с теоретической кривой. Нанося результаты измерений на график, очень удобно следить за тем, как идет эксперимент.

В-третьих, графиками пользуются в экспериментальной работе, чтобы установить эмпирическое (т. е. полученное из опыта) соотношение между двумя величинами.

Масштаб

В физике на графиках принято по горизонтальной оси откладывать независимую переменную, т.е. величину, значение которой задает сам экспериментатор, а по вертикальной оси – ту величину, которую он при этом определяет. Короче говоря, по горизонтали откладывается «причина», а по вертикали – «следствие».

Существуют различные виды бумаги для графиков, но из них в физике наиболее употребительны два: с обычным линейным масштабом (миллиметровая) и логарифмическая.

Допустим, что мы взяли миллиметровую бумагу. При выборе масштаба нужно исходить из следующих соображений:

- Экспериментальные точки не должны сливаться друг с другом. Из рисунка 2 довольно трудно извлечь полезную информацию. Поэтому лучше выбирать такой масштаб, чтобы расположить точки с разумным интервалом, как на рис. 3. Если начальные значения x и y отличаются намного от нуля, то предпочтительнее начинать отсчет делений на соответствующей оси с некоторого значения, которое лишь немногим меньше найденного на опыте наименьшего значения переменного, откладываемого на данной оси, иначе на графике будет необоснованно много пустого места. После нанесения масштабных делений на осях около них пишут необходимые цифры;
- Масштаб должен быть простым. Проще всего, если единице измеренной величины (или 10; 100; 0,1 единицы и т.д.) соответствует 1 см. Можно также выбрать такой масштаб, чтобы 1 см соответствовал 2 или 5 единицам. Других масштабов следует

избегать просто потому, что иначе при нанесении точек на график придется производить арифметические подсчеты в уме;

- Иногда приходится выбирать масштаб из теоретических соображений. Так, если нас интересует, в какой мере результаты удовлетворяют соотношению $y = kx$, то на нашем графике зависимости y от x обязательно должно быть начало координат.

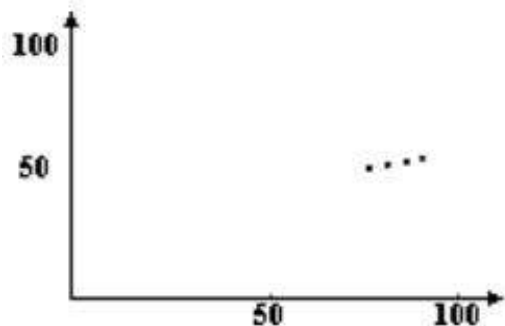


Рис. 2. Неудачный выбор масштаба.

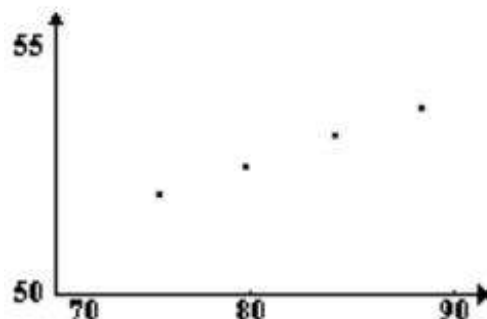


Рис. 3. Более удачный выбор масштаба.

Единицы измерения

Десятичный множитель удобнее отнести к единице измерения. Тогда деления на графике можно помечать цифрами 1, 2, 3 ... или 10, 20, 30 ..., а не 10000, 20000 и т. д., или 0,0001, 0,0002 и т.д. На осях координат следует указать название или символ (или то и другое). Единицы измерений нужно указывать следующим способом, десятичный множитель относить к единице и делать надписи вдоль осей график:

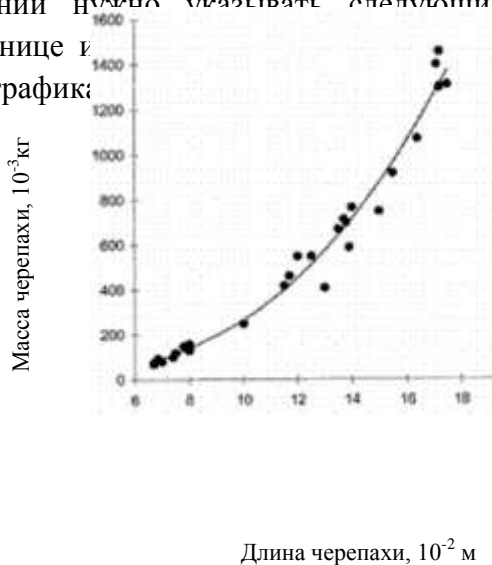


Рис. 4. Экспериментальный график с указанием единиц измерения и кратных единиц.

Как строить графики

Графики делают в основном для того, чтобы наглядно представить результаты эксперимента, и потому они должны быть предельно ясными. Ниже дан ряд общих советов по вычерчиванию графиков. Пользоваться ими нужно с учетом особенностей каждого конкретного случая.

- Когда на графике для сравнения с экспериментальными данными проводят теоретическую кривую, то точки, по которым ее проводят, выбирают по своему усмотрению. Наносить их надо без нажима, лучше всего карандашом, чтобы при необходимости можно было стереть. Экспериментальные же данные следует

отмечать жирными, хорошо выделяющимися точками. Примеры смотри на рис. 5 и 6.

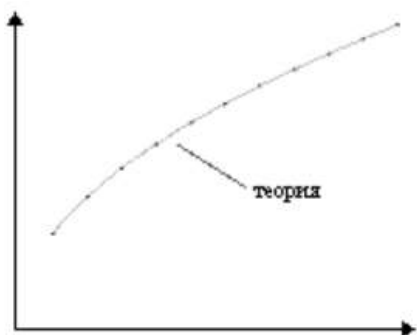


Рис. 5. Пример неудачного графика, на котором экспериментальные точки очень мелкие и не отличаются от расчетных точек, по которым проведена теоретическая кривая.

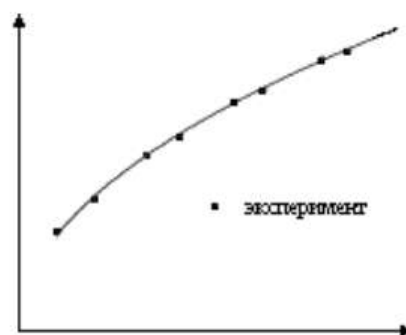


Рис. 6. Удачный вариант, расчетные точки не видны, а экспериментальные точки четко выделяются.

- Полезно иногда через экспериментальные точки проводить «наилучшую» плавную кривую. Обратите внимание на слово плавную. Начинающие нередко соединяют экспериментальные точки просто ломаной линией, как показано на рис.7. Но тем самым как бы указывается, что соотношение между двумя величинами носит скачкообразный характер, а это, вообще говоря, весьма маловероятно. Скорее следует ожидать, что данное соотношение описывается какой-либо плавной кривой (рис. 8), а отклонения точек вызваны «шумом» эксперимента, случайными ошибками при измерениях.



Рис. 7. Неверно проведенная «наилучшая линия».

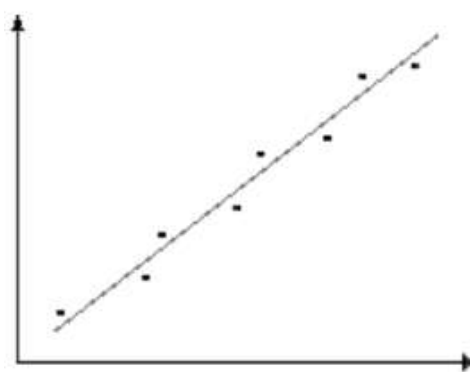


Рис. 8. Верно проведенная «наилучшая линия».

- При проведении кривой следует руководствоваться правилами:
 - чем больше изгибов и неровностей имеет кривая, тем она менее вероятна (выписывать изгибы можно лишь при высокой точности измерений);
 - проводить кривую следует так, чтобы она лежала возможно ближе к точкам и чтобы по обе стороны оказалось приблизительно равное их количество;
 - по возможности не должно быть очень больших отклонений точек от кривой, лучше иметь два-три небольших отклонения, чем одно большое.
- Если на графике имеется теоретическая кривая, то «плавную» кривую через экспериментальные точки лучше не проводить. Такая кривая, может быть, не совсем

соответствует фактическим данным, и тогда она будет мешать прямому сравнению эксперимента с теорией.

- Чтобы различать экспериментальные данные, относящиеся к разным условиям или разным веществам, можно воспользоваться разными значками, например, темными или светлыми кружками, крестиками, или точками разного цвета. Но при этом нужно знать меру: если график начинает выглядеть загроможденным, то лучше для каждой группы данных построить специальный график.
- Размечать деления на осях координат и наносить график экспериментальные точки лучше всего сначала карандашом. Вдруг вы решите изменить масштаб или окажется, что какая-либо точка случайно поставлена неверно.
- Если с масштабом и расположением точек все в порядке, то нетрудно обвести все тушью или чернилами и сделать жирные экспериментальные точки. В результате вам удастся избежать переделок и лишних затрат графической бумаги. По окончании построения пишут заголовок, который должен содержать краткое и точное содержание того, что показывает график.

Как указывать ошибки

Погрешность измерения – оценка отклонения измеренного значения величины от её истинного значения. Погрешность измерения является характеристикой (мерой) точности измерения. Термин «*ошибка измерения*» не рекомендуется применять как менее удачный.

Поскольку выяснить с абсолютной точностью истинное значение любой величины невозможно, то невозможно и указать величину отклонения измеренного значения от истинного. Возможно лишь оценить величину этого отклонения, например, при помощи статистических методов. На практике вместо истинного значения используют значение физической величины, полученное экспериментальным путем. Такое значение, обычно, вычисляется как среднее значение, полученное при статистической обработке результатов серии измерений. Это полученное значение не является точным, а лишь наиболее вероятным. Поэтому в измерениях необходимо указывать, какова их точность. Для этого вместе с полученным результатом указывается погрешность измерений. Например, запись $T = (2,8 \pm 0,1) \text{ с}$. означает, что истинное значение величины T лежит в интервале от 2,7 с до 2,9 с с некоторой оговорённой вероятностью.

В 2004 году на международном уровне был принят новый документ, диктующий условия проведения измерений и установивший новые правила сличения государственных эталонов. Понятие «погрешность» стало устаревать, вместо него было введено понятие «неопределённость измерений», однако допускается использовать термин погрешность для документов, использующихся в России.

Ошибку в экспериментальном значении графически можно указать следующим образом:

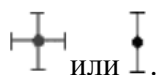


Рис. 9. Обозначение погрешности измерения на графике.

Экспериментальная точка находится в середине отрезка, изображающего величину ошибки. Поскольку нанесение таких значков – дополнительный труд и приводит к усложнению графика, это следует делать лишь в том случае, когда без такой информации

обойтись нельзя, т.е. когда от ошибок может зависеть значимость отклонения экспериментальных данных от теоретической кривой (см. рис. 10 и 11).

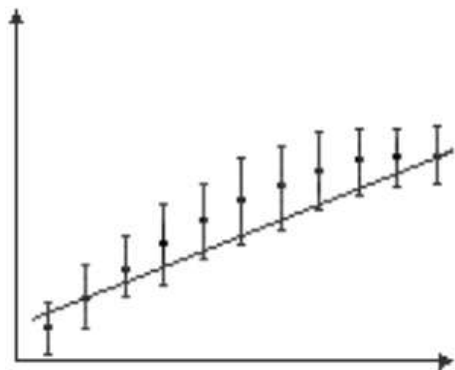


Рис. 10. Отклонение теории от эксперимента незначительно.

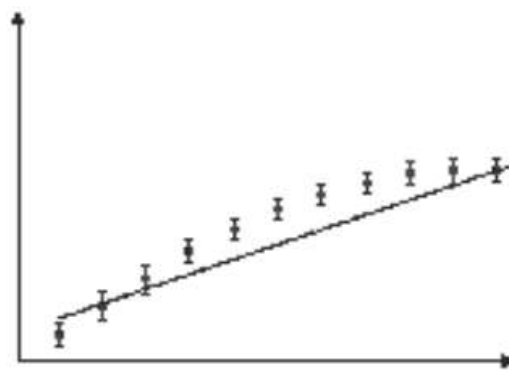


Рис. 11. Отклонение теории от эксперимента значительно.

Отклонения экспериментальных точек от прямой линии на обоих графиках одинаковы, но на рис. 10 отклонения вряд ли значимы, а на рис. 11, по-видимому, значимы.

Ошибки обычно указывают и еще в одном случае, – когда они неодинаковы для разных экспериментальных точек.

Сессия 1

Лабораторная работа № 1. Пинг-понг.

Задание

Определите, какую долю кинетической энергии теряет упругий шарик при однократном соударении с поверхностью стола. Исследуйте зависимость между величиной потери кинетической энергии и высотой падения шарика.

Цель работы:

- определить, какую долю кинетической энергии теряет упругий шарик при однократном соударении с поверхностью стола;
- определить погрешность измерения.

Приборы и инструменты:

- упругий шарик;
- штатив с лапкой;
- измерительная лента.

Лабораторная работа № 2. Ускорение шарика.

Задание

Исследуйте зависимость ускорения шарика, движущегося по наклонному желобу, от угла наклона желоба к горизонту.

Попробуйте определить силу трения шарика о бумагу исходя из теоретических соображений и данных эксперимента. Зависит ли она от угла наклона?

Цель работы:

- исследовать зависимость ускорения шарика, движущегося по наклонному желобу, от угла наклона желоба к горизонту;
- определить погрешность измерения.

Приборы и инструменты:

- шарик;
- лист бумаги;
- штатив с лапкой;
- секундомер;
- измерительная лента.

Лабораторная работа № 3. Намокание.

Задание

Закрепите вертикально в лапке штатива полоску фильтровальной бумаги, на которую нанесите шкалу с шагом 0,5 см. Нижнюю часть полоски опустите в воду. Вода начнет медленно подниматься по бумаге.

Исследуйте зависимость высоты подъема воды (длины намокшей части) от времени. Постройте график полученной зависимости. Сделайте предположение о виде этой зависимости.

Приборы и инструменты:

- лист фильтровальной бумаги;
- штатив с лапкой;
- секундомер;
- измерительная лента.

Сессия 2

Лабораторная работа № 1. Монетки.

Задание:

- определите, какая доля кинетической энергии монеты выделяется в виде теплоты при столкновении с другой монетой;
- определить погрешность измерения.

Приборы и инструменты:

- две монеты известной массы;
- линейка;
- лист бумаги;
- скотч.

Лабораторная работа № 2. Энергия вращения.

Задание:

- определите энергию вращения тела (и отношение энергии вращения к энергии поступательного движения) после скатывания его с наклонной плоскости;
- определить погрешность измерения.

Приборы и инструменты:

- наклонная плоскость;
- цилиндрическое тело;
- линейка;
- секундомер.

Лабораторная работа № 3. Негуковская резинка.

Задание:

Исследуйте упругие свойства резины.

- измерьте удлинения Δl резинки при увеличении растягивающей силы F от минимального возможного значения до суммарного веса предоставленных грузов, а затем при уменьшении этой силы обратно до минимально значения;
- определите по графикам работу силы тяжести по растяжению резинки и работу силы упругости по поднятию грузов.

Приборы и инструменты:

- резиновое кольцо;
- штатив с крючком;
- линейка;
- набор грузов.

Примечание. Разрывать резиновое кольцо запрещается!

Сессия 3

Лабораторная работа № 1. Избыточное давление.

Задание:

- Используя имеющееся оборудование, измерьте избыточное давление воздуха в шарике (разность давления внутри него с атмосферным давлением), когда диаметр шарика в надутом состоянии равен примерно 25 см.
- Найдите объём надутого шарика и оцените погрешность измерения этой величины.
- Опишите метод измерения разности давлений Δp и изобразите схематически установку; выведите формулу для определения Δp .
- При надувании шарика вместе с воздухом человек вдвухает в шарик пары воды, которые конденсируются на оболочке. Этот конденсат влияет на точность измерений. Как исключить из расчётов это влияние?
- Рассчитайте Δp , проведя придуманный вами эксперимент.
- Для улучшения точности повторите эксперимент и усредните полученные результаты.

Приборы и инструменты:

- воздушный шарик;
- нитки;
- ножницы;
- неоднородный стержень (соломинка для коктейлей с пластилином внутри).
- линейка;
- штатив с лапкой;
- несколько листов офисной бумаги формата А4 (поверхностная плотность бумаги 80 г/м²).

Лабораторная работа № 2. Мыльный пузырь.

Задание:

- Исследуйте зависимость $t(R)$ времени t полного сдувания мыльного пузыря через трубку от начального радиуса R пузыря.
- Постройте график зависимости $v(r)$ скорости истечения v воздуха через трубку при сдувании пузыря от его текущего радиуса r .

Приборы и инструменты:

- мыльный раствор в стаканчике.
- трубка;
- стекло;
- секундомер;
- миллиметровая бумага.

Указания к выполнению

Сессия 1

Лабораторная работа № 1. Пинг-понг.

Выведите формулу для расчета доли теряемой кинетической энергии (обозначим долю символом «альфа» $\alpha = \frac{\Delta E_k}{E_k}$).

Сбросив шарик с высоты h_1 , определите высоту h_2 , на которую он поднимется после отскока. Подставьте значения в полученную формулу.

Вычислите долю α для нескольких высот и определите погрешность измерения в каждом случае.

Для этого проведите измерения не менее трех раз и заполните таблицу 1 для каждой высоты.

Таблица 1.

i	h_1 , см	h_2 , см	Рассчитанное значение доли α_i , %	Среднее значение, $\alpha_{\text{ср}}$, %	Отклонение от среднего, $\Delta\alpha_i$, %	Среднее отклонение от среднего, $\Delta\alpha_{\text{ср}}$, %	Результат, α , %
1							
2							
3							

Здесь

i – номер измерения;

$$\Delta\alpha_i = |\alpha_{\text{ср}} - \alpha_i|,$$

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}{3},$$

$$\Delta\alpha_{\text{ср}} = \frac{\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2 + \Delta\alpha_3}{3}.$$

Результаты запишите в виде:

$$\alpha = \alpha_{\text{ср}} \pm \Delta\alpha_{\text{ср}}$$

Например:

$$\alpha = (26 \pm 3) \%$$

Постройте график зависимости величины α от высоты падения. В каждой точке на графике укажите погрешности измерения α и h_1 (для h_1 возьмите $\pm 0,5$ см).

Обратите внимание!

Количество знаков после запятой в величинах $\alpha_{\text{ср}}$ и $\Delta\alpha_{\text{ср}}$ должно совпадать. При округлении $\alpha_{\text{ср}}$ округляется по обычным правилам, а $\Delta\alpha_{\text{ср}}$ всегда в большую сторону!

Лабораторная работа № 2. Ускорение шарика.

Согните из бумаги желоб и установите его на штативе. Скатывайте шарик по желобу и определяйте время спуска при разных углах наклона (не менее пяти). Выведите формулы для определения ускорения a и угла наклона α .

Определите погрешность измерения в каждом случае. Для этого проведите измерения не менее трех раз и заполните таблицу 1 для каждого значения угла.

Таблица 1.

i	α	$t_i, \text{с}$	Рассчитанное значение ускорения $a_i, \text{м/с}^2$	Среднее значение, $a_{\text{ср}}, \text{м/с}^2$	Отклонение от среднего, $\Delta a_i, \text{м/с}^2$	Среднее отклонение от среднего, $\Delta a_{\text{ср}}, \text{м/с}^2$	Результат, $a, \text{м/с}^2$
1							
2							
3							

Здесь

i – номер измерения;

$$\Delta a_i = |a_{\text{ср}} - a_i|,$$

$$a_{\text{ср}} = \frac{a_1 + a_2 + a_3}{3},$$

$$\Delta a_{\text{ср}} = \frac{\Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta a_3}{3}.$$

Результаты запишите в виде:

$$a = a_{\text{ср}} \pm \Delta a_{\text{ср}}$$

Например:

$$a = (0,5 \pm 0,1) \text{ м/с}^2$$

Постройте график зависимости величины a от угла наклона. В каждой точке на графике укажите погрешности измерения a .

Обратите внимание!

Количество знаков после запятой в величинах $a_{\text{ср}}$ и $\Delta a_{\text{ср}}$ должно совпадать. При округлении $a_{\text{ср}}$ округляется по обычным правилам, а $\Delta a_{\text{ср}}$ всегда в большую сторону!

Сессия 3

Лабораторная работа № 2. Избыточное давление.

Надуем шарик до диаметра $d \approx 25$ см. Его можно определить, обернув нитку вокруг шарика и измерив длину окружности $L = \pi d$. Заметим, что для разных сечений значения будут незначительно различаться, так как форма шарика неидеальна. Для большей точности измерим диаметр шарика в трёх перпендикулярных плоскостях и подставим в формулу $V = \frac{\pi d^3}{6}$ усреднённое значение $d_{\text{ср}}$. Погрешность определения диаметра можно оценить из проведённых измерений. Для объёма верно соотношение $\frac{\Delta V}{V} = \frac{3\Delta d}{d}$.

Подвесим соломинку за её центр масс, сделав таким образом рычажные весы. В качестве гирек будем использовать кусочки бумаги, масса которых определяется их площадью (поверхностная плотность бумаги известна). Из бумаги делается чашечка для гирек. Чашечка и шарик крепятся нитками.

Измерения проведём в два этапа. Сначала уравновесим гирьками надутый шарик. Для большей точности плечи весов стоит выбирать максимально возможными. Замерим длину l_1 плеча, на которое подвешен шарик.

На втором этапе будем уравновешивать сдутый шарик, оставив массу гирек такой же, подвешивая грузик известной массы m_0 на плечо с шариком. Пусть в равновесии его плечо равно l_2 . Тогда момент, создаваемый этим новым грузиком, компенсирует момент, создававшийся весом воздуха в шарике: $Pl_1 = m_0gl_2$.

Заметим, что первым делается измерение с надутым шариком, так как при надувании на оболочке конденсируются пары воды, выдыхаемые с воздухом, что приводит к изменению массы шарика. При сдувании конденсат остаётся в шарике.

Вес воздуха в шарике равен разности силы тяжести, действующей на него, и архимедовой силы:

$$P = mg - V\rho_{\text{атм}}g = V\rho_{\text{внутр}}g - V\rho_{\text{атм}}g = \frac{m_0l_2}{l_1}$$

где $\rho_{\text{внутр}}$ – плотность воздуха внутри шарика, а – плотность атмосферного воздуха.

Избыточное давление в шарике:

$$\Delta p = \frac{1}{V} \frac{m_0}{\mu} RT - p_{\text{атм}} = \frac{RT}{\mu} (\rho_{\text{внутр}} - \rho_{\text{атм}}) = \frac{\Delta m_0 l_2}{\mu V l_1} RT$$

Литература.

Слободянюк А. И. Физическая олимпиада: экспериментальный тур.