Общие указания к выполнению лабораторных работ

В лабораторном практикуме студенты, выполняя лабораторные работы, изучают физические явления, знакомятся с основными измерительными приборами и важнейшими методами измерений, овладевают навыками экспериментирования, обработки и анализа полученных результатов.

1. *Правила оформления отчёта по лабораторным работам*

1.1. *Тетрадь для отчётов*

a. Отчёты по лабораторным работам оформляются каждым студентом в отдельной тетради.

b. Тетрадь должна быть подписана на первой странице с указанием курса, группы и Ф.И.О. студента.

c. На первой же странице тетради должна быть таблица по форме 1.

Форма 1

№ п/п	№ лаб. работы	Название лаб. работы	Дата выполнения	Допуск	Выполнение	Отчёт	Защита

d. Тетрадь сдается преподавателю при получении зачёта по лабораторному практикуму

e. Возможно оформление работ на компьютере с помощью редактора Word при наличии заверенных подписью преподавателя результатов измерений и при условии соблюдения всех правил оформления. В этом случае отчёты по каждой лабораторной работе оформляются на отдельных скрепленных между собой листах белой бумаги формата А4 и складываются в отдельную папку.

1.2. ***Оформление отчёта.***

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

- № лабораторной работы;
- название лабораторной работы;
- цель лабораторной работы;
- теоретическое введение;

– описание установки и методики измерения;
– таблицу с результатами измерений и вычислений;
– обработку результатов;
– заключение (выводы).

В теоретическом введении следует изложить сущность изучаемого физического явления (метода), законы, его описывающие, в виде сжатого конспекта.

В описании установки и методики измерения необходимо привести перечень оборудования и приборов; описать метод определения величин, рабочую схему или экспериментальную установку; представить рабочую формулу.

Работа должна проводиться в полном соответствии с представленным ходом работы и в той последовательности, которая указана в работе.

Все результаты измерений, черновые записи, идеи должны быть занесены в тетрадь (в том числе в подготовленную таблицу). О том, как обрабатывать результаты измерений и вычислить погрешности (ошибки) измерений, сказано ниже в разделе «Вычисление погрешностей».

Заключение (выводы) должны содержать: конкретный количественный и качественный результат работы, аналогичные справочные или теоретические данные, сравнение собственных результатов с известными.

*2. **Требования к допуску, выполнению и защите лабораторных работ***

2.1. Допуск

Для допуска к выполнению лабораторных работ необходимо к ней подготовиться. Это означает следующее:

a. Предварительное (с помощью учебных пособий, методических указаний к лабораторной работе, конспекта лекций) ознакомление с изучаемым в данной работе физическим явлением, экспериментальной установкой и методикой исследования.

b. Подготовка заготовки отчёта, содержащей:

– № лабораторной работы;
– название лабораторной работы;
– цель лабораторной работы;
– теоретическое введение;
– описание установки и методики измерения;
– таблицу для записи результатов измерений и вычислений.

c. Студент должен быть готов к ответу на вопросы о том, какое явление изучается в данной работе; какие основные законы описывают это явление; какая физическая величина подлежит экспериментальному определению, что она собой представляет и от чего зависит. Примерные вопросы для допуска приведены в каждой лабораторной работе.

d. Необходимо быть готовым показать на схеме или на реальной лабораторной установке её основные элементы, измерительные приборы и приспособления, охарактеризовать их назначение и принцип действия, представить вывод формулы для расчёта погрешности.

e. Наличие полностью оформленного отчёта по предыдущей лабораторной работе.

Если студент доказал свою подготовленность к занятию:

- представил отчёты по лабораторным работам;
- ответил на вопросы допуска;

то преподаватель расписывается в таблице №1 в графе "допуск" данной лабораторной работы.

Студенты, не подготовившиеся к выполнению работы (не получившие "допуск"), оформляют отчёты на занятиях. Лабораторную работу им придется выполнять во внеурочное время.

2.2. Выполнение

Следует последовательно провести все измерения, указанные в порядке выполнения работы. Данные внести в таблицы. Экспериментальные данные и промежуточное значение результата измерений необходимо показать преподавателю, с тем, чтобы получить его подпись в таблице по форме 1 в графе "выполнение". В конце занятия целесообразно представить отчёт по выполненной работе и защитить предыдущую работу.

Учебная подгруппа для выполнения лабораторных работ делится на бригады по 2-3 студента. Каждая бригада выполняет работы по маршруту, установленному для этой учебной группы. В маршрутах предусмотрены занятия для защиты лабораторных работ и зачётное занятие. Студенты, выполнившие три лабораторные работы и не защитившие ни одной из них, к выполнению следующей работы не допускаются. Во время занятия они защищают выполненные работы; а пропущенную работу обязаны выполнить во внеурочное время.

2.3. Защита работ

Для защиты лабораторной работы следует представить полностью оформленный отчёт. В него входят результаты всех необходимых вычислений с указанием единиц измерения размерных физических величин. Если имеется серия однотипных опытов, то достаточно привести подробный расчёт только для одного опыта.

Графические зависимости оформляются в соответствии с правилами построения графиков, выполняются на миллиметровой бумаге и подклеиваются в тетрадь. Допускается оформление графиков с помощью компьютера.

Окончательный результат, если это число, следует записать в виде:

$$A = A_{cp} \pm \Delta A,$$

где A – измеряемая величина, A_{cp} – её среднее значение, ΔA – погрешность её определения. Полученные результаты сопоставляются с литературными (как правило, справочными) данными. Обсуждение и анализ экспериментальных данных следует завершить краткими заключениями (выводами), которые должны говорить о достижении основных целей лабораторной работы.

В каждой работе приведены примерные контрольные вопросы. Они могут касаться исследованных в работе физических явлений и законов, методики измерений и обработки результатов. Задания для защиты включают в себя как качественные вопросы, так и простейшие задачи, имеющие непосредственное отношение к проделанной работе.

При оценке лабораторной работы учитывается качество оформления: все записи должны быть аккуратными и разборчивыми, рисунки, схемы и таблицы выполнены с использованием карандаша, линейки и других необходимых чертёжных инструментов. При оформлении отчёта следует ориентироваться на образец, приведенный на сайте кафедры и в данном методическом пособии.

Вычисление погрешностей

Одна из задач лабораторного практикума – научиться правильно измерять физические величины. ***Измерение*** – это процесс сравнения физической величины с однородной величиной, принятой за единицу. Различают прямые и косвенные измерения. При ***прямых измерениях*** определяемая величина сравнивается с единицей измерения непосредственно (например, определение длины стержня с помощью линейки) или при помощи измерительного прибора, проградуированного в соответствующих единицах (например, определение напряжения с помощью вольтметра). При ***косвенных измерениях*** измеряемая величина определяется (вычисляется) из результатов прямых измерений других величин, которые связаны с измеряемой величиной определённой функциональной зависимостью.

Всякое измерение сопровождается погрешностью. ***Погрешность результата*** измерения – это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. На практике истинное значение неизвестно, поэтому его приходится заменять понятием «действительное значение». ***Действительное значение*** физической величины – значение, найденное экспериментально и настолько приближающееся к истинному, что для данной цели оно может быть использовано вместо него.

Задача состоит в том, чтобы научиться правильно оценивать погрешности. Назовём ***абсолютной погрешностью*** Δx измерения какой-либо физической величины x модуль разности между истинным значением и измеренным:

$$\Delta x = \left| x - x_{изм.} \right|. \quad (1)$$

Более наглядное представление о точности измерений даёт ***относительная погрешность*** ε, показывающая, какую долю от измеряемой величины составляет её абсолютная погрешность:

$$\varepsilon(x) = \frac{\Delta x}{x}. \quad (2)$$

Относительную погрешность можно выразить в процентах:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%. \quad (2а)$$

Различают 2 класса погрешностей: ***случайные*** и ***систематические***. Такие погрешности можно оценить, вычислить. Есть ещё ***грубые промахи*** – это результат непредсказуемого просчёта, неумения экспериментатора. Промахи никаким закономерностям не подчиняются и анализу не подлежат. Единственный путь исключить их – переделать измерения заново, если возникло опасение, что промах допущен (например, какое-то измерение выделяется на фоне остальных или не укладывается в общий тренд).

Случайные погрешности – это такие погрешности, причины которых неизвестны и неконтролируемы. Они влияют на результат случайным образом то в сторону его завышения, то в сторону занижения с равной вероятностью. Примеры случайных погрешностей: вибрация здания, колебания напряжения в сети, атмосферного давления, сквозняк в помещении, индивидуальное физиологическое состояние экспериментатора (при измерениях времени ручным секундомером, например), неравномерность или несимметричность намотки нитей в лабораторных установках «маятник Максвелла», «маятник Обербека», «Определение момента инерции маховика» и т.д. Предполагается, что случайные погрешности подчиняются определённым закономерностям.

Систематические погрешности – следствие несовершенства приборов (***систематические приборные погрешности*** при прямых измерениях) или недостатков методов измерения (***систематические методические погрешности*** при косвенных измерениях). Их можно оценить, зная класс точности приборов, а также при анализе метода измерения. Систематические погрешности влияют на результат односторонним образом, либо его систематически занижая, либо только завышая.

Приборную погрешность можно определить, если известен класс точности прибора. Он указывается в виде числа на шкале прибора, например: 0.5; 1.0 (лабораторные приборы массового употребления). Класс точности даёт максимальную абсолютную погрешность, выраженную в процентах от предела измерения $x_{пред.}$ (максимального значения измеряемой величины):

$$k = \frac{\Delta x}{x_{пред.}} \cdot 100\% . \tag{3}$$

Если класс точности не указан, принято считать, что максимальная ошибка составляет не более половины цены деления прибора (табл.1):

$$\Delta x_{пр.} = \frac{\text{цена деления}}{2} . \tag{4}$$

Таблица 1

№	Измерительный прибор	Цена деления	Абсолютная приборная погрешность $\Delta x_{пр.}$
1	Линейка	1 мм	$0.5мм = 5 \cdot 10^{-4} м$
2	Штангенциркуль	0.1 мм	$0.05мм = 5 \cdot 10^{-5} м$
3	Микрометр	0.01 мм	$0.005мм = 5 \cdot 10^{-6} м$
4	Индикатор перемещения	0.01 мм	$0.005мм = 5 \cdot 10^{-6} м$

Примечание: более полную информацию об измерениях, видах погрешностей и о приборных погрешностях можно найти в теоретическом введении к лабораторной работе «Погрешность прямого измерения».

Систематическая методическая погрешность при косвенных измерениях в той или иной мере есть всегда, поскольку на протекание любого явления влияет очень много факторов, и учесть их все невозможно. Чем б*о*льшее количество факторов учитываем, тем более сложная получится теория и громоздкая формула для расчёта искомой величины. Однако влияние некоторых факторов мал*о*, и их можно не учитывать. Например, во многих лабораторных работах пренебрегаем силой трения, потому что она мала.

Систематическая погрешность вносится также при округлениях. При этом в соответствии с правилами округления абсолютная погрешность не превышает половины от единицы разряда последней оставленной при округлении значащей цифры. Например, при округлении $x = 1.2345 \cdot 10^{10} \approx 1.23 \cdot 10^{10}$ погрешность округления составит $\Delta x = 0.005 \cdot 10^{10}$, а при округлении $g = 9.80665\, м/с^2 \approx 9.8\, м/с^2$ – $\Delta g = 0.05\, м/с^2$.

Принято записывать измеренную величину $x_{изм.}$ и её абсолютную погрешность Δx в виде:

$$x = x_{изм.} \pm \Delta x. \qquad (5)$$

Эта запись означает, что искомая величина с достаточно большой вероятностью, удовлетворяющей экспериментатора, попадёт в интервал $[(x_{изм.} - \Delta x); (x_{изм.} + \Delta x)]$:

$$(x_{изм.} - \Delta x) \le x \le (x_{изм.} + \Delta x). \qquad (6)$$

Следует соблюдать некоторые правила при расчётах погрешности и записи результата; примеры см. в табл.2:

- вычисление погрешности не требует тщательных расчётов с точностью до большого количества значащих цифр. Достаточно одной (если вторая цифра – это 1, 2, 3, 7, 8, или 9) или двух (если вторая цифра равна 4, 5 или 6);
- в записи результата для изменяемой величины округляем все неверные цифры, кроме последней – той, в которой уже есть погрешность;
- абсолютная погрешность имеет ту же размерность, что и измеряемая величина, так что в записи типа (5) размерность лучше писать один раз за скобками;
- если величина сильно отличается от единицы, надо её записывать в стандартной форме с использованием множителя $\cdot 10^n$, одинакового для сам*о*й величины и для её абсолютной погрешности, вынесенного за скобку. Это нужно для того, чтобы была видна величина погрешности по сравнению с сам*о*й величиной.

Таблица 2

№	Неверно	Верно
1	1.2353 ± 0.5333	1.2 ± 0.5
2	1256 ± 39	1260 ± 40
3	$1.23 \cdot 10^{-5} \pm 1.6 \cdot 10^{-7}\, Па \cdot с$	$(1.23 \pm 0.016) \cdot 10^{-5}\, Па \cdot с$

Вычисление случайных погрешностей при прямых измерениях

Для повышения надёжности измерений увеличивают их число. Пусть x_1, $x_2, \ldots x_i, \ldots x_N$ – результаты прямых измерений величины x, полученные в одних и тех же условиях; N – число измерений. Важно: измерения должны проводиться ***в одних и тех же условиях***; только в этом случае имеет смысл рассчитывать среднее арифметическое:

$$x_{ср.} = \frac{x_1 + x_2 + \ldots + x_i + \ldots + x_N}{N} \equiv \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N}. \tag{7}$$

Если случайная погрешность мала по сравнению с приборной, то выполнять измерение следует один раз: бессмысленно пытаться грубым прибором получить точное значение.

Таким образом, истинное значение величины x попадает в интервал (8) лишь с определённой вероятностью α, величина которой зависит от желаний экспериментатора.

$$\left[\left(x_{ср.} - \Delta x\right);\left(x_{ср.} + \Delta x\right)\right] \tag{8}$$

Вероятность α называется ***доверительной вероятностью***; она даёт долю α измерений $N_{\left(\left(x_{ср.}-\Delta x\right)\le x \le \left(x_{ср.}+\Delta x\right)\right)}$, при которых результат измерения попадает в интервал (8), при очень большом числе измерений: $N \to \infty$;

$$\alpha = \lim_{N\to\infty} \frac{N_{\left(\left(x_{ср.}-\Delta x\right)\le x \le \left(x_{ср.}+\Delta x\right)\right)}}{N}.$$

В учебной лаборатории рекомендуется использовать значение доверительной вероятности $\alpha = 0.95 = 95\%$. Случайная погрешность вычисляется по формуле:

$$\Delta x_{сл.} = t_{\alpha,N} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(x_i - x_{ср.}\right)^2}{N\left(N-1\right)}}. \tag{9}$$

Здесь учтено, что в реальных опытах число измерений N конечно; погрешность уменьшается с увеличением N, и зависимость эта нелинейна и сложна. Она учитывается с помощью коэффициента Стьюдента $t_{\alpha,N}$, зависящего и от числа опытов N, и от заранее заданной доверительной вероятности α. Таблицу коэффициентов Стьюдента можно найти в приложении к лабораторному практикуму. Если случайная погрешность (9) соизмерима с приборной $\Delta x_{пр.}$, то окончательное значение погрешности величины следует вычислять по формуле (10). Если одна из них больше другой более чем в 3 раза, то меньшей следует пренебречь.

$$\Delta x=\sqrt{\left(\Delta x_{сл.}\right)^2+\left(\Delta x_{пр.}\right)^2}\ . \qquad (10)$$

Пример вычисления случайной погрешности при прямых измерениях (измеряется время движения груза; лабораторные работы «маятник Максвелла», «маятник Обербека», «крутильные колебания», «маховое колесо») приводится в таблице 5; число измерений N=5.

Порядок действий при расчётах:

1. Находим среднее арифметическое (см. формулу 7):

$$t_{ср.}=\frac{10.5+10.2+9.9+9.7+10.2}{5}=10.1\,\text{с}$$

2. Вычисляем отклонения Δt_i от среднего в каждом опыте:

$$\Delta t_1=\left|t_{ср.}-t_1\right|=\left|10.1-10.5\right|=0.4,$$

$$\Delta t_2=\left|t_{ср.}-t_2\right|=\left|10.1-10.2\right|=0.1,$$ и т.д., см. таблицу 3.

3. Возводим Δt_i в квадрат (столбец $\left(\Delta t_i\right)^2$ таблицы 3):

$$\left(\Delta t_1\right)^2=0.16; \qquad \left(\Delta t_2\right)^2=0.01,$$ и т.д.

4. Вычисляем сумму квадратов отклонений от среднего:

$$\sum_{i=1}^{5}\left(\Delta t_i\right)^2=0.4^2+0.1^2+0.2^2+0.4^2+0.1^2=0.38.$$

5. Находим по табл.4 коэффициент Стьюдента $t_{\alpha,N}=2.78$ для $\alpha=0.95$, N=5 и вычисляем случайную погрешность по (9):

$$\Delta t_{сл.}=t_{n,\alpha}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\Delta t_i\right)^2}{N(N-1)}}=2.78\sqrt{\frac{0.38}{5(5-1)}}=0.383\approx 0.4\,c.$$

6. Допустим, что наш секундомер – цифровой, измеряющий время с точностью до десятых долей секунды, тогда его приборную погрешность следует оценить как единицу последнего даваемого секундомером разряда:

$$\Delta t_{пр.}=0.1\,c.$$

7. Окончательно по (10):

$$\Delta t=\sqrt{\left(\Delta t_{сл.}\right)^2+\left(\Delta t_{пр.}\right)^2}=\sqrt{0.4^2+0.1^2}\approx 0.4\,\text{с}.$$

Таблица 3

№ п/п	t_i, с	$t_{ср.}$, с	Δt_i, с	$\left(\Delta t_i\right)^2$, с^2	$\sum_{i=1}^{5}\left(\Delta t_i\right)^2$, с^2	Δt, с
1	10.5	10.1	0.4	0.16	0.38	0.4
2	10.2		0.1	0.01		

3	9.9		0.2	0.04		
4	9.7		0.4	0.16		
5	10.2		0.1	0.01		

Вычисление погрешностей при косвенных измерениях

При косвенных измерениях искомая величина y вычисляется по формуле, полученной на основании каких-либо физических законов, при подстановке в неё нескольких величин x_1, x_2, x_3, …, полученных прямыми измерениями, а также известных табличных значений и констант. Таким образом, имеется функция нескольких переменных:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \ldots). \tag{11}$$

При изменении значения любого аргумента x_1 или x_2, или x_3,…., будет изменяться и значение функции. Например, пусть x_1 изменилось на малую величину Δx_1, тогда значение функции изменится на Δf_1:

$$\Delta f_1 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)\Bigg|_{\substack{x_2 = const \\ x_3 = const \\ \ldots\ldots}} \cdot \Delta x_1. \tag{12}$$

Здесь $\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)\Bigg|_{\substack{x_2 = const \\ x_3 = const \\ \ldots\ldots}}$ – частная производная функции по переменной x_1 при условии, что остальные аргументы x_2, x_3, … не изменяются. При изменении x_2 изменение функции равно:

$$\Delta f_2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)\Bigg|_{\substack{x_1 = const \\ x_3 = const \\ \ldots\ldots}} \cdot \Delta x_2, \tag{13}$$

и так далее. Полное изменение

$$\Delta f = \Delta f_1 + \Delta f_2 + \Delta f_3 + \ldots. \tag{14}$$

Если изменяются все аргументы x_1, x_2, x_3, … функции $y = f(x_1, x_2, x_3, \ldots)$, то теория функций нескольких переменных даёт такую формулу для полного дифференциала (полного изменения) функции:

$$df = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)\Bigg|_{\substack{x_2 = const \\ x_3 = const \\ \ldots\ldots}} \cdot dx_1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)\Bigg|_{\substack{x_1 = const \\ x_3 = const \\ \ldots\ldots}} \cdot dx_2 + \ldots. \tag{15}$$

Хотя погрешности – тоже своего рода малые изменения, и похожи на дифференциалы, но есть между ними существенные отличия. Например, погрешности, по определению, всегда положительны (модуль отклонения от среднего), а изменения (12), (13), … в общем случае могут быть отрицательны, так что в формуле (14) и (15) могут частично компенсировать друг друга. Поэтому рекомендуется вместо суммы использовать корень из суммы квадратов (16), аналогично теореме Пифагора, поскольку изменения аргументов Δx_1, Δx_2, Δx_3, … независимы друг от друга, «ортогональны».

$$\Delta f = \sqrt{(\Delta f_1)^2 + (\Delta f_2)^2 + (\Delta f_2)^2 + \ldots},$$

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_3} \cdot \Delta x_3\right)^2 + \ldots}. \qquad (16)$$

Напомним, что частные производные вычисляются так же, как и обычные, но если это производная, например, по x_2, то только x_2 считается переменной, а все остальные аргументы x_1, x_3, … – константы.

Расчёт производных и погрешностей по (16) бывает громоздкой задачей. Однако в некоторых случаях можно сильно упростить расчёты, например, в случае, если в формулу для f входят только степени величин и действия умножения и деления. В качестве примера рассмотрим вычисление погрешности модуля Юнга (17):

$$E = y = f(m, g, l, h, a, b) = \frac{mgl^3}{4hab^3}. \qquad (17)$$

В соответствии с (16)

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial m} \cdot \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial g} \cdot \Delta g\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial l} \cdot \Delta l\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial h} \cdot \Delta h\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial a} \cdot \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial b} \cdot \Delta b\right)^2}$$

$$\frac{\partial E}{\partial m} = \frac{gl^3}{4hab^3}, \qquad \frac{\partial E}{\partial g} = \frac{ml^3}{4hab^3}, \qquad \frac{\partial f}{\partial l} = \frac{3mgl^2}{4hab^3},$$

$$\frac{\partial E}{\partial h} = -\frac{mgl^3}{4h^2ab^3} \qquad \frac{\partial E}{\partial a} = -\frac{mgl^3}{4ha^2b^3}; \qquad \frac{\partial E}{\partial b} = -\frac{3mgl^3}{4hab^4}.$$

При вычислении относительной погрешности ε громоздкие формулы после сокращения упрощаются, так, например, $\left(\frac{\partial E}{\partial b}\right) \Big/ E = \left(-\frac{3mgl^3}{4hab^4}\right) \Big/ \frac{mgl^3}{4hab^3} = -\frac{3}{b}$. Аналогичное сокращение происходит и в других слагаемых под корнем, так как в исходной формуле есть только степенные функции величин, а производная степенной функции $f(x) = Ax^n$ равна $(Ax^n)' = Anx^{n-1}$ и обладает замечательным свойством: $\frac{f'}{f} = \frac{Anx^{n-1}}{Ax^n} = \frac{n}{x}$.

Таким образом,

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{E} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{3\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{3\Delta b}{b}\right)^2}\ . \qquad (18)$$

Из-за громоздкости вычислений по (16) допускается при неоднократных косвенных измерениях использовать формулу (9) расчёта случайных погрешностей при прямых измерениях.

Построение графиков; графическая обработка результатов эксперимента

Полученные в результате экспериментов зависимости изображают в виде графиков не только для наглядности и удобства использования. Графическая обработка опытных данных – удобный и простой инструмент для определения измеряемых величин.

При построении графиков нужно выполнять следующие требования.

1. Графики строят на миллиметровой бумаге.
2. На координатных осях указывают обозначения величин и их размерности.
3. Площадь чертежа используют максимально: график должен занимать примерно одинаковое пространство по обеим осям; при этом начало отсчёта можно сдвигать.
4. Экспериментальные точки должны быть чёткими, яркими и одинаковой величины.
5. Масштабные деления на координатных осях наносят равномерно, а координаты экспериментальных точек не указывают и соответствующие точкам линии не проводят.
6. Масштаб должен быть удобен, чтобы положение любой точки можно было легко определить. Нельзя, например, использовать масштаб, в котором на 5 делений миллиметровки приходится 3 единицы измеряемой величины.
7. При значительном разбросе точек кривую (см. рис. на обложке) или прямую (рис. 4) проводят в среднем между точками, то есть производят графическое усреднение.

Пример построения графика: в лабораторной работе «Пружинный маятник» предлагается определить жёсткость пружины графическим методом, построив зависимость длины l пружины от массы m подвешенного к ней груза. В табл. 4 приведены соответствующие экспериментальные данные.

Таблица 4

m, кг	0.10	0.20	0.30	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0

l, мм	474	477	490	527	570	579	583	621	625	670

На рис. 1 представлен правильно построенный график зависимости $l=f(m)$, на рис. 2 – график, оформленный с ошибками. Перечислим эти ошибки:

1. Неверно выбраны координатные оси: масса m – независимая переменная, аргумент функции, должна откладываться по горизонтальной оси (оси абсцисс), а длина l пружины – функция массы – по оси ординат.
2. Не указаны единицы измерения и не подписана ось абсцисс.
3. Площадь чертежа использована не полностью: была возможность сдвинуть начало координат для длины l.
4. Экспериментальные точки разной величины, а некоторые вообще не отмечены.
5. Масштабные деления для массы нанесены неравномерно (если есть 0.1, то должны быть 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 и т.д.).

6. Вместо масштабных делений для длины нанесены координаты экспериментальных точек.

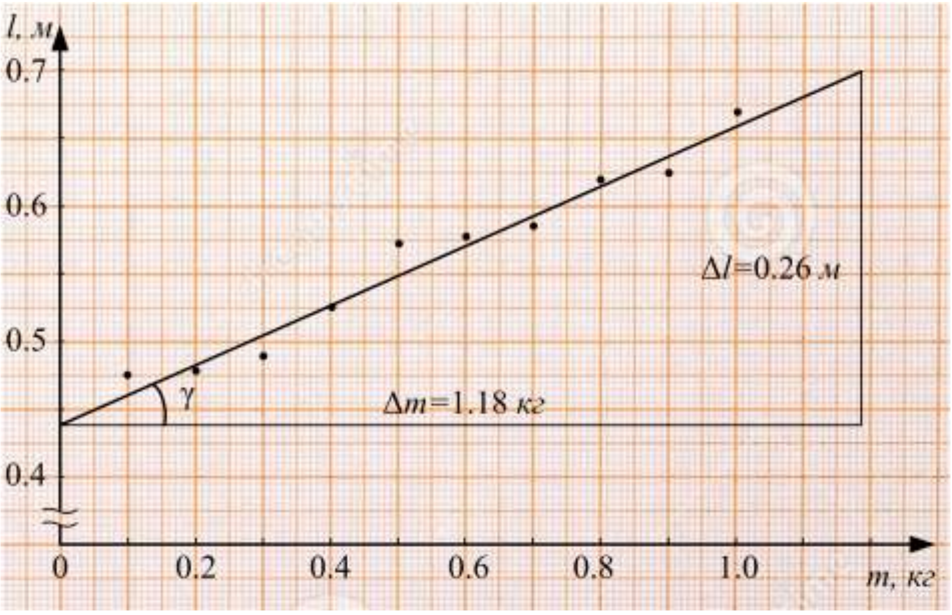

Рис. 1

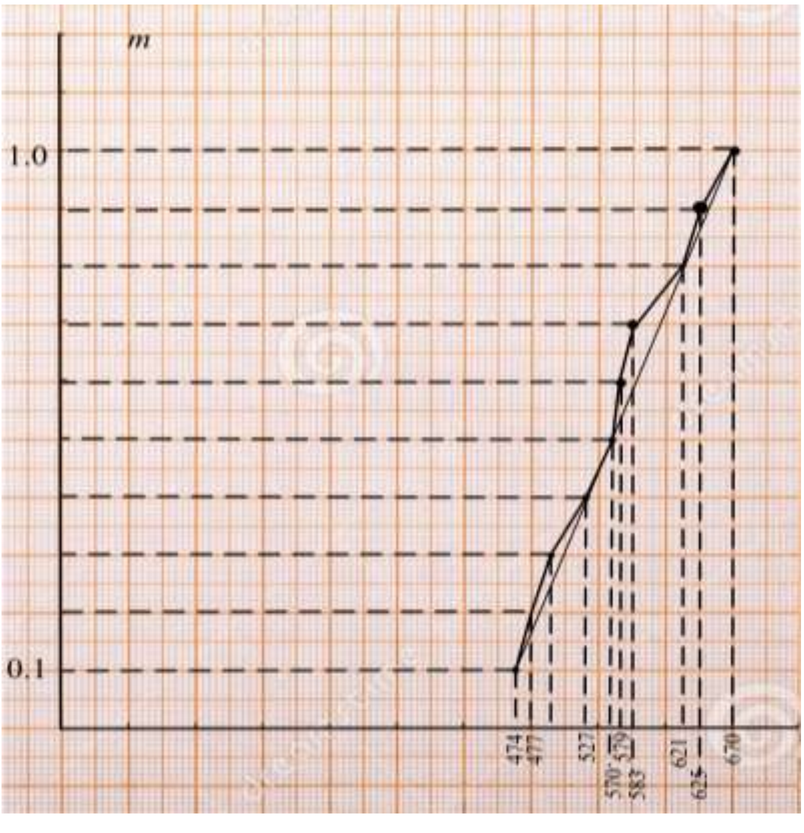

Рис. 2

7. Проведены лишние пунктирные линии.

8. Выбран неудобный масштаб для длины.

9. Неправильно соединены экспериментальные точки: зависимость $l=f(m)$ – линейная, и график представляет собой прямую линию.

В работе предлагается вычислить жёсткость пружины через котангенс угла наклона полученной прямой с оси абсцисс:

$$k = g \cdot ctg\gamma = g \cdot \frac{\Delta m}{\Delta l}. \qquad (19)$$

Для этого графически усредняем полученные данные, проводя прямую так, чтобы она лежала как можно ближе к экспериментальным точкам, и чтобы по обе стороны от прямой находилось примерно одинаковое число точек. Нельзя соединять первую и последнюю точки, как на рис. 2: тем самым игнорируются все остальные данные.

На рис. 1 на графике как на гипотенузе построен прямоугольный треугольник, катеты которого: Δm=1.18 *кг,* Δl=0.26 *м*. Тогда по (19):

$$k = 9.8 \cdot \frac{1.18}{0.26} = 44.5 \ Н/м.$$

Можно построить график в Excel, задав линейную линию тренда с требованием показывать уравнение на диаграмме; тогда программа автоматически вычисляет угловой коэффициент – тангенс угла γ наклона графика к оси абсцисс (рис. 3): $tg\gamma = 0.220$, откуда жёсткость по (19)

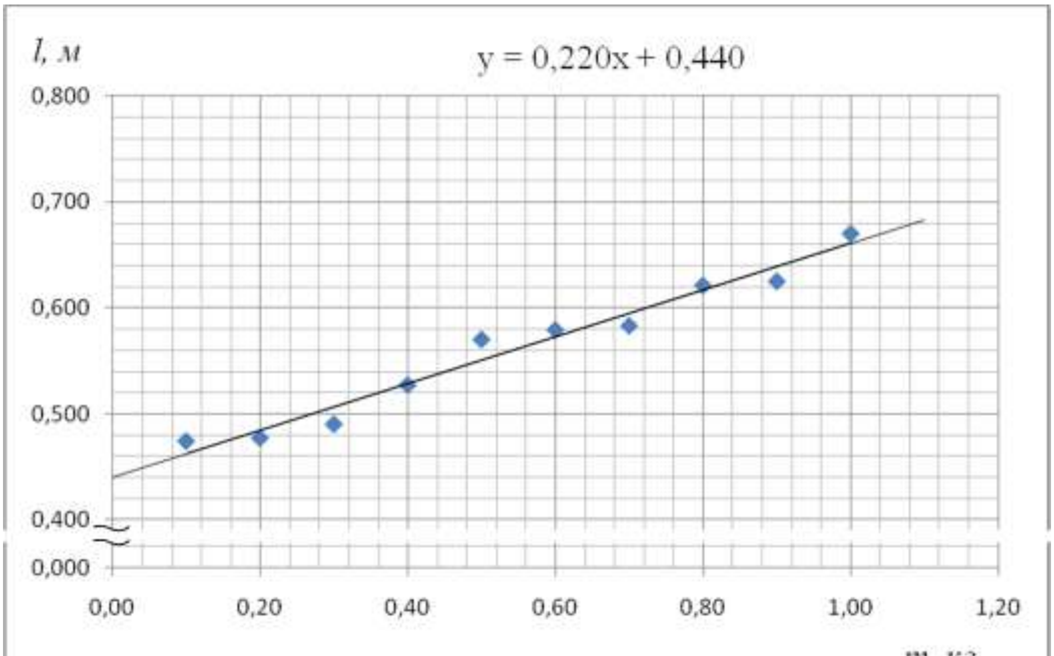

Рис. 3