УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72
Г75

Грачёв, А. В.

Г75 Физика : 11 класс : лабораторные работы : рабочая тетрадь для учащихся общеобразовательных организаций / А. В. Грачёв, В. А. Погожев, П. Ю. Боков и др. — М. : Вентана-Граф, 2020. — 127, [1] с. : ил. — (Российский учебник).

ISBN 978-5-360-10630-2

Тетрадь для лабораторных работ включает в себя фронтальные лабораторные работы и домашние лабораторные работы, материалы по измерению физических величин и оценке погрешностей измерений, другие справочные материалы.

Тетрадь вместе с учебником, рабочими тетрадями и методическим пособием для учителей составляет учебно-методический комплект по физике для 11 класса общеобразовательных организаций.

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72

РОССИЙСКИЙ УЧЕБНИК

Учебное издание

Грачёв Александр Васильевич, **Погожев** Владимир Александрович
Боков Павел Юрьевич, **Тихонов** Павел Сергеевич
Грачёва Мария Александровна, **Селиверстов** Алексей Валентинович

Физика

11 класс

Лабораторные работы

Рабочая тетрадь для учащихся общеобразовательных организаций

Редактор *В. В. Кудрявцев*
Художественный редактор *Л. А. Овчарова*
Внешнее оформление *Д. Л. Шиловская*
Иллюстрации *Е. П. Кронкоянс*
Компьютерная вёрстка *С. Л. Мамедова*
Технический редактор *Е. А. Урвачева*
Корректор *Е. Е. Никулина*

Подписано в печать 24.05.19. Формат 84×108/16. Гарнитура NewBaskervilleITC
Печать офсетная. Печ. л. 8,0. Тираж 1500 экз. Заказ №

ООО Издательский центр «Вентана-Граф». 123308, г. Москва, ул. Зорге, д. 1, эт. 5

росучебник.рф/метод

Предложения и замечания по содержанию и оформлению книги
можно отправлять по электронному адресу: expert@rosuchebnik.ru
По вопросам приобретения продукции издательства обращайтесь:
тел.: 8-800-700-64-83; e-mail: sales@rosuchebnik.ru
Электронные формы учебников, другие электронные материалы и сервисы:
lecta.rosuchebnik.ru, тел.: 8-800-555-46-68
В помощь учителю и ученику: регулярно пополняемая библиотека дополнительных материалов к урокам, конкурсы и акции с поощрением победителей, рабочие программы, вебинары и видеозаписи открытых уроков росучебник.рф/метод

ISBN 978-5-360-10630-2

1 Погрешности измерений и способы их оценки

Великий русский учёный Д. И. Менделеев утверждал: «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять; точная наука немыслима без меры». К сожалению, *практически любое измерение не может быть выполнено абсолютно точно*. Это обусловлено несовершенством измерительных приборов, несовершенством наших органов чувств, влиянием изменяющихся условий эксперимента, которые не контролируются в процессе измерений, и другими причинами.

Отличие полученного при измерении значения величины от её истинного значения называют погрешностью (ошибкой) измерения.

Указанное отличие характеризуют либо *абсолютной*, либо *относительной погрешностью* измеряемой физической величины.

Абсолютной погрешностью называют модуль разности измеренного $A_{изм}$ и истинного A значений величины:

$$\Delta A = |A_{изм} - A|. \tag{1}$$

Максимальное значение указанной величины, которое может быть получено при измерении, называют *максимальной абсолютной погрешностью* ΔA.

Максимальной относительной погрешностью называют отношение максимальной абсолютной погрешности к модулю измеренного значения величины:

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{|A_{изм}|}. \tag{2}$$

Из формулы (1) следует, что максимальная абсолютная погрешность имеет ту же размерность, что и измеряемая величина. Напротив, максимальная относительная погрешность является безразмерной величиной. Поэтому максимальную относительную погрешность указывают либо в долях единицы, либо в процентах. В последнем случае отношение (2) умножают на 100%:

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{|A_{изм}|} \cdot 100\%. \tag{3}$$

В зависимости от способа получения результата принято различать *прямые*, *косвенные* и *совместные* измерения.

Измерение называют *прямым*, если искомое значение определяемой физической величины получают либо непосредственным сравнением с мерой, либо с помощью измерительного прибора, сразу дающего значение измеряемой величины. В этом случае физическую величину называют *прямо измеренной*.

Измерение называют *косвенным*, если значение определяемой физической величины получают путём расчёта по известной зависимости от прямо измеряемых величин. Такую физическую величину называют *косвенно измеренной*. Например, средняя плотность ρ тела будет косвенно измеряемой величиной, если её определяют, прямо измерив массу m тела и его объём V:

$$\rho = \frac{m}{V}. \tag{4}$$

В этом примере расчётная формула (4) следует непосредственно из определения искомой величины. Однако чаще встречаются случаи, когда для получения расчётной формулы приходится прибегать к тем или иным упрощающим предположениям. Например, при измерении силы тока в цепи амперметром часто его внутреннее сопротивление считают равным нулю. Возникающую в подобных случаях погрешность называют *систематической*. Сразу же отметим, что систематическую погрешность, как правило, удаётся обнаружить (а затем и устранить), только если удаётся выбрать другой способ измерения.

Наконец, *совместными* называют измерения, при которых интересующие величины (например, U, V, W) связаны определённым соотношением с несколькими прямо измеряемыми величинами (например, x, y, z, t). В этом случае проводят многократные измерения прямо измеряемых величин при изменяемых определённым образом условиях. Другими словами, значения одной или нескольких прямо измеряемых величин изменяют от опыта к опыту, получая серию из многих измерений. Понятно, что и в этом случае получаемый результат может быть искажён систематической погрешностью.

Наряду с систематическими различают *погрешность отсчёта*, *приборную* и *случайную погрешности*.

Погрешность отсчёта возникает из-за невозможности точно определить показания прибора. Например, если подвижная стрелка шкалы прибора находится на некотором расстоянии от плоскости его шкалы, то ошибка считывания будет тем больше, чем сильнее отличается направление, в котором смотрит наблюдатель на стрелку, от перпендикуляра, опущенного из конца стрелки на плоскость шкалы. Для уменьшения этой ошибки шкалы точных стрелочных приборов делают зеркальными. При этом экспериментатор должен смотреть так, чтобы стрелка и её изображение совпадали.

Приборная (иначе — *инструментальная*) *погрешность* обусловлена несовершенством измерительного прибора (например, наличием сил сухого трения между его подвижными частями) и неверной его настройкой (например, перед измерениями рычажные весы не были сбалансированы или стрелка не была установлена на нуль шкалы). Понятно, что при использовании такого прибора во всех измерениях вносимая им погрешность будет систематической. Если же настройка прибора перед измерениями была проведена правильно, то можно оценить так называемую абсолютную предельную погрешность прибора. У простых измерительных приборов (мерные линейки, штангенциркули и т. п.) максимальная приборная погрешность в любом месте шкалы не превышает половины цены деления шкалы прибора.

Более сложные приборы по точности измерения делят на *классы точности*. Для большинства таких приборов инструментальная погрешность $\Delta A_{\text{пр}}$, как и для простых приборов, является величиной аддитивной, т. е. при любом показании на данном пределе измерения она одинакова в любом месте шкалы. Приборную погрешность таких приборов рассчитывают по формуле:

$$\Delta A_{\text{пр}} = \frac{\gamma_{\text{пр}} \cdot A_{\max}}{100}, \tag{5}$$

где $\gamma_{\text{пр}}$ — класс точности прибора, выраженный в процентах, $A_{\max}$ — максимальное значение измеряемой величины на шкале*.

Случайной называют погрешность, обусловленную влиянием на результаты измерений неконтролируемых в процессе эксперимента факторов (например, изменение влажности и температуры окружающего воздуха, напряжённости неконтролируемых электромагнитных полей и т. п.). Уменьшить случайные погрешности можно, проводя многократные измерения с последующим усреднением результатов измерения.

Кроме указанных выше погрешностей, принято выделять ещё и так называемые *промахи* — грубые погрешности, возникающие обычно либо из-за резкого изменения неконтролируемых условий проведения эксперимента, либо в силу небрежности при считывании показаний приборов. Выявить такие ошибки можно лишь при повторных измерениях.

Из всего сказанного следует, что в результате эксперимента, даже устранив промахи и систематические погрешности, мы не можем получить истинное значение измеряемой величины из-за случайных ошибок. Опыт и теория показывают, что чем больше модуль случайной погрешности, тем меньше вероятность её возникновения. При этом знак случайной погрешности не зависит от её модуля. Другими словами, получить значение измеряемой величины, превышающее её истинное значение A на ΔA, столь же вероятно, как получить значение, меньшее истинного на ту же величину ΔA. (Конечно, сказанное справедливо при достаточно большом числе повторных измерений.)

Учитывая это, считается, что наилучшим приближением к истинному значению прямо измеряемой величины является среднее арифметическое $A_{\text{ср}}$ нескольких измеренных значений A_1, A_2, A_3, ..., A_n, которое вычисляют по формуле:

$$A_{\text{ср}} = \frac{A_1 + A_2 + \ldots + A_n}{n}, \tag{6}$$

где n — число усредняемых измерений.

Особо отметим, что все n повторных измерений должны проводиться в одних и тех же условиях.

Отличие $A_{\text{ср}}$ от истинного значения A при выполнении лабораторных работ в школе принято оценивать, указывая *среднюю абсолютную погрешность* (*ошибку*)** — $\Delta A_{\text{ср}}$, которую вычисляют по формуле:

$$\Delta A_{\text{ср}} = \frac{\left|A_1 - A_{\text{ср}}\right| + \left|A_2 - A_{\text{ср}}\right| + \ldots + \left|A_n - A_{\text{ср}}\right|}{n}. \tag{7}$$

---

* Существует небольшое число приборов, абсолютная предельная инструментальная погрешность которых рассчитывается по другим правилам. На шкалах этих приборов класс точности либо указывают внутри окружности, либо подчёркивают уголком, либо наносят символ «!». Тогда порядок расчёта приборной погрешности указывают в описании (паспорте) прибора.

** В теории ошибок обычно пользуются другой величиной, для которой можно указать вероятность получения данной случайной погрешности. Однако этот метод требует знаний, выходящих за рамки школьной программы.

Можно доказать, что при увеличении числа n измерений средняя абсолютная погрешность $\Delta A_{\text{ср}}$ уменьшается примерно пропорционально $\sqrt{n}$. Знание $\Delta A_{\text{ср}}$ позволяет выявить наличие в серии измерений промахов.

Поскольку вероятность появления отклонений от среднего значения, превышающих $3\Delta A_{\text{ср}}$, обычно меньше 1%, то результат A_i считают промахом, если выполняется неравенство:

$$3\Delta A_{\text{ср}} < |A_i - A_{\text{ср}}|. \qquad (8)$$

Увеличивать число повторных измерений для получения всё меньшей и меньшей случайной погрешности $\Delta A_{\text{ср}}$ целесообразно до тех пор, пока она не окажется близкой к приборной погрешности $\Delta A_{\text{пр}}$, поскольку *максимальную абсолютную погрешность ΔA прямо измеренной величины считают равной*:

$$\Delta A = \Delta A_{\text{пр}} + \Delta A_{\text{ср}}. \qquad (9)$$

Подчеркнём, что точность вычисляемой указанным способом погрешности обычно составляет не более 30—50%. Поэтому *максимальную абсолютную погрешность при записи конечного результата обычно округляют до одной значащей цифры*.

Пусть, например, в результате измерений и расчёта было получено $A_{\text{ср}} = 10\,789$, $\Delta A = 325$. Тогда, согласно сказанному, значение максимальной абсолютной погрешности следует округлить до одной значащей цифры: $\Delta A = 0{,}3 \cdot 10^3$. При этом числовое значение измеряемой величины округляют так, чтобы его последняя цифра была в том же разряде, что и цифра в значении погрешности. Таким образом, в рассмотренном примере результат должен иметь вид: $A_{\text{ср}} = 10{,}8 \cdot 10^3$, $\Delta A = 0{,}3 \cdot 10^3$ либо $A = (10{,}8 \pm 0{,}3) \cdot 10^3$.

Другими словами, значение измеряемой величины удовлетворяет двойному неравенству:

$$(10{,}8 - 0{,}3) \cdot 10^3 \leqslant A \leqslant (10{,}8 + 0{,}3) \cdot 10^3.$$

Исключениями из рассмотренного правила являются два случая.

1) Значение погрешности округляют, оставляя две значащие цифры, если первая значащая (отличная от нуля) цифра значения погрешности равна 1. При этом соответствующим образом округляют и значение измеряемой величины. Например, если $A_{\text{ср}} = 10\,789$, $\Delta A = 172$, то окончательный результат может быть записан в виде: $A_{\text{ср}} = 10{,}79 \cdot 10^3$, $\Delta A = 0{,}17 \cdot 10^3$.

2) В значении погрешности при округлении оставляют две значащие цифры и в случае, если измеренную величину используют в дальнейших расчётах.

При **косвенных измерениях** вычисление погрешности зависит от вида функции f — зависимости искомой величины от прямо измеряемых величин x и y. В таблице 1 приведены формулы, по которым производят вычисление модулей максимальных погрешностей для некоторых функций на основании модулей Δx и Δy максимальных абсолютных погрешностей величин x и y.

При проведении косвенных измерений следует придерживаться следующей схемы.

Шаг 1. Выполнить все необходимые прямые измерения, записывая их результаты в таблицу. Записать приборные погрешности для каждой из прямо измеренных величин.

Шаг 2. Используя формулы (6) и (7), вычислить средние значения и модули абсолютных погрешностей прямо измеренных величин. Используя неравенство (8), проверить, нет ли среди результатов прямо измеренных величин промахов. Если они обнаружатся, то после их исключения следует вновь воспользоваться формулами (6) и (7).

Если средняя абсолютная погрешность прямо измеренной величины существенно превышает приборную ошибку, то следует увеличить число измерений этой величины. В противном случае можно определить максимальные абсолютные погрешности, используя формулу (9). После этого необходимо записать результаты прямых измерений, придерживаясь указанных выше правил.

Таблица 1

Вид функции f	**Модуль максимальной абсолютной погрешности Δf**	**Модуль максимальной относительной погрешности ε_f**
$f = x + y$	$\Delta f = \Delta x + \Delta y$	$\varepsilon_f = \dfrac{\Delta x + \Delta y}{x + y}$
$f = x - y$	$\Delta f = \Delta x + \Delta y$	$\varepsilon_f = \dfrac{\Delta x + \Delta y}{x - y}$
$f = x \cdot y$	$\Delta f = y \cdot \Delta x + x \cdot \Delta y$	$\varepsilon_f = \dfrac{\Delta x}{x} + \dfrac{\Delta y}{y} = \varepsilon_x + \varepsilon_y$
$f = \dfrac{x}{y}$	$\Delta f = \dfrac{y \cdot \Delta x + x \cdot \Delta y}{y^2}$	$\varepsilon_f = \dfrac{\Delta x}{x} + \dfrac{\Delta y}{y} = \varepsilon_x + \varepsilon_y$
$f = x^n$	$\Delta f = n \cdot x^{n-1} \cdot \Delta x$	$\varepsilon_f = n \cdot \dfrac{\Delta x}{x} = n \cdot \varepsilon_x$
$f = \sqrt[n]{x}$	$\Delta f = \dfrac{\Delta x}{n \cdot \sqrt[n]{x^{n-1}}}$	$\varepsilon_f = \dfrac{1}{n} \cdot \dfrac{\Delta x}{x} = \dfrac{1}{n} \cdot \varepsilon_x$

Шаг 3. Используя формулы, приведённые в таблице 1, вычислить значения косвенно измеряемой величины и модули её максимальной абсолютной и относительной погрешностей.

Для сравнения результатов измерений одной и той же величины, полученных в двух сериях опытов, результаты каждой из серии опытов записывают в виде двойного неравенства:

$$A_{1\text{ср}} - \Delta A_1 \leqslant A_1 \leqslant A_{1\text{ср}} + \Delta A_1;\ A_{2\text{ср}} - \Delta A_2 \leqslant A_2 \leqslant A_{2\text{ср}} + \Delta A_2.$$

Если интервалы значений перекрываются, то делают вывод о незначимом расхождении полученных результатов. В противном случае результаты считают несовпадающими и проводят анализ причин их расхождения.

Упражнения

Задание 1. Два проводника с сопротивлениями 0,5 ± 0,1 Ом и 1,1 ± 0,1 Ом соединили последовательно. Определите общее сопротивление получившегося участка цепи. Запишите полученный результат с учётом максимальной абсолютной погрешности. Оцените максимальные относительные погрешности измерения обоих сопротивлений и сопротивления всей цепи. Сравните полученные результаты и сделайте вывод.

Задание 2. Два проводника с сопротивлениями 1,5 ± 0,1 Ом и 1,8 ± 0,1 Ом соединили параллельно. Определите общее сопротивление получившегося участка цепи. Запишите полученный результат с учётом максимальной абсолютной погрешности. Оцените максимальные относительные погрешности измерения обоих сопротивлений и сопротивления всей цепи. Сравните полученные результаты и сделайте вывод.

Задание 3. С помощью тонкой собирающей линзы получили действительное изображение точки, расположенной на главной оптической оси. Расстояние от точки до линзы равно 5,1 ± 0,1 см, расстояние от линзы до изображения точки — 8,2 ± 0,1 см. Определите фокусное расстояние линзы. Запишите полученный результат с учётом максимальной абсолютной погрешности. Оцените максимальные относительные погрешности измерения расстояний от источника и его изображения до линзы и фокусного расстояния этой линзы. Сравните полученные результаты и сделайте вывод.

Задание 4. С помощью тонкой собирающей линзы получили мнимое изображение точки, расположенной на главной оптической оси. Расстояние от точки до линзы равно 5,1 ± 0,1 см, расстояние от линзы до изображения точки — 8,2 ± 0,1 см. Определите фокусное расстояние линзы. Запишите полученный результат с учётом максимальной абсолютной погрешности. Оцените максимальные относительные погрешности измерения расстояний от источника и его изображения до линзы и фокусного расстояния этой линзы. Сравните полученные результаты и сделайте вывод.

Задание 5. В магнитном поле с индукцией 0,15 ± 0,01 Тл заряженная частица, имея скорость 200 ± 10 км/с, описывает окружность радиусом 10 ± 1 см. Определите отношение модуля заряда частицы к её массе (удельный заряд частицы). Запишите полученный результат с учётом максимальной абсолютной погрешности. Оцените максимальную относительную погрешность измерения удельного заряда частицы.

Задание 6. Дифракционную решётку с числом щелей 100 ± 10 на один миллиметр освещают исследуемым излучением, падающим на неё. При этом направление на максимум первого порядка составляет с нормалью к плоскости решётки угол 30°(значение точное). Определите по этим данным длину волны исследуемого излучения. Запишите полученный результат с учётом максимальной абсолютной погрешности. Оцените максимальную относительную погрешность измерения длины волны.

Задание 7. Пусть в задании 6 измеренный угол составляет 30 ± 3°. Определите по этим данным длину волны исследуемого излучения. Запишите полученный результат с учётом максимальной абсолютной погрешности. Оцените максимальную относительную погрешность измерения длины волны.

О графическом сравнении результатов различных экспериментов

Очень часто приходится сравнивать результаты измерения одной и той же физической величины (см. шаг 3, с. 7), полученные двумя разными способами (или в двух разных экспериментах). Понятно, что эти значения не обязаны совпадать. Обычно различаются и значения погрешностей измерений. Для сравнения результатов, полученных разными способами (или в разных экспериментах), удобно изображать их на общей координатной оси (с единицами измерения, соответствующими данной физической величине) с указанием *доверительных интервалов*.

Центр каждого из интервалов совпадает со значением (например, средним арифметическим) физической величины, полученным в данном эксперименте. От этого центра в обоих направлениях вдоль оси откладывают отрезки, длина каждого из которых равна максимальной абсолютной погрешности измеренной величины в этом же эксперименте. После изображения обоих доверительных интервалов (рис. 1) следует определить, имеется ли область пересечения интервалов, полученных в разных экспериментах. Чем больше эта область, тем более удачными являются выбранные модели описания реальной ситуации и методики экспериментов. Если же область пересечения интервалов отсутствует, то проводят анализ вызвавших это причин. Чтобы лучше понять сказанное, выполните следующие задания.

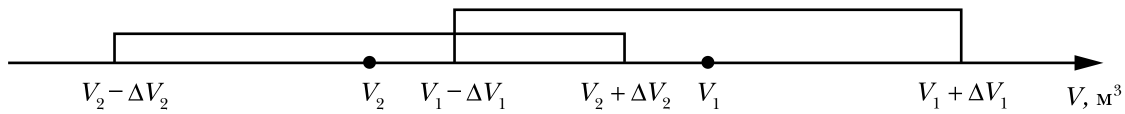

Рис. 1

Задание 1. Период колебаний нитяного маятника определили двумя способами. В первом случае измерили длину нити маятника: с точностью 3% она оказалась равной 100 см. Модуль ускорения свободного падения приняли равным 9,81 м/с^2. Во втором случае определили время десяти полных колебаний маятника, оно составило 21 ± 1 с.

Рассчитайте по результатам измерений в обоих экспериментах период колебаний нитяного маятника, максимальные абсолютные погрешности его измерения. Постройте по приведённым данным доверительные интервалы для периода колебаний нитяного маятника.

Решение.

Шаг 1. Запишите формулу для определения периода колебаний нитяного маятника по результатам первого эксперимента.

Вычислите значение периода T_1 колебаний нитяного маятника.

Шаг 2. Запишите формулу для вычисления максимальной абсолютной погрешности ΔT_1 измерения периода T_1 колебаний нитяного маятника.

Вычислите максимальную абсолютную погрешность ΔT_1 измерения периода T_1 колебаний нитяного маятника.

Шаг 3. Запишите формулу для вычисления максимальной относительной погрешности измерения периода T_1 колебаний нитяного маятника.

Вычислите максимальную относительную погрешность измерения периода T_1 колебаний нитяного маятника.

Шаг 4. Запишите формулу для определения периода колебаний нитяного маятника по результатам второго эксперимента.

Вычислите значение периода T_2 колебаний нитяного маятника.

Шаг 5. Запишите формулу для вычисления максимальной абсолютной погрешности ΔT_2 измерения периода T_2 колебаний нитяного маятника.

Вычислите максимальную абсолютную погрешность ΔT_2 измерения периода T_2 колебаний нитяного маятника.

Шаг 6. Запишите формулу для вычисления максимальной относительной погрешности измерения периода T_2 колебаний нитяного маятника.

Вычислите максимальную относительную погрешность измерения периода T_2 колебаний нитяного маятника.

Шаг 7. Оцените масштаб координатной оси, на которой можно указать одновременно значения T_1, T_2, $T_1 - \Delta T_1$, $T_2 - \Delta T_2$, $T_1 + \Delta T_1$, $T_2 + \Delta T_2$.

Шаг 8. Изобразите координатную ось и укажите на ней характерные точки. Укажите на оси доверительные интервалы аналогично тому, как это показано на рисунке 1. Заштрихуйте области пересечения доверительных интервалов. Сформулируйте вывод и запишите его.

Выполните приведённые ниже задания, используя алгоритм из задания 1.

Задание 2. ЭДС источника определили двумя способами. В первом случае к клеммам источника подключили идеальный вольтметр. В результате измерения было получено значение 6,2 ± 0,1 В. Во втором случае измерили силу тока короткого замыкания: она составила 3,05 ± 0,05 А. Известно, что внутреннее сопротивление источника равно 2,0 ± 0,1 Ом.

Постройте по приведённым данным доверительные интервалы для ЭДС источника. Сделайте предположение о возможных причинах расхождения результатов этих экспериментов. Сформулируйте вывод и запишите его.