Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

Т. П. ЖЕЛОНКИНА, С. А. ЛУКАШЕВИЧ

ВВЕДЕНИЕ В ФИЗПРАКТИКУМ

Практическое руководство
для студентов физических специальностей университета

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2019

УДК 53.082 (076)
ББК 30.10 я73
Ж 519

Рецензенты:
канд. физ.-мат. наук В. Е. Гайшун,
канд. техн. наук Н. А. Ахраменко.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
учреждения образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины»

Желонкина, Т. П.

Ж 519 Введение в физпрактикум : практическое руководство / Т. П. Желонкина, С. А. Лукашевич ; Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2019. – 35 с.
ISBN 978-985-577-518-9

Целью издания является ознакомление студентов с видами измерений, методами нахождения абсолютной и относительной погрешностей, осуществления обработки прямых и косвенных измерений. Оно включает также примеры построения графиков и правила оформления отчетов по лабораторным работам.

Практическое руководство адресовано студентам физических специальностей.

УДК 53.082 (076)
ББК 30.10 я73

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

ISBN 978-985-577-518-9

© Желонкина Т. П., Лукашевич С. А., 2019
© Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины», 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ…… 4
1 ВИДЫ ИЗМЕРЕНИЙ…….. 5
1.1 Прямые измерения……... 5
1.2 Косвенные измерения……... 5
2 ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ…… 6
2.1 Абсолютная погрешность…… 6
2.2 Относительная погрешность…… 7
2.3 Случайная погрешность……... 7
2.4 Грубые погрешности…… 9
2.5 Систематические погрешности..... 9
2.5.1 Методические погрешности…… 10
2.5.2 Субъективные погрешности…… 11
2.5.3 Инструментальные погрешности……. 12
3 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ…..... 14
3.1 Прямые однократные измерения……. 14
3.2 Прямые многократные измерения…….. 15
3.3 Упрощенная методика вычисления случайной погрешности (метод Корнфельда)……. 19
4 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ 20
5 ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ…….. 23
5.1 Изучение теории исследуемого явления……. 23
5.2 Изучение метода измерения……. 24
5.3 Оценка погрешности измерений…….. 24
6 ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ…… 26
7 ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА……... 27
7.1 Оформление таблицы…….. 27
7.2 Построение графиков..... 29
ЛИТЕРАТУРА…… 35

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

ПРЕДИСЛОВИЕ

В основе точных естественных наук, к числу которых относится и физика, лежат измерения. При измерениях значения физических величин выражаются в виде чисел, которые указывают, во сколько раз измеренная величина больше или меньше другой величины, значение которой принято за единицу. Полученные в результате измерений числовые значения различных величин, например, времени, пути, скорости и т.д., могут зависеть друг от друга. Физика устанавливает связь между такими величинами и выражает ее в виде формул, которые показывают, как числовые значения одних величин могут быть найдены по числовым значениям других. Получение надежных числовых значений физических величин отнюдь не является простой задачей из-за многочисленных погрешностей, жизненно возникающих при измерениях.

Точность измерения определяется той наименьшей частью единицы меры, до которой с уверенностью в правильности результата можно произвести измерения. Степень точности измерений зависит от употребляемых приборов и от общих методов измерений. Для того чтобы повысить точность окончательного результата, всякое физическое измерение необходимо делать не один, а несколько раз при одинаковых условиях опыта. Необходимо отметить, что при измерениях и отсчетах мы всегда совершаем более или менее значительные ошибки (погрешности). Эти ошибки могут происходить по двум причинам, а потому делятся на две группы: ошибки систематические и ошибки случайные.

Цель физического практикума заключается в том, чтобы позволить студенту самому воспроизвести основные физические явления, научить его обращению с основными измерительными приборами и познакомить с важнейшими методами измерений. Не менее существенно создать и закрепить навыки ведения лабораторного журнала, построения графиков и оценки достоверности полученных результатов.

Поэтому в практическом руководстве поставлена цель рассмотреть эти погрешности, изучить методы, применяемые при обработки результатов, полученных при измерениях. Владение этими методами необходимо для того, чтобы научиться получать из совокупности измерений наиболее близкие к истине результаты, заметить несоответствия и ошибки, разумно организовать сами измерения и правильно оценить точность полученных значений.

Практическое руководство предназначено для проведения вводного практикума на первом курсе перед выполнением основных лабораторных работ.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

1 ВИДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерение является одной из важнейших составных частей физического эксперимента. Цель измерения – получить значение искомой физической величины. Значением физической величины называется ее представление в виде некоторого числа принятых для ее измерения единиц. Например, 9,8 м/с^2 – значение ускорения свободного падения (1 м/с^2 – единица ускорения, а значение ускорения содержит 9,8 таких единиц).

Истинные значения физических величин, как правило, неизвестны. Поэтому на практике используются их действительные значения, найденные в процессе измерения и настолько приближающиеся к истинному значению, что могут быть использованы вместо него.

Измерение – нахождение значения физической величины с помощью специальных технических средств – средств измерения (в дальнейшем СИ). К СИ относятся меры (масштабная линейка, гиря и др.) и измерительные приборы (секундомер, амперметр и др.)

По способу получения значения физической величины измерения делятся на прямые и косвенные.

1.1 Прямые измерения

Прямое измерение – измерение, результат которого получают непосредственно по показаниям СИ, проградуированного в соответствующих единицах (измерение длины масштабной линейкой, температуры – термометром, силы электрического тока – амперметром).

1.2 Косвенные измерения

Косвенное измерение – измерение, при котором значение искомой величины получают расчетом по результатам прямых измерений других физических величин, связанных с искомой величиной известными соотношениями. Например, определение плотности однородного тела D по его массе m и объему V : $D = m/V$; определение удельного сопротивления проводника ρ по его длине l , диаметру d, силе тока I и напряжению на нём U:

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

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

$$R = \frac{U}{I},$$

$$S = \frac{\pi d^2}{4} => \rho = \frac{\pi d^2 U}{4lI},$$

где R – электрическое сопротивление проводника.

2 ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

Всякое измерение дает лишь приближенный результат, который отличается от истинного на некоторую величину, называемую погрешностью измерения. Причины возникновения погрешностей многочисленны, разнообразны, многие из них носят случайный характер.

2.1 Абсолютная погрешность

Как уже отмечалось, в результате проведения измерений невозможно получить как истинное значение искомой величины, так и погрешность измерения. Поэтому результат измерения записывается в виде

$$X = x \pm \Delta x,$$

где X – измеряемая величина;

x – значение величины, полученное при измерении;

Δx – абсолютная погрешность измерения.

Абсолютная погрешность выражается в единицах измеряемой величины. Такое представление результата измерения показывает, что истинное значение измеряемой величины находится скорее всего в пределах от $X - \Delta x$ до $X + \Delta x$, задающих доверительный интервал. Истинное значение X находится внутри этого интервала с некоторой доверительной вероятностью P. Например, результат измерения температуры представлен в виде $T = 273 \pm 0{,}5\text{K}$, $P = 0{,}95$. Это значит, что с вероятностью 95 % истинное значение температуры находится от 272,5 К до 273,5 К. Чем больше P и меньше Δx, тем ближе измеренное физическое значение величины к истинному.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

2.2 Относительная погрешность

Абсолютная погрешность не позволяет сравнивать результаты измерений по точности. Так, $\Delta x = 1$ при x = 1000 м свидетельствует о достаточно высокой точности, а при $x = 10$ м – о низкой. Поэтому кроме абсолютной используется относительная погрешность $\gamma = \frac{\Delta x}{x}$ (отношение абсолютной погрешности к результату измерения). Относительная погрешность может быть выражена в процентах.

2.3 Случайная погрешность

Случайная погрешность – это погрешность, изменяющаяся случайным образом при многократных измерениях одной и той же величины.

Случайные погрешности обусловлены совокупным действием многих факторов (колебания температуры окружающей среды, атмосферного давления, влажности, постоянное сотрясение пола, стен здания и т. д.), устранить их невозможно, но статическая обработка результатов многократных измерений одной и той же величины позволяет оценить значение случайной погрешности. Наилучшим приближением к истинному значению является среднее значение результатов серии измерений:

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \ ,$$

где n – число измерений;

x_i – результат i -го измерения;

$\overline{x}$ – среднее арифметическое значение измеряемой величины.

Пусть произведены два опыта по n измерений одной и той же величины. Их результаты изображены на рисунке 1 вертикальными черточками. Очевидно, что предпочтение будет отдано значению x, полученному в первом опыте (рисунок 1, а). В этом случае разброс экспериментальных данных меньше, доверительный интервал уже.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

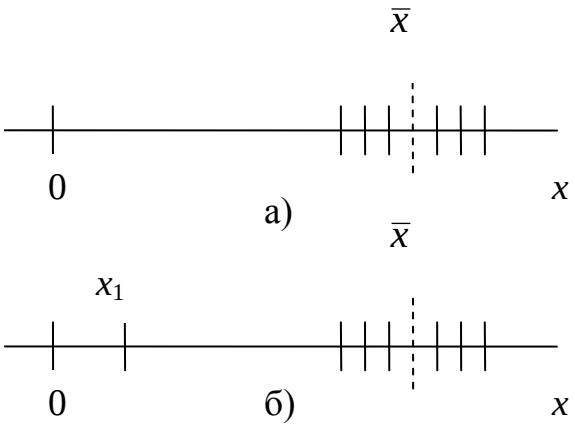


Рисунок 1 – Результаты двух опытов

Чтобы найти случайную погрешность $\overset{\circ}{\Delta} x$, определяющую границы доверительного интервала, производится оценка среднеквадратичного отклонения среднего:

$$S(\overline{x}) = \sqrt{\frac{1}{(n(n-1))} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2},$$

которая умножается на коэффициент Стьюдента, т. е. $\overset{\circ}{\Delta} x = tS(\overline{x})$.

Коэффициент Стьюдента зависит от произведенных измерений n и доверительной вероятности P. В соответствии с ГОСТ 8.207-76 в технических измерениях принимается P = 0,95. Значение t для P = 0,95 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения *t* для *P* = 0,95

n	*t*
1	2
2	12,7
3	4,3
4	3,2
5	2,8
6	2,6
7	2,4
8	2,4
9	2,3
10	2,3
15	2,1

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

Окончание таблицы 1

n	t
20	2,1
25	2,1
30	2,0
50	2,0
∞	2,0

Если неограниченно увеличивать число измерений, то случайная погрешность будет стремиться к нулю, а среднее значение $\bar{x}$ – к истинному (при отсутствии систематических погрешностей). Однако рациональнее усовершенствовать метод измерений, чтобы уменьшить разброс экспериментальных данных. В большинстве экспериментов достаточно провести 5–7 измерений.

2.4 Грубые погрешности

Одной из разновидностей случайных погрешностей являются грубые ошибки или промахи (неправильные отсчеты по шкале, неверная запись отсчетов и др.) Для предотвращения промахов нужно работать внимательно и аккуратно, записывать показания приборов в заранее заготовленные таблицы, не производить пересчет показаний в «уме». Иногда промахи легко обнаруживаются. Так, значение x_1 (рисунок 1, б) явно является грубой ошибкой и должно быть отброшено. Существуют способы обработки результатов измерений, позволяющие с определенной вероятностью выявить промахи.

2.5 Систематические погрешности

Систематическая погрешность – погрешность, значение которой при многократных измерениях остаётся постоянным (или закономерно изменяется). Так, при измерении малого электрического сопротивления можно получить завышенное значение из-за сопротивления соединительных проводов и контактов. Повторные измерения теми же приборами не могут устранить и даже обнаружить систематическую погрешность. Поэтому систематические погрешности опаснее случайных. Их можно назвать погрешностями экспериментатора.

Для систематических погрешностей могут быть определенно установлены причины их возникновения и характер изменения.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

Вследствие этого их можно выявить и практически исключить или существенно уменьшить при проведении эксперимента или при обработке его результатов.

Систематические погрешности в зависимости от причин их появления разделяют на методические, субъективные, инструментальные.

2.5.1 Методические погрешности

Методические погрешности возникают из-за неполного соответствия методики измерения поставленной задаче или из-за действия каких-либо неучтенных факторов. Так, при точном взвешивании результат измерения существенно зависит от действия на взвешиваемое тело и на гирьки выталкивающей силы воздуха. Природа этой силы и способ определения известны, следовательно, возможен учет её влияния.

Проанализируем методическую погрешность, возникающую при измерении омического сопротивления резистора методом амперметра и вольтметра. Будем пренебрегать приборной погрешностью и сопротивлением подводящих проводов, но учтём, что вольтметр имеет конечное внутреннее сопротивление r_v, а амперметр – ненулевое внутреннее сопротивление r_A. На рисунке 2 приведены две возможные схемы включения приборов.

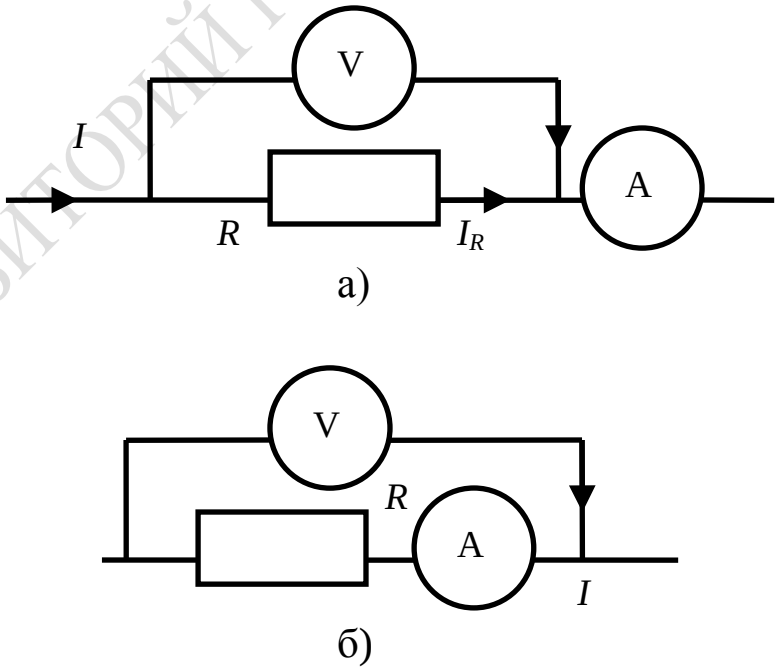


Рисунок 2 – Возможные схемы включения приборов

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

При включении приборов по схеме рисунка 2, а методическая погрешность возникает из-за того, что амперметр измеряет не ток, идущий через резистор, а суммарный ток, идущий через резистор и вольтметр:

$$I = I_V + I_R.$$

Учитывая, что $I_V r_V = I_R R = U, I = I_R\left(1+\frac{R}{r_V}\right)$, получим значение

$$R_1 \neq R : R_1 = \frac{U}{I} = \frac{U}{I}\frac{1}{1+R/r_v} \approx R\left(1-\frac{R}{r_v}\right) = R(1-\delta R_1),$$

где δR_1 – относительная методическая погрешность схемы.

При включении приборов по схеме рисунка 2, б методическая погрешность появляется потому, что вольтметр измеряет суммарное падение напряжения на резисторе и амперметре:

$$U = U_R + U_A = IR + Ir_A = I(R + r_A).$$

В этом случае измеренное значение сопротивления также не равно $R(R_2 \neq R)$:

$$R_2 = \frac{U}{I} = R + r_A = R\left(1+\frac{r_A}{R}\right) = R(1+\delta R_2),$$

где δR_2 – относительная методическая погрешность.

Таким образом, для выбора схемы измерения необходимо приближенно оценить значение R, зная порядок значений r_A и r_V для используемых приборов, рассчитать δR_1 и δR_2 и применить схему, для которой методическая погрешность минимальна.

2.5.2 Субъективные погрешности

Субъективная погрешность – это погрешность отсчета. Она возникает вследствие снятия показаний СИ. Её абсолютное значение $\Delta x_{сб}$ определяют обычно как половину наименьшего деления шкалы СИ. Для цифровых приборов погрешность отсчета практически отсутствует.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

2.5.3 Инструментальные погрешности

Всякое СИ характеризуется классом точности, который указан на шкале прибора цифрой, заключенной в кружок, или цифрой без кружка. По классу точности вычисляется инструментальная погрешность.

У одних типов СИ в пределах всей шкалы отсчета постоянной остается относительная инструментальная погрешность, у других – абсолютная. Поэтому по-разному ведется и расчет инструментальных погрешностей.

1) Класс точности задан цифрой, обведенной кружком. В этом случае одинаковой при всех показаниях СИ остается относительная погрешность. Цифра в кружке и есть относительная погрешность γ, выраженная в процентах. Для вычисления абсолютной погрешности необходимо показание умножить на γ и разделить на 100:

$$\Delta x_{ИН} = x\frac{\gamma}{100}.$$

Например, амперметром с классом точности 1,5 зафиксировано значение силы тока $I = 1$ А. В этом случае $\gamma_{ИН} = 1{,}5\ \%$,

$$\Delta x_{ИН} = \frac{1{,}5}{100}1 = 0{,}015\ \text{А}.$$

2) Класс точности задан цифрой без кружка. В этом случае при всех измерениях в пределах одного диапазона постоянной остаётся абсолютная погрешность. Цифра дает относительную погрешность γ_k в процентах для максимального значения в данном диапазоне СИ. Абсолютная погрешность определяется по пределу диапазона

$$\Delta x_{ИН} = x_K\frac{\gamma_K}{100},$$

где x_K – предел измерения в используемом диапазоне СИ;

γ_k – класс точности, %.

Для каждого измеренного значения x относительная погрешность вычисляется отдельно.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

$$\gamma_{ИН} = \frac{\Delta x_{ИН}}{x} = \frac{x_К}{x}\frac{\gamma_К}{100}.$$

Например, вольтметром с классом точности 0,5 измерено напряжение $U = 2B$ по шкале с пределом измерения $U_К = 10B$. Абсолютная и относительная инструментальные погрешности будут равны соответственно

$$\Delta U_{ИН} = 0{,}5\frac{10}{100} = 0{,}05\text{В},\ \gamma_{\text{ИН}} = 0{,}5\frac{10}{2} = 2{,}5\,\%.$$

3) Для цифровых СИ класс точности задается в виде отношения $\gamma_К / \gamma_Н$, где $\gamma_К$ и $\gamma_Н$ – относительные погрешности в процентах в конце и в начале диапазона измерения.

Инструментальные погрешности результата измерения вычисляются, как указано ниже:

$$\gamma_{ИН} = \gamma_К + \gamma_Н\left(\frac{x_К}{x} - 1\right);\ \Delta x_{ИН} = \gamma_{ИН}\frac{x}{100}.$$

Пример. Цифровым вольтметром с пределом измерения 10 В измерено значение $U = 5\text{В}$. Класс точности прибора 0,1/0,05. Значения относительной и абсолютной инструментальной погрешности соответственно равны:

$$\gamma_{ИН} = 0{,}1 + 0{,}05\left(\frac{10}{5} - 1\right) = 0{,}15\ \%;\ \Delta x_{ИН} = 0{,}15\frac{5}{100} = 0{,}08\,\text{В}.$$

4) Если класс точности СИ неизвестен, абсолютную инструментальную погрешность $\Delta x_{ИН}$ определяют как половину цены деления шкалы. При этом $\gamma_{ИН} = \frac{\Delta x_{ИН}}{x}$.

После определения инструментальной $\Delta x_{ИН}(\gamma_{ИН})$, субъективной $\Delta x_{СБ}(\gamma_{СБ})$ и методической $\Delta x_{МТ}(\gamma_{МТ})$ погрешностей вычисляется систематическая погрешность результата измерения:

$$\Delta x_{СИСТ} = B\sqrt{\Delta x_{ИН}^2 + \Delta x_{СБ}^2 + \Delta x_{МТ}^2}$$

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

или

$$\gamma_{СИСТ} = b\sqrt{\gamma_{ИН}^2 + \gamma_{СБ}^2 + \gamma_{МТ}^2},$$

где b – коэффициент равный 1,1 при $P = 0{,}95$.

Абсолютная погрешность измерения определяется как систематической, так и случайной погрешностями: $\Delta x = \sqrt{\Delta x_{СИСТ}^2 + \overset{\circ}{\Delta} x^2}$.

При обработке результатов измерений погрешности, значения которых меньше максимальной в 3 и более раз, логично отбросить.

3 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Как известно, результат измерения записывается в виде

$$X = x \pm \Delta x.$$

Доверительная вероятность при технических измерениях $P = 0{,}95$.

3.1 Прямые однократные измерения

За результат измерения принимается показание СИ, снятое один раз. Систематическая погрешность определяется с учетом субъективной, инструментальной и методической составляющих по формулам

$$\Delta x_{СИСТ} = 1{,}1\sqrt{\Delta x_{ИН}^2 + \Delta x_{СБ}^2 + \Delta x_{МТ}^2} \;;\; \gamma_{СИСТ} = \frac{\Delta x_{СИСТ}}{x},$$

или

$$\gamma_{СИСТ} = 1{,}1\sqrt{\gamma_{ИН}^2 + \gamma_{СБ}^2 + \gamma_{МТ}^2} \;;\; \Delta x_{СИСТ} = \gamma_{СИСТ} x.$$

Если класс точности СИ задан цифрой, обведенной кружком, то $\Delta x_{ИН} = x\dfrac{\gamma_К}{100}$. При классе точности, заданной цифры без кружка,

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

$$\Delta x_{ИН} = x_К \frac{\gamma_К}{100};\ \gamma_{ИН} = \frac{\Delta x_{ИН}}{x} = \frac{x_К}{x}\frac{\gamma_К}{100}\ .$$

Для цифровых СИ

$$\gamma_{ИН} = \gamma_К + \gamma_Н\left(\frac{x_К}{x} - 1\right);\ \Delta x_{ИН} = \gamma_{ИН}\frac{x}{100}\ ,$$

где $\gamma_Н$ – относительная погрешность в начале диапазона измерений, %.

Если класс точности не указан, то $\Delta x_{ИН}$ определяется как половина цены деления шкалы, а $\gamma_{ИН} = \frac{\Delta x_{ИН}}{x}$.

Случайную погрешность и промахи при однократном измерении выявить и, следовательно, учесть невозможно. Это, однако, не означает, что случайная погрешность отсутствует. В связи с этим однократные измерения допускаются лишь тогда, когда повторные измерения невозможны. Например, исследуется зависимость электрического сопротивления проводника от температуры: если температура изменяется монотонно, измерить сопротивление при каком-то ее значении можно только один раз.

3.2. Прямые многократные измерения

Искомую величину одним и тем же СИ в одинаковых условиях измеряют несколько раз. Если результаты измерений повторяются (разброс их значений практически отсутствует), то случайная погрешность мала, ею можно пренебречь. В этом случае измерения следует прекратить, а обработку результатов провести так, как указано в п. 3.1. Если результаты измерений имеют разброс, свидетельствующий о наличии случайной погрешности, то необходимо решить вопрос о числе измерений. При увеличении числа измерений уменьшается случайная погрешность среднего, но возрастает время, потраченное на проведение эксперимента. В учебной лаборатории студент проводит обычно 5–10 измерений.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

Итак, проводится η измерений искомой величины. Находится среднее значение $\bar{x} = \frac{1}{\eta}\sum_{i=1}^{\eta} x_i$. Проводится оценка среднеквадратичного отклонения среднего

$$S(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{\eta(\eta-1)}\sum_{i=1}^{\eta}(x_i - \bar{x})^2}.$$

По числу измерений n в таблице 1 (см. п. 2.3) находится коэффициент Стьюдента t. Вычисляется абсолютная случайная погрешность

$$\overset{\circ}{\Delta} x = tS(\bar{x}).$$

Рассчитывается абсолютная систематическая погрешность $\Delta x_{СИСТ}$, как рекомендовано в п. 3.1. Находится абсолютная погрешность результата измерения

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{СИСТ}^2 + \overset{\circ}{\Delta} x^2}.$$

Если одна из погрешностей составляет менее 1/3 другой, то ею можно пренебречь.

Окончательный результат записывается в виде

$$x = \bar{x} \pm \Delta x, \quad P = 0{,}95.$$

Абсолютная погрешность Δx должна содержать одну значащую цифру. И только при условии, что эта цифра 1 или 2, абсолютная погрешность может иметь две значащие цифры.

Пример обработки результатов многократных измерений. Пусть стрелочным милливольтметром класса точности 1,0 с ценой деления шкалы 0,1 мВ на пределе 30 мВ измерялось напряжение U. Снято 7 показаний. Результаты представлены во втором столбце таблицы 2. В третьем столбце указано их среднее значение. В четвертом приведены отклонения отдельных результатов измерения от среднего, а в пятом – квадраты этих отклонений.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

Таблица 2 – Результаты измерения напряжения

№	U, мВ	$\bar{U}$, мВ	$\left(U-\bar{U}\right)$, мВ	$\left(U-\bar{U}\right)^2$, мВ^2
1	2	3	4	5
1	16,3	16,6	-0,3	0,09
2	16,9		+0,3	0,09
3	16,7		+0,1	0,01
4	16,0		-0,6	0,36
5	16,9		+0,3	0,09
6	17,0		+0,4	0,16
7	16,5		-0,1	0,01
	116,3		-1,0 +1,1	0,81

Под таблицей помещены суммы в соответствующих столбцах. Суммировать отклонения от среднего (четвертый столбец) не обязательно, но полезно. Если абсолютные значения сумм отрицательных и положительных отклонений сильно отличаются друг от друга, то это свидетельствует об ошибке. В нашем примере суммы -0,1 и +1,1 отличаются несущественно.

Рассчитывается среднее значение

$$\bar{U}=\frac{1}{\eta}\sum_{i=1}^{\eta}\bar{U}=\frac{116,3}{7}=16,614\ 285\ \text{мВ}.$$

Вычисления производились на микрокалькуляторе, поэтому результат содержит 8 цифр. Такая точность не имеет смысла, так как в исходных данных указана одна значащая цифра после запятой. По этой причине в качестве действительного значения напряжения берется число, содержащее тоже одну значащую цифру после запятой, т. е. U = 16,6 мВ.

При расчете случайной погрешности оценивается среднеквадратичное отклонение среднего

$$S\left(\bar{U}\right)=\sqrt{\frac{1}{\eta(\eta-1)}\sum_{i=1}^{\eta}\left(U_i-\bar{U}\right)^2}=\sqrt{\frac{0,81}{7\cdot 6}}\approx 0,14.$$

По таблице 1 находится значение коэффициента Стьюдента.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

Для доверительной вероятности 0,95 при семикратном измерении $t = 2{,}4$. Абсолютная случайная погрешность

$$\overset{\circ}{\Delta} U = tS\left(\bar{U}\right) = 2{,}4 \cdot 0{,}14 \approx 0{,}34 \text{ мВ}.$$

При расчете систематической погрешности по характеристикам милливольтметра (класс точности, предел шкалы) вычисляется инструментальная погрешность

$$\Delta U_{ИН} = \gamma \frac{U_K}{100} = 1{,}0 \frac{30}{100} = 0{,}3 \text{ мВ}.$$

Методической погрешностью при выполнении лабораторных работ обычно пренебрегают.

Находится субъективная погрешность:

$$\Delta U_{СБ} = \frac{Цена\_деления}{2} = \frac{0{,}1}{2} = 0{,}05,$$

которая в данном случае в 6 раз меньше инструментальной, и ею тоже можно пренебречь. Абсолютная систематическая погрешность

$$\Delta U_{СИСТ} = 1{,}1 \Delta U_{ИН} = 0{,}3 \cdot 1{,}1 = 0{,}33 \text{ мВ}.$$

Рассчитывается абсолютная погрешность

$$\Delta U = \sqrt{\overset{\circ}{\Delta} U^2 + \Delta U_{СИСТ}^2} = \sqrt{0{,}34^2 + 0{,}33^2} \approx 0{,}46 \text{ мВ}.$$

Абсолютная погрешность, как правило, должна иметь всего одну отличную от нуля цифру. Поэтому $\Delta U = 0{,}5$ мВ.

Результат должен быть записан в следующем виде: $U = 16{,}6 \pm 0{,}5$ мВ при $P = 0{,}95$.

Это значит, что действительное значение напряжения находится в пределах от 16,1 до 17,1 мВ с вероятностью 95 %.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

3.3 Упрощенная методика вычисления случайной погрешности (метод Корнфельда)

В качестве действительного значения измеряемой величины принимается среднеарифметическое полученных предельных результатов

$$\bar{x} = \frac{x_{max} + x_{min}}{2},$$

где x_{max} , x_{min}, – максимальное и минимальное значение результатов измерения.

Случайная погрешность находится по формуле

$$\overset{\circ}{\Delta} x = \frac{x_{max} + x_{min}}{2}.$$

Доверительная вероятность P, соответствующая доверительному интервалу $(\bar{x} - \overset{\circ}{\Delta} x, \bar{x} + \overset{\circ}{\Delta} x)$, зависит от числа измерений η (таблица 3): $P = 1 - (0{,}5)^{\eta - 1}$.

Таблица 3 – Число измерений η

η	4	5	6	7	10
ρ	0,87	0,94	0,97	0,98	0,99

Значение доверительной вероятности принимается равным 0,95 или равным табличному, если оно меньше 0,95.

Если систематической погрешностью пренебречь нельзя, то вычисляется абсолютная погрешность так, как это указано в п. 3.2.

Так, при использовании данных рассмотренного ранее примера получается:

$$\bar{U} = \frac{16{,}0 + 17{,}0}{2} = 16{,}5\,\text{мВ},\ \overset{\circ}{\Delta} U = \frac{17{,}0 - 16{,}0}{2} = 0{,}5\,\text{мВ},\ P = 0{,}98.$$

С учетом систематической погрешности

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

$$\Delta U = \sqrt{0{,}5^2 + 0{,}2} = 0{,}5\,\text{В}.$$

Тогда окончательно $U = 16{,}5 \pm 0{,}5\,\text{В}$, $P = 0{,}95$, (а не $P = 0{,}98$). Результаты существенно не отличаются от полученных в примере, рассмотренном в п. 3.2, а объем вычислений значительно уменьшился.

Выбор той или иной методики обработки опытных данных определяется особенностями эксперимента, сложностью расчетов. При выполнении лабораторных работ методика обработки рекомендуется преподавателем.

4 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

При косвенных измерениях действительное значение искомой величины *x, y,* …, связанных с *Z* известным соотношением

$$Z = f(x, y, ...), \quad \bar{Z} = f\left(\bar{x}, \bar{y}, ...\right).$$

Методы обработки результатов прямых измерений, т. е. нахождение $\bar{x}, \bar{y}, \ldots$, и погрешностей $\Delta x, \Delta y, ...$, описаны в разделе 3. Абсолютная погрешность величины *Z* определяется выражением

$$\Delta Z = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\Delta y\right)^2 + ... } \ .$$

Для более часто встречающихся видов зависимости $Z = f(x, y, ...)$ в таблице 4 приведены выражения для вычисления погрешности величины *Z*.

Обработку результатов косвенных измерений рассмотрим на примере определения плотности материала, из которого изготовлен образец цилиндрической формы. Прямыми измерениями определены масса *m*, высота *h* и диаметр *d* цилиндра:

РЕПОЗИТОРИЙ ГГТУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

$$m = 79 \pm 1,\ \text{г} \qquad \gamma_m = 1{,}3\ \%,$$
$$h = 41{,}5 \pm 0{,}5\ \text{мм}, \qquad \gamma_h = 1{,}2\ \%,$$
$$d = 16{,}8 \pm 0{,}01\ \text{мм}, \qquad \gamma_d = 0{,}6\ \%.$$

Плотность вычисляется по известной формуле

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi d^2 h}, \bar{\rho} = \frac{4 \cdot 79}{3{,}14 \cdot 1{,}68^2 \cdot 4{,}15} \approx 8{,}59 \ \text{г/см}^3.$$

Формула для плотности не содержит алгебраические суммы, поэтому легче вычисляется относительная погрешность. Выражение для относительной погрешности можно получить, воспользовавшись таблицей 4:

$$\gamma = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\pi}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2}.$$

Погрешность числа $\pi = 3.14$ – это погрешность округления. Она меньше 0,1 % и ею можно пренебречь. Тогда

$$\gamma = \sqrt{(1{,}3)^2 + (2 \cdot 0{,}8)^2 + (1{,}2)^2} \approx 2{,}1\ \%.$$

По относительной погрешности находится абсолютная:

$$\Delta\rho = \gamma \bar{p} = 2{,}1 \cdot 10^{-2} \cdot 8{,}59 \approx 0{,}18 \ \text{г/см}^3.$$

В результате $\Delta\rho = 8{,}6 \pm 0{,}2\ \text{г/см}^3,\ P = 0{,}95$.

Иногда бессмысленно вычислять средние значения величин, которые определяются в процессе прямых измерений. Так, при равноускоренном движении тела с нулевой начальной скоростью

$$S = \frac{at^2}{2} \Rightarrow a = \frac{2S}{t^2},$$

где S – пройденное состояние;

a – ускорение;

t – время движения.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

Таблица 4 – Выражения для вычисления погрешности

Z	ΔZ	$\frac{\Delta Z}{Z}$
$x \pm y$	$\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$	$\frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{x \pm y}$
$x \cdot y$	$\sqrt{(y\Delta x)^2 + (x\Delta y)^2}$	$\sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2}$
x^n	$nx^{n-1}\Delta x$	$\eta\frac{\Delta x}{x}$
$\sqrt[n]{x}$	$\frac{\sqrt[n]{x}}{nx}\Delta x$	$\frac{\Delta x}{nx}$
$\ln x$	$\frac{\Delta x}{x}$	$\frac{\Delta x}{x \ln x}$
e^x	$e^x \Delta x$	Δx
$\sin x$	$\cos x \cdot \Delta x$	$\mathrm{ctg} x \cdot \Delta x$
$\cos x$	$\sin x \cdot \Delta x$	$\mathrm{tg} x \cdot \Delta x$
$\mathrm{tg} \cdot x$	$\frac{\Delta x}{\cos^2 x}$	$\frac{2\Delta x}{\sin 2x}$
$\mathrm{ctg} \cdot x$	$\frac{\Delta x}{\sin^2 x}$	$\frac{2\Delta x}{\sin 2x}$
$\frac{x}{y}$	$\sqrt{\left(\frac{\Delta x}{y}\right)^2 + \left(\frac{x\Delta y}{y^2}\right)^2}$	$\sqrt{\left(\frac{\Delta x}{y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2}$

Если для определения ускорения провели серию измерений при различных расстояниях S_i, получив различные промежутки времени t_i, то нельзя находить среднее значение $\bar{S}$ и $\bar{t}$, а затем подставлять их в формулу для ускорения. В подобных случаях по результатам каждого измерения вычисляется значение искомой величины Z_i.

Оценка среднего значения Z и среднеквадратичного отклонения производится по известным формулам:

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

$$\bar{Z} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Z_i ,$$

$$S(\bar{Z}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(Z_i - \bar{Z})^2}\,; \overset{\circ}{\Delta} Z = tS(\bar{Z}).$$

Систематическая погрешность вычисляется по систематическим погрешностям непосредственно измеряемых величин:

$$\Delta Z_{сист} = \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial x}\Delta x_{сист}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial x}\Delta y_{сист}\right)^2 + \ldots\ldots}.$$

Абсолютная погрешность

$$\Delta Z_{сист} = \sqrt{\Delta Z_{сист}^2 + \overset{\circ}{\Delta} Z^2} .$$

5 ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

На первом, вводном, занятии студенты должны занести в свои тетради график лабораторных работ на все полугодие. График сообщает преподаватель. Начинать подготовку к выполнению лабораторной работы нужно за несколько дней до нее, чтобы при возникновении вопросов была возможность обратиться к преподавателю за консультацией.

5.1 Изучение теории исследуемого явления

Описание лабораторной работы обычно содержит небольшое теоретическое введение. Но изучаемое явление описывается в нем кратко, формулы приводятся без вывода. Поэтому теорию вопроса необходимо изучить по учебнику или учебному пособию. Если тема лабораторной работы была рассмотрена на лекции, то следует обратиться к конспекту

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

лекции. Чаще же теория изучаемых в лабораторной работе явлений на лекции не рассматривается. В этом случае необходимо изучить рекомендуемые в описании лабораторной работы параграфы учебника и законспектировать их. Эти записи можно приобщить к конспекту лекции. Необходимо ответить на контрольные вопросы. Если ответы не вызвали затруднений, то можно считать теорию усвоенной.

5.2 Изучение метода измерения

Метод измерения достаточно изучить по описанию лабораторной работы, а по рекомендованной литературе следует ознакомиться и с другими методами измерения, сравнить их между собой.

По описанию нужно изучить устройство и принцип действия используемых приборов, кроме хорошо известных (штангенциркуль, секундомер, термометр, амперметр и др.). Необходимо получить представление о правильном обращении с приборами. Если электрическое сопротивление резистора измеряется мостом постоянного тока, то нужно выяснить, к каким клеммам подключаются соединительные провода, как добиваться исчезновения тока через гальванометр, как снимать показания. Так, при использовании (в лабораторном практикуме по физике) осциллографа нет необходимости изучать его блок детально. Достаточно знать устройство электронно-лучевой трубки, иметь представление о работе блоков развертки и усиления.

5.3 Оценка погрешности измерений

При проведении экспериментальных исследований в учебной лаборатории погрешность измерений вычисляется обычно после выполнения работы.

Пусть измеряется ускорение свободного падения g методом математического маятника. Период малых колебаний маятника

$$T = 2\pi\sqrt{l/g}, g = 4\pi^2 l/T^2,$$

где T – период колебаний;

l – длина маятника.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГТУ ИМЕНИ П.О.СУХОГО

Относительная погрешность ускорения свободного падения определяется выражением

$$\frac{\Delta g}{g} = \sqrt{\left(2\frac{\Delta \pi}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta T}{T}\right)^2}.$$

Число π можно взять с любой степенью точности, и оно не будет определять погрешность результата.

Если длина нити маятника 1 м, а подвешенный на нити шарик имеет диаметр 10 мм, то миллиметровой линейкой длина маятника будет измерена с погрешностью 1–2 мм, что соответствует относительной погрешности 1–2 %. При длине маятника 1 м период его колебаний равен примерно 2 с. Непосредственное измерение периода стрелочным секундомером приводит к большой погрешности. Она определяется систематической погрешностью самого секундомера (0,1 с) и случайными погрешностями секундомера (тоже приблизительно 0,1 с). В результате погрешность измерения периода составит

$$\Delta T = \sqrt{0{,}1^2 + 0{,}1^2} \approx 0{,}14\,\text{с},$$

что соответствует относительной погрешности 7 %. Она определяет погрешность измерения ускорения свободного падения, которая составит 14 %.

Для увеличения точности определения периода колебаний можно с помощью фотоэлементов автоматизировать фиксацию моментов отпуска и остановки секундомера, можно измерять не период колебаний, а время t, в течение которого произойдет N полных колебаний. Тогда

$$T = t / N;\ \frac{\Delta T}{T} = \sqrt{\left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2} = \frac{\Delta t}{t},$$

так как $\Delta N = 0$. Абсолютная погрешность при измерении времени t составит те же 0,14 с, а относительная погрешность

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta t}{t} = \frac{0{,}14}{100} = 0{,}0014 = 0{,}14\ \%.$$

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

В этом случае погрешность определения ускорения свободного падения составит 1–2 % и будет определяться погрешностью измерения длины маятника.

Из рассмотренного примера следует, что при проведении экспериментальных исследований основное внимание необходимо обращать на те величины, измерение которых вносит наибольшую погрешность в окончательный результат.

Если искомая величина Z связана с измеряемыми величинами x и y соотношениями $Z = xy, Z = x / y, Z = y / x$, то относительная погрешность измерения равна

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2}.$$

Измеряемые прямыми методами x и y следует определять так, чтобы их относительные погрешности были примерно одинаковы.

Если $Z = x \pm y$, то $\Delta Z = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$. В этом случае должны быть примерно одинаковы абсолютные погрешности Δx и Δy. Так, в рассмотренном ранее примере нет необходимости измерять радиус шарика с погрешностью 1 %, с которой измерена длина нити. Даже при измерении радиуса шарика с погрешностью 20 % ($\Delta r = 1$ мм), погрешность в измерении длины маятника увеличится всего на 0,4 %. А при измерении радиуса шарика с погрешностью до 0,3 мм последней вообще можно пренебречь, хотя она и составит 6 %.

6 ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Заняв рабочее место, не спешите приступать к измерениям. Сначала разберитесь в схеме установки, выясните назначение каждого прибора. Соберите рабочую схему. Приступать к эксперименту можно только после ее проверки преподавателем ил лаборантом.

Перед измерениями занести в рабочую тетрадь характеристики инструментов и приборов: класс точности, цену деления, пределы измерений. Заготовьте таблицы.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

При измерениях будьте внимательны. Особенно это касается работы с многопредельными приборами, так как числа делений шкалы могут не соответствовать значениям измеряемой величины.

После выполнения измерений покажите свои записи преподавателю, получите его подпись, а затем приступайте к обработке результатов измерений.

Перед окончанием занятия проведите в порядок рабочее место.

7 ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА

Отчет представляется в письменном виде. Он должен содержать название и цель лабораторной работы, формулы для вычисления искомой величины и погрешности измерения, характеристики использованных приборов и инструментов. В отчет также включаются экспериментальные данные и результаты их обработки в виде таблиц и графиков. Завершается отчет краткими выводами.

7.1 Оформление таблицы

Каждой таблице следует предпослать заголовок, а в начале каждого столбца или строки обозначить соответствующую величину и, через запятую, единицу измерения (таблица 5).

Таблица 5 – Средняя длина свободного пробега молекул воздуха при различных давлениях (t = 20 ˚C)

P, Па	P, мм рт.ст.	λ, *м*
101300	760	$6{,}2\cdot10^{-8}$
133	1	$4{,}7\cdot10^{-5}$
133.10^{-3}	10^{-3}	$4{,}7\cdot10^{-2}$
133.10^{-6}	10^{-6}	47
133.10^{-9}	10^{-9}	$4{,}7\cdot10^{4}$

Чтобы не писать много нулей или множители, являющиеся степенью десяти, необходимо использовать десятичные кратные и дольные единицы измерений (таблица 6).

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

Таблица 6 – Удельное электрическое сопротивление $\rho\,(t = 20\ ^{\circ}\mathrm{C})$

Элемент	Ag	Cu	Al	Fe	Bl	C(графит)
ρ, мкОм ·м	0,016	0,017	0,028	0,098	1,06	8-20

Приставки для образования кратких и дольных единиц приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Приставки для образования кратных и дольных единиц

Множитель	Приставка		
	Наименование	Обозначение	
		русское	международное
10^{18}	экса	Э	E
10^{15}	пэта	П	P
10^{12}	тэра	Т	T
10^{9}	гига	Г	G
10^{6}	мега	М	M
10^{3}	кило	к	K
10^{-3}	мили	м	m
10^{-6}	микро	мк	μ
10^{-9}	нано	н	n
10^{-12}	пико	п	ρ
10^{-15}	фемто	ф	f
10^{-18}	атто	а	a

Разрешается использование десятичных множителей, как это сделано при составлении таблицы 8 (название таблицы опущено).

Таблица 8

Элемент	Ag	Cu	Al	Fe	Bl	C(графит)
ρ, 10^{-8} Ом·м	1,6	1,7	2,8	9,8	106	800–2000

В данном случае единица измерения удельного сопротивления 1 Ом·м умножена на 10^{-8}, т. е. вводится новая единица измерения $1 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Те же данные в таблице 9 представлены в иной фор-

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

ме. Числа получены умножением значений удельного сопротивления на 10^8, а в таблицу занесены результаты умножения.

Таблица 9

Элемент	Ag	Cu	Al	Fe	Bl	C(графит)
$\rho, 10^8$ Ом·м	1,6	1,7	2,8	9,8	106	800–2000

В учебной литературе встречаются оба способа представления данных, хотя в последнее время предпочтение отдаётся форме, использованной в таблице 8.

Множители и приставки рекомендуется подбирать таким образом, чтобы значения величины находились в пределах 0,1 до 1 000.

7.2 Построение графиков

Графики могут использоваться для прохождения значений переменной величины при определенных значениях аргумента. Такие графики называются градуировочными. В качестве примера на рисунке 3 приведена градуировочная кривая термопары медь-константан. Холодный слой термопары находится при 0 ˚С. Измерив термоэлектродвижующую силу, по графику можно определить температуру той области, где расположен горячий спай. Чаще графики применяются для наглядного изображения исследованной зависимости (рисунок 4).

Для обозначения откладываемых по осям величин указываются или их символы (рисунок 3), или названия (рисунок 4), или то и другое. Единицы измерения выбираются и пишутся так же, как при составлении таблиц.

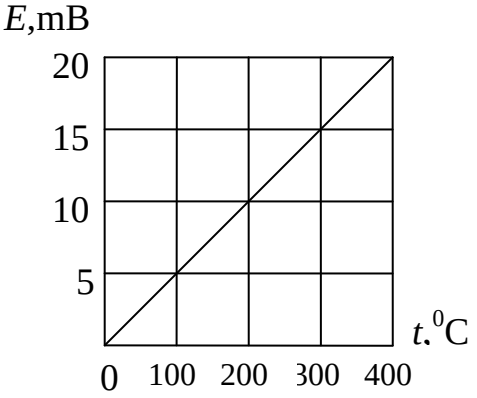


Рисунок 3 – Градуировочная кривая термопары медь-константан

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

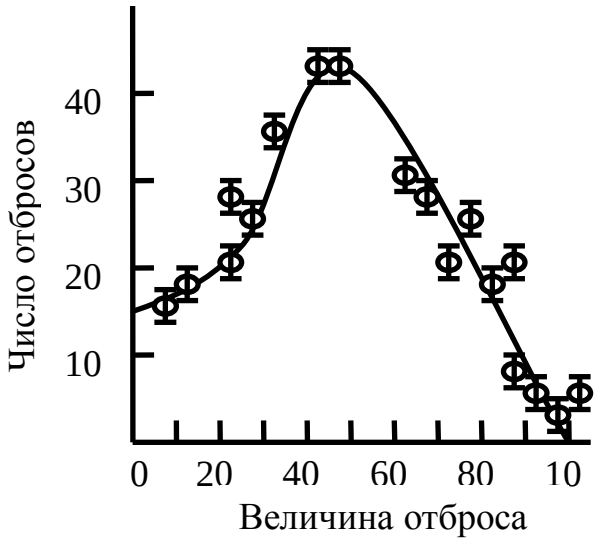


Рисунок 4 – Зависимость величины отброса от его числа

Перед построением графика необходимо уяснить, в каких пределах находятся значения аргумента и функции. Масштабы на осях и начало отсчета нужно выбирать так, чтобы точки, соответствующие наименьшим по модулю значениям аргумента, располагались вблизи оси ординат, а точки, соответствующие значениям функции, – вблизи оси абсцисс. Графики на рисунке 5 иллюстрируют ошибочность построения зависимости сопротивления терморезистора от температуры. Кривая не выразительна, большая часть площади, отведенной под графики, пустует. Та же самая зависимость при правильном выборе масштаба и начала отсчета более наглядна и информативна (рисунок 6).

При построении графиков экспериментальные точки следует сначала наносить карандашом. Убедившись в правильности их расположения, нужно обвести их тушью или чернилами.

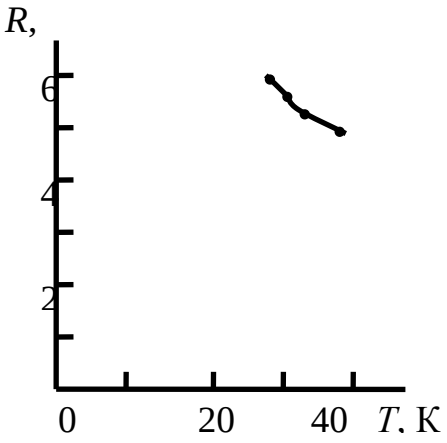


Рисунок 5 – Ошибочное построение зависимости сопротивления терморезистора от температуры

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

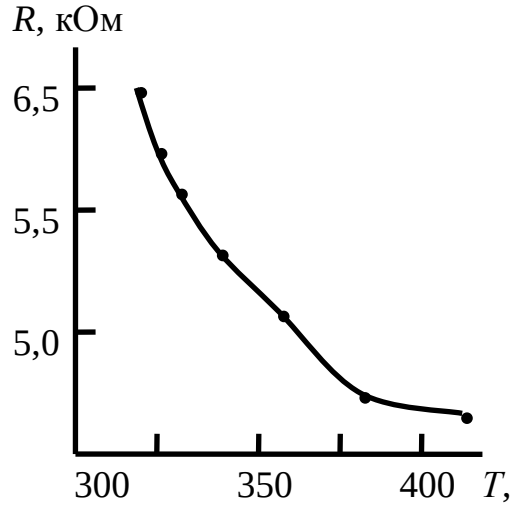


Рисунок 6 – Верное построение зависимости сопротивления терморезистора от температуры

Кривая по экспериментальным точкам проводится плавно, без изломов, таким образом, чтобы множество точек было разделено примерно на две равные части, расположенные по обе стороны кривой. Разброс точек около экспериментальной кривой свидетельствует о величине случайных погрешностей.

На рисунке 7 показан график зависимости плотности воды от температуры, содержащий ошибки, которые наиболее часто встречаются в студенческих отчетах. Во-первых, вместо плавной кривой проведена ломаная линия.

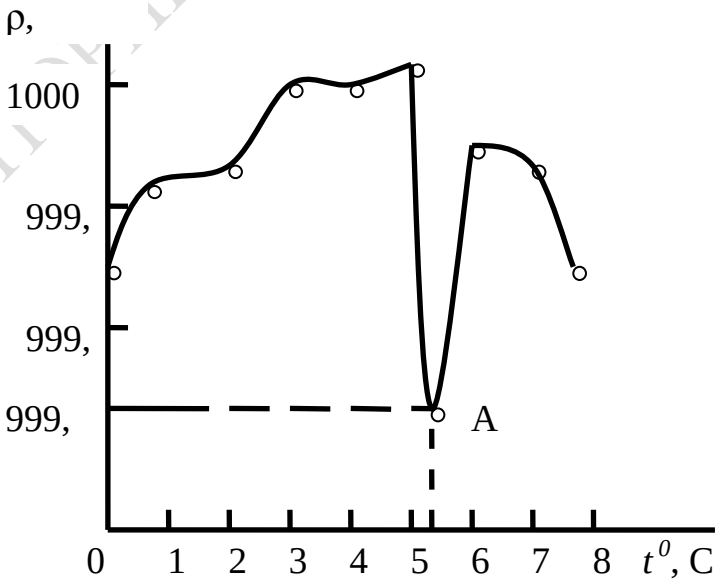


Рисунок 7 – Зависимость плотности воды от температуры с ошибками

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

Получается, что в пределах каждого градуса плотность воды изменяется линейно, наклон отрезков – скачкообразно. Опыт говорит об обратном: при отсутствии фазовых переходов плотность вещества при изменении температуры изменяется постепенно. Во-вторых, точка А явно является результатом грубой ошибки. Если промах появился при нанесении точек, то его легко исправить, поместив точку А туда, где ей надлежит быть. Если допущена грубая ошибка при измерениях, то их следует повторить. Если повторные измерения невозможны, то результаты измерения, соответствующие точке А, должны быть отброшены. В-третьих, на рисунке 7 проведены штрихами вертикальный и горизонтальный отрезки. На осях указаны результаты измерения, которые соответствуют экспериментальной точке. Ни того, ни другого делать не следует. В-четвертых, нет необходимости писать цифры под каждым делением оси абсцисс. Это загромождает график ненужной информацией.

На рисунке 8 по тем же самым экспериментальным точкам построен график, не содержащий перечисленных выше ошибок.

Можно показать на графике и погрешности измерений. Погрешность функции изображается значком $\oint$. Длина вертикального отрезка численно равна удвоенной абсолютной погрешности. Примером может служить график на рисунке 4.

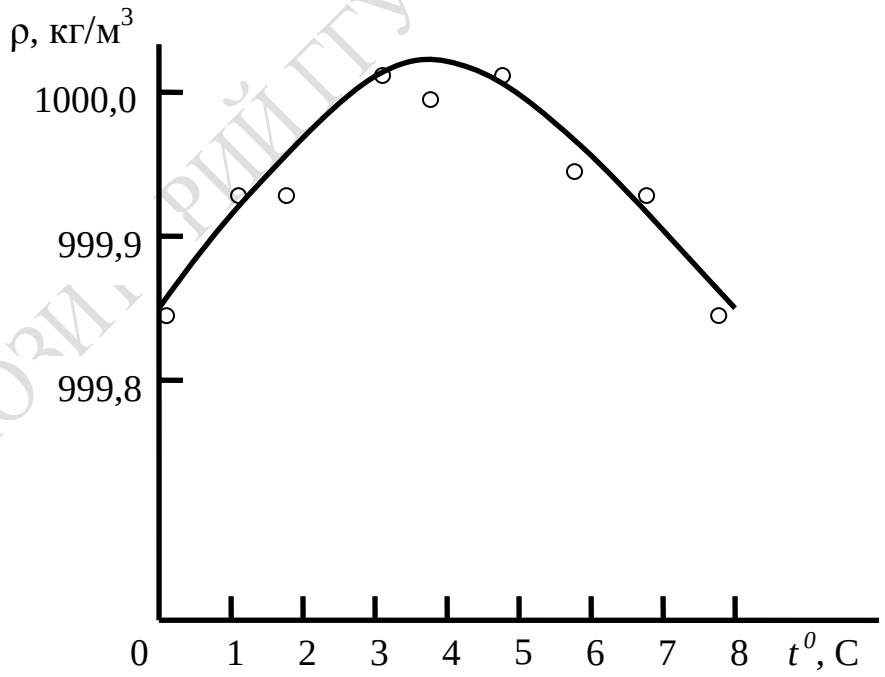


Рисунок 8 – Зависимость плотности воды от температуры без ошибок

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

Иногда приходится сравнивать зависимость, полученную опытным путем, с теоретической. В подобных случаях теоретическая зависимость изображается расчетной кривой, а экспериментальные данные проводятся в виде точек (обычно с указанием погрешности). Так, на рисунке 9 приведена зависимость квадрата косинуса от угла, выраженного в градусах. Точками представлены результаты измерения интенсивности света в относительных единицах. Приводить обозначение погрешностей на графиках надо только при необходимости.

Для более наглядного изображения зависимости следует подумать о том, какие величины и в каком масштабе складывать по осям. Например, зависимость удельной электропроводности полупроводника от температуры носит обычно эспоненциальный характер, т. е. выражается формулой

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2KT}},$$

где σ – удельная электропроводность;

e – основание натуральных логарифмов;

T – температура;

$\sigma_0, \Delta E, K$ – постоянные величины.

Значит, проведенная по экспериментальным точкам кривая будет экспонентной. Чтобы убедиться в этом, достаточно по осям графика отложить не σ и T, а $\ln\sigma$ и $1/T$. Зависимость σ от 1/T должна быть линейной, ибо

$$\ln\sigma = \ln\sigma_0 - \frac{\Delta E}{2K}\frac{1}{T}.$$

На рисунке 10 изображена рассмотренная зависимость для полупроводникового соединения Cd_4Sb_3.

Для «спрямления» параболы $y = kx^2$ достаточно по оси абсцисс отложить не x, а x^2, по оси ординат y.

В тех случаях, когда на графике необходимо провести несколько кривых, экспериментальные точки для каждой из них можно изобразить значками: окружности, кружочки, крестики, треугольники, квадраты и т. д.

Если кривая имеет особые точки (экстремумы, точки перегиба), то измерения вблизи этих точек необходимо проводить особенно тщательно и в достаточном количестве.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

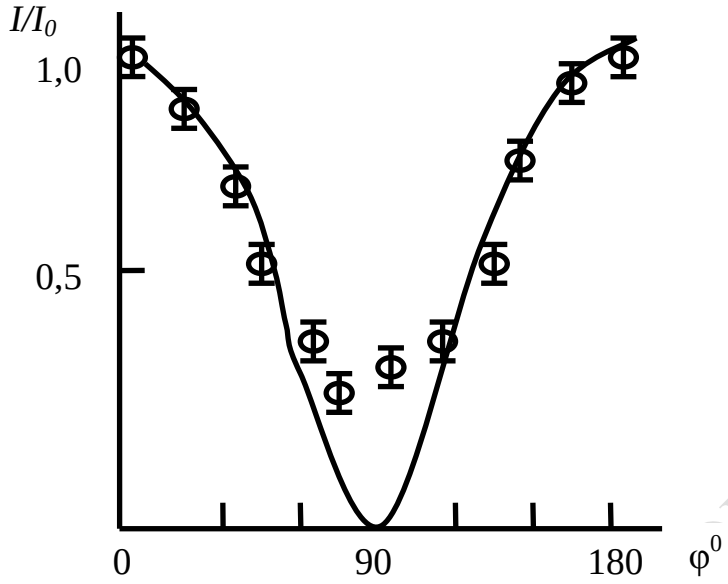


Рисунок 9 – Зависимость квадрата косинуса от угла

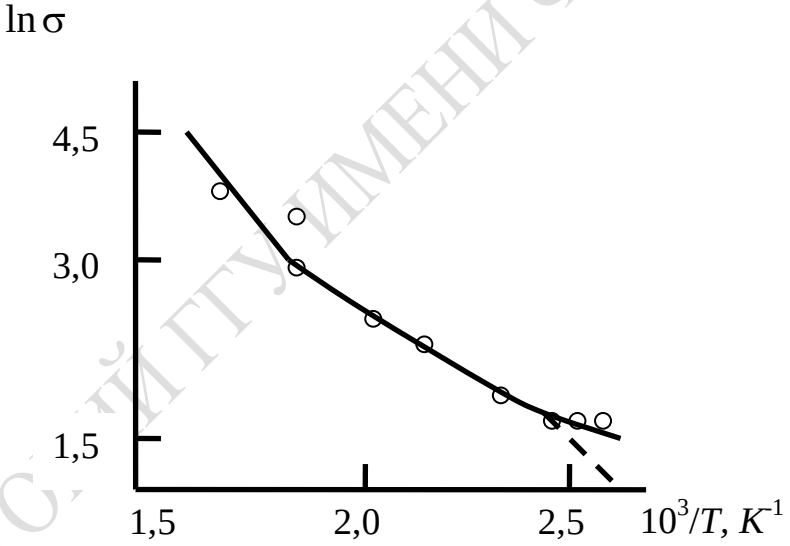


Рисунок 10 – Зависимость для полупроводникового соединения

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

ЛИТЕРАТУРА

1. Касандрова, О. Н. Обработка результатов наблюдений / О. Н. Касандрова, В. В. Лебедев. – М. : Наука, 1970. – 118 с.

2. Зайдель, А. Н. Ошибка физических величин измерений / А. Н. Зайдель. – Л. : Наука, 1974. – 108 с.

3. Зайдель, А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений / А. Н. Зайдель. – М. : Наука, 1965. –126 с.

4. Сена, Л. А. Единицы измерения физических величин / Л. А. Сена. – М. : ТИТТЛ, 1951. – 238 с.

5. Сквайрс, Дж. Практическая физика / Дж. Сквайрс. – М. : Мир, 1971. – 246 с.

6. Рабинович, С. Г. Погрешности измерений / С. Г. Рабинович. – Л. : Энергия, 1978. – 261 с.

7. Тейлор, Дж. Введение в теорию ошибок / Дж. Тейлор. – М. : Мир, 1985. – 210 с.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

Производственно-практическое издание

Желонкина Тамара Петровна,
Лукашевич Светлана Анатольевна

ВВЕДЕНИЕ В ФИЗПРАКТИКУМ

Практическое руководство

Редактор *В. И. Шкредова*
Корректор *В. В. Калугина*

Подписано в печать 27.03.2019. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 2,1
Уч.-изд. л. 2,3. Тираж 25 экз. Заказ 173.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017.
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.
Ул. Советская, 104, 246019, Гомель.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ