А.Ю. Матрончик, Е.В. Хангулян

ПОСОБИЕ
ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ
ДЛЯ УЧИТЕЛЕЙ ИНЖЕНЕРНЫХ
И ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ
КЛАССОВ

2016

ВВЕДЕНИЕ

Физика является экспериментальной наукой, поэтому основным инструментом познания мира в физике является наблюдение явления и последующие выделение его основных компонент, измерение основных физических величин, построение модели и физической картины протекания процессов в рамках данной модели. Осознание модельного характера нашего познания окружающего мира невозможно без личного участия человека в каком-либо физическом эксперименте. Поэтому школьный курс физики, из которого исключено проведение даже простейшего физического эксперимента, является недостаточным для формирования естественно научного мышления.

Цели и задачи лабораторного практикума в школьном курсе физики кратко можно сформулировать следующим образом:

ознакомить учеников с рядом физических явлений (относительно легко воспроизводимых в рамках учебного заведения):

научить школьников основным методам проведения физического эксперимента;

научить школьников основным методам представления и анализа полученных результатов;

применить знания, полученные в рамках теоретической части курса, на практике, и тем самым закрепить знание теоретического материала;

развить понимание физических закономерностей;

ознакомиться с устройством и применением основных физических приборов;

привить навыки экспериментальных исследований.

Работа в лабораториях должна рассматриваться как начало самостоятельной практической деятельности в качестве будущего инженера. Работая в лаборатории, школьник должен приобрести начальные навыки самостоятельного научного исследования и творческого подхода к решению практических задач.

Часть 1

ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ПРОВЕДЕНИЯ ЗАНЯТИЙ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ

Для инженерных и физико-математических классов видится целесообразным выделение отдельных часов на проведение занятий по физическому практикуму в специально оборудованных аудиториях и использование для занятий по физическому практикуму специализированных учебных пособий, которые могут быть созданы совместно с преподавателями университетов, при поддержке которых организованны инженерные или физико-математические классы. Учебное пособие должно содержать описания лабораторных работ, выполняемых учениками во время занятий физическим практикумом. Описание каждой работы должно включать в себя несколько разделов. Во-первых, необходимое для сознательного выполнения работы изложение основных понятий и закономерностей, характерных для изучаемого физического явления. Во-вторых, – подробное описание установки, измерительных приборов, в нее входящих, методов измерений с помощью данных приборов и правил техники безопасности при работе с ними. В-третьих, – перечень действий, которые должен выполнить школьник при выполнении работы и при обработке её результатов. Кроме того, в конце описания каждой работы, удобно привести контрольные вопросы, которые могут быть использованы для самостоятельной проверки учеником уровня подготовленности к работе.

Для эффективного использования аудиторного времени необходимо обязать школьников готовиться к выполнению лабораторной работы в часы, отведенные на самостоятельную работу. При подготовке к работе ученик должен изучить исследуемое явление, схему экспериментальной установки, методики измерений используемыми приборами, проанализировать формулы для расчета искомых величин и их погрешностей, а также таблицы для записи результатов. Подготовка к выполнению лабораторной работы должна быть зафиксирована в тетради для занятий физическим практикумом, так называемом лабораторном журнале.

Важно правильно оформить лабораторный журнал:

Все записи в журнале выполняются аккуратно ручкой на правой странице журнала (левая страница предназначается для выполнения расчетов). Следует писать достаточно свободно, оставляя место для возможных исправлений.

На новой странице (правой) журнала должны быть написаны номер и название лабораторной работы, дата ее выполнения. Начиная со следующей страницы (правой) необходимо написать цель работы, краткое теоретическое введение к работе, а затем каждый раз с новой страницы все задания, которые содержатся в выполняемой работе (см. ниже).

Теоретическое введение обязательно должно содержать следующие сведения: основные формулы теории (формулы, по которым производится вычисление определяемых в лабораторной работе величин, должны быть особо выделены); формулы для вычисления погрешностей; выполненную с помощью карандаша и линейки схему экспериментальной установки (если во всех заданиях используется одна и та же установка). На схеме должны быть представлены основные блоки и узлы без лишних подробностей.

Каждое задание обязательно должно содержать: номер (если их несколько) и название задания; выполненную с помощью карандаша и линейки схему экспериментальной установки (только если в каждом задании используется отдельная установка; в случае, если установка одна, ее схема должна быть во введении); таблицы для записи экспериментальных данных. Таблицы нужно чертить с помощью карандаша и линейки. Желательный размер клетки: не менее $1{,}5 \times 2{,}5$ см.

Уровень подготовки школьника к выполнению лабораторной работы проверяется учителем непосредственно перед началом работы на экспериментальной установке. По результатам беседы со школьником преподаватель допускает (или не допускает) ученика к выполнению работы.

Получив разрешение преподавателя, школьник должен приступить к выполнению работы, последовательно выполняя все пункты задания, указанные в лабораторном практикуме, связанные с измерительной частью работы. Важно следить за соблюдением школьниками правил техники безопасности при работе с приборами.

После выполнения измерений, ученик должен завизировать результаты измерения у преподавателя, при этом преподаватель делает отметку о выполнении работы в своем журнале.

После этого ученик в часы самостоятельных занятий должен последовательно выполнить все пункты задания, указанные в лабораторном практикуме, связанные с расчетной частью работы: заполнить все оставшиеся графы в таблицах, вычислить все необходимые величины и их погрешности, построить все графики. Графики строятся только на листе миллиметровой бумаги, и потом вклеиваются в лабораторный журнал. Размер графика должен занимать более половины листа лабораторного журнала. Работа завершается написанием заключения, в котором указывается:

а) какие явления или процессы изучались в настоящей работе;

б) что и каким методом измерялось в данной работе

в) что и каким способом вычислялось в данной работе;

г) окончательные результаты работы с указанием абсолютной и относительной погрешностей.

д) краткое обсуждение полученных результатов (в том числе всех графиков) и анализ погрешностей. Полученные значения следует сравнить с известными табличными значениями измеряемых величин. По результатам сравнения сделать вывод о «совпадении в пределах погрешности», «совпадении по порядку величины», либо о полном несовпадении полученных в работе результатов с табличными.

По окончании всех этапов выполнения лабораторной работы и написания заключения ученик должен отчитаться перед преподавателем. Зачет состоит в том, что ученик предъявляет преподавателю лабораторный журнал с соответствующими записями, проведенными при подготовке и выполнении работы, записями всех исходных данных, расчетов, графиков, вклеенных в соответствующие места журнала и заключения по работе. Принимая зачет, преподаватель проверяет правильность ведения рабочего журнала, результатов расчетов искомых величин, ошибок измерения, графиков, заключения по работе школьник должен уметь давать пояснения результатов работы и теоретических основ этой работы.

Проверка степени самостоятельности в проведении расчетов школьником может быть проведена (такая необходимость иногда возникает), например, так: ученику предлагается показать, как он проводил тот или иной этап расчета величин или как из его набора данных получена какая-либо точка графика.

Очень полезно предлагать школьнику изложить суть работы и результаты расчета устно, т.е. сделать доклад. Это оттачивает не только научную терминологию, но и умение строить логически последовательное изложение, поэтому практика доклада о проведенном эксперименте очень полезна для развития речи и соответственно научного мышления

Если все пункты лабораторной работы выполнены верно и школьник правильно понимает основу работы, то ставится зачет по работе, о чем делается соответствующая отметка в лабораторном журнале школьника и журнале преподавателя.

Часть 2

ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

В научных экспериментах термин «ошибка» не имеет обычного бытового значения как чего-то неправильного. Слово «ошибка» означает в науке неизбежную погрешность, сопутствующую любым измерениям. Поэтому мы будем считать два слова — «ошибка» и «погрешность» — равнозначными и использовать термин «ошибка» исключительно в значении «погрешность». Наука, которая занимается изучением и оценкой погрешностей, называется *теорией ошибок*. Она позволяет определить величину погрешностей данных измерений и дает указание, как их уменьшить, если это необходимо. При изучении любых экспериментальных наук эта теория занимает важное место, поскольку определение погрешностей измерений является существенной частью любого научного эксперимента.

Ни одно измерение, как бы аккуратно оно ни проводилось, не может быть абсолютно свободно от погрешностей. Поскольку измерения лежат в основе любой науки, то исключительно важно уметь рассчитывать и сводить эти погрешности к минимуму.

2.1 Виды погрешностей

В любом эксперименте ***истинное значение измеряемой величины*** (обозначим его X) неизвестно. Измеряя эту величину, получают лишь ***результат измерения*** x, в общем случае отличный от X.

Модуль разности

$$\left| X - x \right| = \Delta x \qquad (1)$$

называется *абсолютной погрешностью измеряемой величины*. Она также неизвестна, и задача теории ошибок — указать, как можно по результатам измерений оценить и саму измеряемую величину, и эту погрешность.

Отношение абсолютной погрешности измеряемой величины к модулю самой измеряемой величины называют ***относительной погрешностью*** и обычно выражают в процентах:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{\left| x \right|} \cdot 100\% \qquad (2)$$

Если измерение одной и той же физической величины производится несколько (N) раз, то полученные результаты измерений $x_1, x_2, ..., x_N$ не только отличаются от X, но чаще всего различны и между собой. На оценку погрешности измерения влияют различные факторы: условия измерений, характеристики измерительных приборов, сам экспериментатор, а также флуктуации измеряемой величины.

Естественно предположить, что факторы, приводящие к разбросу результатов, случайны. В таком случае в качестве наилучшей оценки искомой величины можно взять среднее арифметическое всех полученных результатов

$$\overline{x} = \frac{x_1 + x_2 + ... + x_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i \qquad (3)$$

Это следует из того, что случайное воздействие может как увеличить, так и уменьшить полученный результат относительно истинного. Погрешности, приводящие к появлению случайных отличий в результатах измерений, выполненных одним и тем же прибором в одинаковых условиях, называются ***случайными***. Чем больше раз проводится измерение, тем ближе будет результат, вычисленный по формуле (3), к неизвестному истинному значению измеряемой величины.

Необходимо различать ***случайный разброс результатов измерений*** $\{x_i\}$ (где $\{x_i\}$ — совокупность всех результатов измерений x_i), обусловленный флуктуациями физической величины из-за воздействия внешних факторов (в том числе и на прибор), и ***погрешность каждого из полученных значений*** x_i, обусловленную, во-первых, конечной точностью прибора и, во-вторых, так называемой погрешностью снятия показаний со шкалы. Погрешности в определении x_i имеются всегда, и они, очевидно, никак не зависят от количества проведенных измерений. Тем не менее, следует отдавать себе отчет, что несовершенство измерительных приборов и неточности снятия показаний сами по себе являются случайными факторами, влияющими на результат измерения (на число, записанное на бумаге), и потому, в случае правильной постановки эксперимента, при многократном повторении измерений их влияние, как и влияние любого случайного фактора, может быть сведено к минимуму.

Возможен, однако, и другой случай — когда увеличение числа измерений не приводит к уменьшению погрешности. Например, мы измеряем длину с помощью линейки, которая проградуирована неверно. Каждый раз будет получаться неправильное значение: если деления линейки нанесены чаще, чем нужно, то результат измерения будет завышен. Проведение измерения несколько раз не прибавит этому измерению точности — ошибка будет просто-напросто повторяться. Погрешности, которые невозможно свести к минимуму путем многократного повторения эксперимента, называются ***систематическими***. В большинстве случаев систематические ошибки приводят к постоянному отклонению результатов измерений от истинного значения физической величины. В отличие от случайных погрешностей, исключение влияния систематических ошибок требует детального знания установки, на которой проводится эксперимент. В качестве примера можно привести измерение периода колебаний маятника при помощи отстающего секундомера. Сколько бы раз ни проводилось измерение, результат всегда будет получаться заниженным. Другой пример систематической ошибки: измеренная в воздухе масса тела отличается от истинной, в силу закона Архимеда, на массу воздуха в объеме тела. Если после измерений не внести поправку, то результат взвешивания будет содержать систематическую ошибку.

Приведенные выше примеры обладают существенным различием: во втором примере поправку на “потерю веса” можно вычислить, зная плотность воздуха и плотность тела. В первом же примере поправку на запаздывание прибора ввести нельзя, так как о ней ничего неизвестно. Если недостоверность результатов удалось обнаружить, ошибку можно устранить, заменив секундомер на более точный.

<u>Возможные источники систематических погрешностей</u>:

- неисправность или неверная градуировка приборов;
- наличие постоянных неучтенных факторов, влияющих на исследуемое явление (например, присутствие ферромагнетика в непосредственной близости от

стрелки компаса, или преломление лучей света при прохождении сквозь атмосферу Земли при измерении высоты небесных тел);

- отличие реального объекта от применяемой модели (например, содержание примесей в исследуемом материале при определении плотности вещества);
- несовершенство методики, лежащей в основе опыта;
- применение упрощенных моделей вычисления (в случае косвенных измерений).

Причины, вызывающие систематические погрешности, исследуются в тех разделах физики, которые разрабатывают методику экспериментов. После выявления причин такие ошибки можно устранить или учесть. При выполнении измерений в учебных лабораториях систематические погрешности чаще всего не рассматриваются, так как считается, что они сведены к минимуму при постановке каждой конкретной лабораторной работы.

Наконец, третий тип погрешностей, с которыми приходится иметь дело, — грубые ошибки, или промахи. Источниками таких ошибок могут быть недостаток внимания экспериментатора (неверная запись показаний прибора, неправильно считанный отсчет и т. п.) или неожиданные сильные внешние воздействия на измерения (например, резкий порыв ветра при измерении угла отклонения нити).

Для устранения промахов необходимо соблюдать аккуратность в работе и записях результатов. Иногда можно выявить промах, повторив измерение, перейдя на другой участок шкалы прибора, либо повторив измерения спустя некоторое время, когда наблюдатель уже забыл полученные ранее числа.

2.2 Погрешности прямых и косвенных измерений.

Измерения физических величин делятся на прямые и косвенные. ***Прямым*** называется измерение, при котором искомая физическая величина измеряется непосредственно при помощи измерительного прибора. ***Косвенным*** называется измерение, при котором интересующая нас величина не измеряется непосредственно прибором, а вычисляется с использованием одного или нескольких непосредственно измеренных значений. При таких измерениях также необходимо вычислять погрешность результата, зная погрешности каждой из прямо измеренных величин в отдельности.

После выполнения измерений и необходимых вычислений корректной формой записи результата эксперимента является указание наилучшей оценки измеряемой величины и интервала, в котором (предположительно) лежит ее истинное значение:

$$X = \left(\bar{x} \pm \Delta x\right)$$

Эта запись означает, что $\left(\bar{x} + \Delta x\right)$ есть наибольшее вероятное значение измеренной величины, а $\left(\bar{x} - \Delta x\right)$ — *наименьшее*.

При этом нельзя утверждать, что истинное значение абсолютно точно лежит между $\left(\bar{x} - \Delta x\right)$ и $\left(\bar{x} + \Delta x\right)$. Можно лишь сказать, что X находится в указанном интервале с некоторой вероятностью, строго зависящей от выбора Δx. Интервал значений $\left(\bar{x} - \Delta x; \bar{x} + \Delta x\right)$ называется ***доверительным интервалом***, а соответствующая этому интервалу вероятность того, что истинное значение лежит внутри него, — ***доверительной вероятностью*** α:

$$P\left(\overline{x} - \Delta x < X < \overline{x} + \Delta x\right) = \alpha \qquad (4)$$

Запись погрешности измерения без указания доверительной вероятности теряет смысл, а сравнение и учет погрешностей различных источников могут быть произведены только, если все погрешности соответствуют одной и той же доверительной вероятности.

Для удобства сравнения и приведения погрешностей к одинаковым значениям α в качестве единой меры измерения доверительных интервалов принято использовать так называемое ***стандартное отклонение***. Стандартное отклонение, обозначаемое символом “σ”, — это такая ширина доверительного интервала, которая отвечает доверительной вероятности $\alpha = 0,68$. Т. е. для разных погрешностей (например, обусловленных разными источниками) σ может быть разным по величине, однако если $\Delta x = \sigma$, то $\alpha = 0,68$.

Большинство методов обработки результатов измерений позволяют выбирать (задавать) доверительную вероятность α и, следовательно, варьировать доверительный интервал в зависимости от требуемой надежности полученного результата. Доверительный интервал $\left(\overline{x} - \sigma, \overline{x} + \sigma\right)$ называется ***стандартным***, и считается, что если при записи погрешности значение доверительной вероятности не указано, то она равна 0,68. В таблице ниже приведены значения α для нескольких других погрешностей Δx, выраженных в единицах σ:

Δx	0,5σ	1,0σ	1,5	2,0σ	2,5σ	3,0σ
α	0,38	0,68	0,87	0,95	0,988	0,997

2.2.1. Погрешности одного измерения

Вначале зададимся целью определить абсолютную погрешность $\Delta x_{(1)}$ единичного измерения физической величины. Она может быть обусловлена двумя источниками:

- *Погрешность измерительного прибора* — это внутренняя характеристика прибора, как правило, определяемая в ходе калибровки сравнением показаний прибора с более точным (эталонным) устройством. Она указывается либо на самом приборе, либо в сопроводительных документах (в паспорте прибора).

Данную погрешность принято называть ***погрешностью показаний прибора*** либо ***приборной погрешностью***.

- *Ошибки экспериментатора при снятии показаний со шкалы прибора* — в этом случае ошибка зависит от человека, проводящего эксперимент, так что можно сказать, что данная погрешность субъективна.

Эту погрешность принято называть ***погрешностью отсчета*** либо ***погрешностью снятия показаний***.

Таким образом, ошибка при однократном измерении физической величины в общем случае складывается из двух частей: приборной погрешности и погрешности, обусловленной конечной точностью снятия показаний. Чтобы сравнить и учесть все источники погрешностей, надо выразить отвечающие им величины Δx в терминах стандартного отклонения σ и привести их к одинаковому количеству «сигм», расширив или сузив соответствующие доверительные интервалы в зависимости от необходимой доверительной вероятности.

После того, как ошибки приведены к одному значению доверительной вероятности, определяется итоговая погрешность. Поскольку погрешность прибора и погрешность снятия показаний имеют различную природу, то они, естественно, являются независимыми, в таком случае суммарная погрешность определяется как корень из суммы их квадратов:

$$\Delta x_{(1)} = \sqrt{\Delta x_{приб}^2 + \Delta x_{отсч}^2} \qquad (5)$$

В случае, если одна из вносящих вклад погрешностей значительно превосходит другую (на один или несколько порядков), в качестве итоговой погрешности достаточно взять максимальную из них:

$$\Delta x_{(1)} = \max(\Delta x_{приб}, \Delta x_{отсч}) \qquad (6)$$

2.2.2. Погрешности серии измерений

Однократное измерение физической величины не несет никакой информации о присущих любому эксперименту случайных погрешностях. Чтобы оценить такие погрешности, необходимо провести серию измерений, то есть повторить измерение несколько раз. Если результаты измерений одной и той же физической величины отличаются друг от друга, то мы имеем дело с ситуацией, когда случайная ошибка играет существенную роль.

В соответствии со сказанным выше, результат каждого отдельного измерения имеет некоторую погрешность из-за конечной точности прибора и точности снятия показаний экспериментатором. Поэтому, когда мы говорим, что результаты отличаются друг от друга, речь идет о несовпадении в пределах данной погрешности.

Рассмотрим способы оценки случайной погрешности.

Допустим, сделано N измерений, и мы получили набор отличающихся друг от друга результатов:

$$\left\{x_i\right\} = \left\{x_1, x_2, ..., x_N\right\} \qquad (7)$$

Если все измерения проделаны одним и тем же методом и одинаково тщательно, такие измерения называются *равноточными*.

Как говорилось раньше, при определенных условиях наилучшей оценкой истинного значения является ***среднее арифметическое значение*** $\bar{x}$, вычисленное из всего ряда результатов измерений:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + ... + x_N}{N} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i \qquad (8)$$

Теперь наша задача — определить его погрешность: величину, характеризующую точность, с которой $\bar{x}$ приближено к истинному значению X. При этом будем считать, что систематические ошибки отсутствуют.

Для оценки величины этой погрешности существует несколько способов. Наиболее распространена оценка с помощью стандартной (среднеквадратичной) ошибки. Иногда также применяется средняя арифметическая ошибка. Эти погрешности характеризуют среднюю случайную погрешность отдельных измеренных значений серии $x_1, x_2, ..., x_N$.

Очевидно, что чем больше каждое отдельное значение x_i отличается от среднего $\bar{x}$, которое мы считаем наиболее вероятным значением физической величины, тем хуже мы знаем результат. Поэтому в величину погрешности должны входить разности $(x_i - \bar{x})$, называемые ***отклонениями*** x_i от $\bar{x}$.

Понятно, что в качестве величины, характеризующей точность, нельзя брать усредненное отклонение $\overline{\left(x_i - \bar{x}\right)}$, потому что такое среднее равно нулю из-за случайного характера отклонения результата измерения от истинного значения (отклонения с равной вероятностью происходят и “в плюс”, и “в минус”). Чтобы обойти эту проблему, надо сделать так, чтобы все усредняемые отклонения были положительными. Проще всего этого можно добиться двумя способами: возведя $(x_i - \overline{x})$ в квадрат, либо взяв абсолютное значение $\left|x_i - \overline{x}\right|$.

Если мы используем первый подход, то полученная погрешность называется среднеквадратичной погрешностью, а во втором случае средней арифметической погрешностью

Среднеквадратичной ошибкой, или ***стандартным отклонением*** измерения называется величина определяемая следующим способом:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - \overline{x}\right)^2}{N-1}}\,. \tag{9}$$

Среднеквадратичная ошибка σ_x — это случайная ошибка каждого единичного результата при проведении N измерений. В отличие от описанных ранее приборных погрешностей, ее невозможно определить по одному измерению, и необходимо обрабатывать все N результатов серии. Она характеризует случайный разброс результатов измерения $\{x_i\}$ вокруг наиболее вероятного значения $\overline{x}$.

Если увеличивать число измерений, то величина σ_x будет уточняться (так как в нее будет входить все больше отклонений отдельных x_i), стремясь к некоторому постоянному значению σ:

$$\sigma = \lim_{N\to\infty} \sigma_x \tag{10}$$

Именно этот статистический предел на самом деле и является истинным стандартным отклонением случайной величины x_i от $\overline{x}$, которое является важным параметром нормального распределения, о котором пойдет речь далее. Квадрат этой величины σ^2 называется ***дисперсией*** измерений. В действительности, однако, поскольку у нас нет возможности сделать бесконечное число измерений, мы всегда вычисляем не величину σ, а ее приближенное значение σ_x, которое тем ближе к σ, чем больше количество измерений *N*.

В теории ошибок можно доказать, что точность среднего арифметического значения при нормальном распределении результатов (распределении Гаусса) определяется величиной

$$\sigma_{\overline{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - \overline{x}\right)^2}{N\left(N-1\right)}}, \qquad (11)$$

которая называется ***среднеквадратичной погрешностью среднего*** или ***стандартным отклонением среднего***.

Эта величина характеризует случайный разброс средних значений, полученных при повторениях серии из *N* измерений, таким образом, определяя погрешность $\overline{x}$ как наилучшей оценки X .

Реже для определения погрешности используется средняя ***арифметическая погрешность измерения***, вычисляемая как

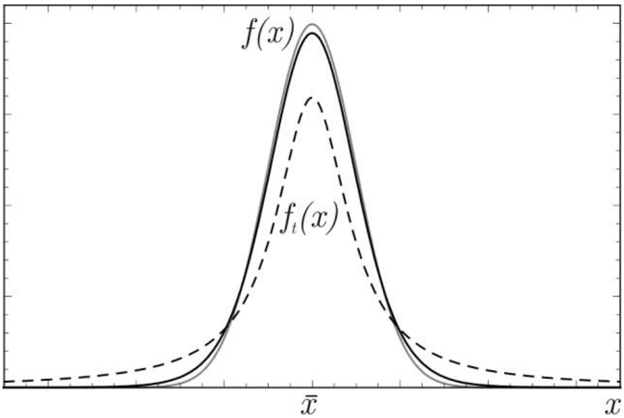
$$\rho_x = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left|x_i - \overline{x}\right|}{\sqrt{N(N-1)}}$$

Аналогично среднеквадратичной ошибке величина ρ_x уточняется с ростом числа измерений N и стремится к некоторому истинному значению средней арифметической ошибки.

Определенным преимуществом использования средней арифметической ошибки ρ_x является сравнительная простота вычисления. Однако в большинстве случаев целесообразнее пользоваться величиной σ_x. В первую очередь, потому, что, пользуясь стандартным отклонением σ_x, легче определять доверительные вероятности: как упоминалось выше, для любой величины доверительного интервала, выраженного в единицах стандартного отклонения, доверительная вероятность может быть рассчитана или взята из таблицы.

Строго говоря, использование распределения Гаусса предполагает, что проделано очень большое (бесконечно большое) число измерений. В этом случае мы знаем истинное стандартное отклонение σ и можем, вычислив соответствующий интеграл от функции плотности вероятности, определить доверительную вероятность для любого доверительного интервала. Однако в реальности, как правило, мы можем определить лишь величину $\sigma_{\bar{x}}$ соответствующую тому или иному количеству измерений N, чаще всего сравнительно небольшому (в лабораторных работах редко встречаются ситуации, когда одна и та же физическая величина измеряется более 20 раз). Если считать, что получаемые нами значения $\sigma_{\bar{x}}$ *совпадают* с величиной σ и пользоваться табличными данными для нахождения доверительной вероятности, основанными на нормальном распределении, то полученные таким образом значения α окажутся неверными (завышенными).

Это результат того, что, определяя среднеквадратичную погрешность среднего из малого числа наблюдений, мы определяем ее с малой точностью (напомним, что среднеквадратичная погрешность с ростом числа измерений «уточняется», стремясь к стандартному отклонению, входящему в формулу для распределения Гаусса). Когда мы заменяем σ на $\sigma_{\bar{x}}$, погрешность оказывается определенной неверно, и мы *уменьшаем надежность* нашей оценки, причем тем сильнее, чем меньше проводилось измерений.



Распределения Гаусса $f(x)$ с σ=1 (серым) и Стьюдента $f_t(x)$ для N=10 (черная сплошная линия) и N=1 (пунктир)

В случае небольшого числа количества измерений N распределение результатов измерений выглядит иначе, и называется **распределением Стьюдента**. График распределения Стьюдента шире кривой распределения Гаусса, так как при недостаточно большом числе измерений мы имеем меньшую информацию о величине, и потому ее разброс относительно среднего значения оказывается больше. На практике это означает, что доверительный интервал, соответствующий какой-либо доверительной вероятности, в случае распределения Стьюдента будет шире, чем в случае нормального распределения, и тем самым будет учтено отличие величины $\sigma_{\bar{x}}$ от значения σ.

Чтобы получить доверительный интервал в этом случае, необходимо умножить величину стандартного отклонения среднего на так называемый **коэффициент Стьюдента**, который отражает отличие в распределениях для конечного и бесконечного числа опытов. Этот коэффициент зависит от α и от N, и при больших N стремится к величине, которая будет соответствовать гауссовскому распределению (так, для $\alpha = 0,68$ при N>60 коэффициент Стьюдента $t_{\alpha N}$ стремится к 1, а Δx — к стандартному отклонению нормального распределения σ).

Таким образом, при малом количестве измерений алгоритм вычисления случайной погрешности становится следующим:

- Вычисляется стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{x}}$;
- Выбирается желаемая доверительная вероятность α;
- Из таблицы коэффициентов Стьюдента берется $t_{\alpha N}$, соответствующий выбранной доверительной вероятности α и количеству проведенных измерений N;
- $\sigma_{\bar{x}}$ умножается на найденный коэффициент Стьюдента $\Delta x = t_{\alpha N} \cdot \sigma_{\bar{x}}$;
- Результат записывается в виде $x = \bar{x} \pm \Delta x$;

- Указывается доверительная вероятность α и относительная погрешность $\delta x = \dfrac{\Delta x}{\bar{x}}$.

Таблица коэффициентов Стьюдента, используемых для определения доверительного интервала в зависимости от требуемой доверительной вероятности и проделанного количества измерений, приведена ниже.

Таблица коэффициентов Стьюдента

N	α									
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
2	0,73	1,00	1,38	2,0	3,1	6,3	12,7	31,8	63,7	636,6
3	0,62	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	9,9	31,6
4	0,58	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8	12,9
5	0,57	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6	8,6
6	0,56	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9
7	0,55	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
8	0,55	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5	5,4
9	0,54	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0
10	0,54	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3	4,8
12	0,54	0,70	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,1	4,5
15	0,54	0,69	0,87	1,1	1,3	1,8	2,1	2,6	3,0	4,1
20	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,9	3,9
25	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,7
30	0,53	0,68	0,85	1,1	1,3	1,7	2,0	2,5	2,8	3,7

60	0,53	0,68	0,85	1,0	1,3	1,7	2,0	2,4	2,7	3,5
∞	0,52	0,67	0,84	1,0	1,3	1,6	2,0	2,3	2,6	3,3

Иногда при проведении эксперимента описанные ранее статистические методика вычисления случайной погрешности оказываются довольно трудоемкими, но при этом не обеспечивают высокого качества обработки результатов. В таких случаях для грубой оценки погрешности допустимо использовать так называемый ***метод Корнфельда***.

Согласно этому методу, доверительный интервал выбирается так, чтобы в него попали все результаты измерений, а наилучшей оценкой истинного значения физической величины считается среднее арифметическое между максимальным и минимальным результатами:

$$x_{наил} = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2} \qquad (12)$$

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2} \qquad (13)$$

Такому доверительному интервалу соответствует доверительная вероятность

$$\alpha = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{N-1} \qquad (14)$$

В этом заключается *существенный недостаток данного метода:* доверительная вероятность не выбирается экспериментатором, а зависит от количества проведенных измерений.

Это обстоятельство значительно усложняет использование погрешностей, оцененных методом Корнфельда, в дальнейших вычислениях, например, при косвенных измерениях

Отметим, что в реальных экспериментах, где с целью повышения точности стремятся увеличить число измерений, метод Корнфельда не применяется.

Часть 3

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ДЛЯ ВЫПОЛНЕИЯ НА ЗАНЯТИЯХ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ В ИНЖЕНЕРНЫХ И ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ КЛАССАХ

Использование компьютеров и смартфонов в лабораторном физическом практикуме может удовлетворить требованиям сегодняшнего, а во многом, и завтрашнего дня к лабораторной базе курса физики в школах и лицеях. В рамках создания научно-образовательного центра по курсу общая физика в предуниверситарии НИЯУ МИФИ проводится модернизация технического оснащения лабораторий и программного обеспечения физических установок в физико-математических и инженерных классах.

В связи с этим, во-первых, возникает проблема выбора современных, надежных и экономичных средств измерения и обработки данных лабораторного эксперимента. Для достижения указанных целей можно использовать различные аппаратно-программные средства автоматизации измерений, диагностики, управления и моделирования. Решением поставленной задачи может стать система измерения и обработки данных CONNECTED SCIENCE SYSTEM (CSS), реализованная в устройстве LABQUEST 2 с набором из более 70-ти датчиков от Vernier Software & Technology. Устройство представляет собой специализированный планшет с соответствующим программным обеспечением.

Во-вторых, подавляющее большинство лицеистов и школьников имеют собственные мобильные устройства:

планшеты и смартфоны, и поэтому планируется использовать эти мощные персональные компьютеры на всех этапах учебного процесса: в теоретической подготовке; для выполнения домашних заданий; при подготовке к выполнению лабораторных работ; для виртуального моделирования; для измерения физических величин; фото и видеосъёмки установки, приборов, лабораторного журнала; сохранения результатов измерений, их последующей обработки; представления результатов измерений и всей работы преподавателю по беспроводным каналам связи (Wi-Fi, Bluetooth).

Ниже рассматриваются примеры использования смартфонов в конкретных лабораторных работах.

Лабораторная работа №1

ИЗУЧЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Цель работы: исследование зависимости периода колебаний математического маятника от его длины и определение ускорения свободного падения g.

Введение

Математический маятник представляет собой груз небольших размеров, подвешенный на тонкой нерастяжимой нити. Размеры груза должны быть много меньше длины нити L, а его масса много больше массы нити, чтобы груз можно было считать материальной точкой в условиях данной работы и использовать формулы, справедливые для математического маятника.

Одним из методов определения ускорения свободного падения g является расчёт на основании измерений длины маятника и периода его малых колебаний. Для периода T малых колебаний математического маятника справедливо следующее выражение:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}, \qquad (1.1)$$

где L – длина маятника, g – значение ускорения свободного падения.

Из приведённого выше выражения можно получить формулу для ускорения свободного падения:

$$g = 4\pi^2\frac{L}{T^2} \qquad (1.2)$$

Примечание: период колебаний маятника не зависит от массы маятника.

Схема установки

На штатив (1) к зажиму (2) крепится нить (3). Ко второму концу нити крепится груз (гайка) (4). Длина нити определяется с помощью мерной ленты (сантиметра) (6). Отклонив груз от положения равновесия, запускают процесс колебаний, длительность которых определяют с помощью электронного секундомера или собственного смартфона (5) (см. рис. 1.1).

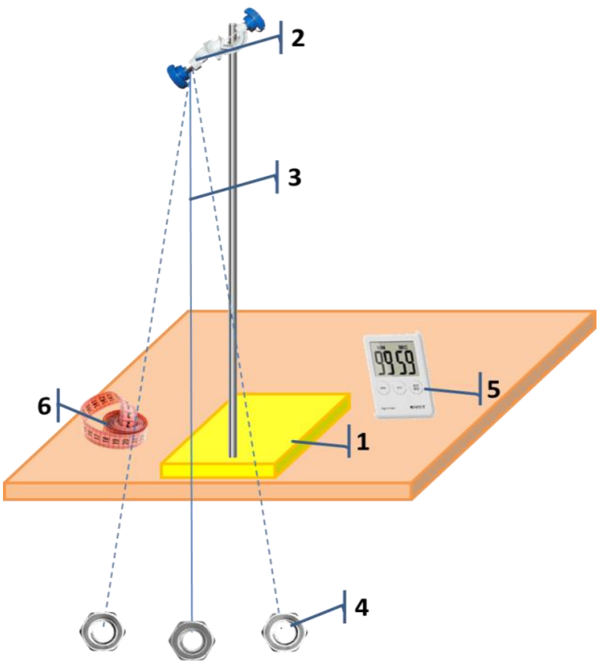


Рис. 1.1. Схема установки

Если штатив поставить на край стола и повернуть зажим так, как показано на рисунке 1.1, то можно использовать нить длиной более метра.

Методика выполнения работы

Соберите штатив, прикрепите в верхней части зажим. Отмерьте нить длиной 800 – 1000 мм и привяжите один конец нити к зажиму, а к другому концу – груз (гайку). С помощью мерной ленты измерьте длину нити.

Для повышения точности определения периода следует зафиксировать время τ нескольких N полных колебаний. Значение периода T получаем следующим образом:

$$T = \frac{\tau}{N},$$

где N – число колебаний, для которых с помощью секундомера или смартфона определяется общее время τ.

Исходя из полученных данных, рассчитывается значение ускорения свободного падения.

Порядок выполнения работы

Заполните таблицу 1.1, указав характеристики образцов, измерительного оборудования, а также - приборные погрешности.

Таблица 1.1 – Приборы и принадлежности

Приборы и принадлежности	Технические характеристики
Мерная лента	Предел измерений: $L = \_ \div \_\, м$; приборная погрешность измерений: $(\Delta l)_{пр} = \_\, м$.
Груз	Описание груза (материал, параметры и пр.)
Нить	Описание нити (параметры и пр.)
Электронный	Предел измерений: $t = \_ \div \_\, с$;

секундомер	приборная погрешность измерений: $(\Delta t)_{пр} = \_\ c$.
Смартфон	Предел измерений: $t = \_ \div \_\ c$; приборная погрешность измерений: $(\Delta t)_{пр} = \_\ c$.

<u>Задание 1.</u> Определение величины ускорения свободного падения

1.1 Отрежьте нить длиной примерно $600 \div 800$ мм.

1.2 Возьмите груз (гайку), закрепите ее через отверстие на одном конце нити, а другой конец нити привяжите к зажиму на штативе, выступающему в качестве точки подвеса.

1.3 Используя мерную ленту, придерживая за груз, измерьте длину нити от точки крепления до геометрического центра груза, расположив ее вертикально.

1.4 Занесите численные значения длины L маятника в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Длина маятника

№ измерения	$L, мм$	$< L >$,мм	$(\Delta L)_{сл}$, мм	$(\Delta L)_{пр}$, мм	ΔL, мм
1					
2					
3					

1.5 Рассчитайте и запишите в таблицу 1.2 значения $L_{ср}$, $(\Delta L)_{сл}$, $(\Delta L)_{пр}$, сравните последние два и запишите величину абсолютной погрешности ΔL.

Для расчета указанных выше величин следует использовать формулы:

$$< L >= (L_{max} + L_{min})/2, \qquad (1.3)$$

$$\Delta L = (L_{max} - L_{min})/2. \qquad (1.4)$$

1.6 Расположите маятник вертикально, отклонить его, взяв за груз, от положения равновесия на угол не более 10° и отпустить, задав ему колебательное движение.

Таблица 1.3 – Определение ускорения свободного падения

№ измерения	τ, с	N	T, с	g, м/с^2
1	60			
2	60			
3	60			
$< T >, < g >$,				
$\Delta T, \Delta g$				

1.7 При помощи электронного секундомера или смартфона определите число N полных колебаний за 1 минуту (60 секунд). Измерения проводите не менее трёх раз, а результаты занесите в таблицу 1.3.

1.8 Рассчитайте по формуле (1.5) и запишите в таблицу 1.3 значения периодов T.

$$T = \frac{\tau}{N} \qquad (1.5)$$

1.9 Рассчитайте и занесите в таблицу 1.3 величину $< T >$, и величину абсолютной погрешности ΔT (как максимальную из приборной и случайной). Значения величин следует вычислять по формулам (1.3) и (1.4).

1.10 Рассчитайте и запишите в таблицу 1.3 значения g и Δg, величину которых можно получить по формулам:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}, \quad (1.6)$$

$$\Delta g = g\sqrt{E_L^2 + E_T^2}. \quad (1.7)$$

Примечание: Для расчета относительных погрешностей использовать следующее выражение:

$$E_x = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle}. \quad (1.8)$$

1.11 Запишите под таблицей 1.3 полученное расчетное значение ускорения свободного падения в виде:

$g = (\_ \pm \_)\ м/c^2$

Задание 2. Исследование зависимости периода колебаний математического маятника от его длины

2.1 Проделайте измерения и расчёты аналогично изложенным в **задании 1** для нити длиной примерно $300 \div 500$ мм.

2.2 Результаты измерений и расчётов занесите в таблицы 1.4, 1.5 (аналогичные таблицам 1.2, 1.3).

2.3 Запишите под таблицей 1.5 полученное расчетное значение ускорения свободного падения в виде:

$g = (\_ \pm \_)\ м/c^2$.

2.4 Сделайте вывод о зависимости периода колебаний маятника от его длины.

2.5 Сравните точности измерений значения ускорения свободного падения электронным секундомером и вашим смартфоном.

2.6 Напишите заключение к работе, используя результаты 1 и 2 заданий, сравнить экспериментальное значение g со справочным значением, объяснить полученный результат и расхождения.

Контрольные вопросы

1. От каких параметров зависит период колебаний математического маятника?

2. Чему будет равен период колебаний при длине $L = 100$ м?

3. Чему равна длина L маятника, если период $T = 1$ с?

4. При каких условиях можно считать маятник математическим?

5. Как зависит величина g от длины маятника?

6. Как зависит величина g от длительности периода маятника?

Лабораторная работа №2

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КАТУШЕК ГЕЛЬМГОЛЬЦА.

Цель: *Изучение свойств магнитного поля. Исследование пространственного распределения поля, создаваемого парой катушек.*

ПРИБОРЫ и ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Измерительные линейки;
2. Датчик Холла;
3. Цифровой тесламетр;
4. Цифровой мультиметр;
5. Источник напряжение, универсальный;
6. Катушки Гельмгольца;
7. Струбцины;
8. Смартфон с программой измерения магнитного поля (например, металлоискатель).

ВВЕДЕНИЕ

Если разместить рядом два проводника и пропустить по ним токи, то на каждый из проводников со стороны другого будет действовать определённая сила. Принято считать, что такое взаимодействие токов осуществляется через поле, называемое *магнитным*.

Магнитное поле имеет направление и его удобно характеризовать векторной величиной. Эту силовую характеристику поля обозначают буквой **B**. По историческим причинам её называют *магнитной индукцией*.

Опыт показывает, что для магнитного поля, как и для электрического, справедлив принцип суперпозиции: *поле* **B**, *порождаемое несколькими движущимися зарядами (токами), равно векторной сумме полей* $\mathbf{B}_i$, *порождаемых каждым зарядом (током) в отдельности*:

$$\mathbf{B} = \sum \mathbf{B}_i \tag{2.1}$$

Био и Савар исследовали свойства магнитного поля, создаваемого тонкими проводами различной формы. Лаплас, проанализировав результаты исследований, вывел формулу:

$$d\boldsymbol{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I[d\boldsymbol{l},\boldsymbol{r}]}{r^3}, \tag{2.2}$$

где $d\boldsymbol{B}$ – поле создаваемое элементом проводника $d\boldsymbol{l}$, с протекающим по нему током *I*, на расстоянии r от этого элемента. Это соотношение носит название: *закон Био – Савара – Лапласа* или более кратко *закон Био – Савара*.

Найдем поле **B** на оси кругового тока радиуса R на расстоянии z от центра контура (рис. 2.1). Вектор $d\boldsymbol{B}$ перпендикулярен плоскости, образованной элементом контура $d\boldsymbol{l}$ и точкой, в которой мы ищем поле. Разложим вектор $d\boldsymbol{B}$ на составляющие: $d\mathbf{B}_r$ – направленный вдоль радиуса контура и $d\mathbf{B}_z$ – направленный вдоль оси z. Из соображений симметрии понятно, что радиальные составляющие – $d\mathbf{B}_r$ компенсируют друг друга, а осевые $d\mathbf{B}_z$ – складываются.

Следовательно, результирующий вектор **B** направлен вдоль оси контура.

Очевидно, что модуль вектора $dB_z = dB(R/b)$, поэтому:

$$dB_z = dB(R/b) = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\,dl}{b^2}\frac{R}{b}$$

Проинтегрировав по всему контуру и заменив b на $(z^2 + R^2)^{1/2}$, получим

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi}(I\,2\pi R)\frac{R}{\sqrt{\left(z^2 + R^2\right)^3}} = \frac{\mu_0 I}{2}\frac{R^2}{\left(z^2 + R^2\right)^{3/2}}. \quad (2.3)$$

Это выражение не зависит от знака z и, следовательно, в точках оси, симметричных относительно центра контура, магнитная индукция B имеет одинаковое направление и величину.

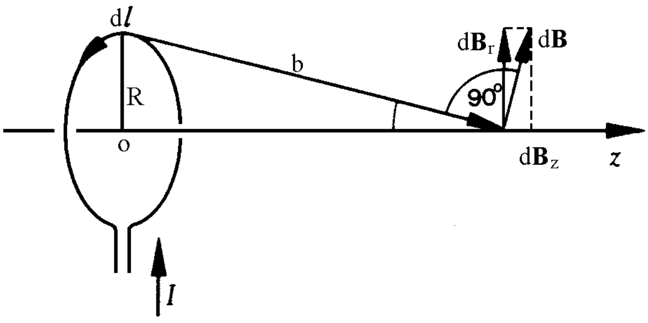


Рис. 2.1

Положив z = 0 в формуле (2.3), получим формулу для магнитной индукции в центре контура

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2p_m}{R^3}, \quad (2.4)$$

где p_m – дипольный магнитный момент.

Если вместо одного контура с током имеется несколько контуров, например N, то в таком случае поле увеличивается в N раз

$$B = \frac{\mu_0 IN}{2} \frac{R^2}{\left(z^2 + R^2\right)^{3/2}} \tag{2.5}$$

или же

$$B = \frac{\mu_0 IN}{2R} \frac{1}{\left(1 + \left(z/R\right)^2\right)^{3/2}} . \tag{2.5а}$$

Перейдём теперь к рассмотрению системы соосных катушек. Такая система носит название – катушки Гельмгольца[1].

Катушки Гельмгольца используются для получения практически однородного магнитного поля. В идеальном случае они представляют собой два одинаковых кольцевых витка, соединенных между собой последовательно и расположенных на расстоянии, равном радиусу витка друг от друга. Обычно катушки Гельмгольца состоят из двух катушек, на которых намотано некоторое количество витков, причем толщина катушки должна быть много меньше их радиуса. В реальных системах толщина катушек может быть сравнима с их радиусом. Таким образом, катушками Гельмгольца являются две соосно-расположенных одинаковых катушки, расстояние между центрами которых приблизительно равно их среднему

[1] **Герман Людвиг Фердинанд фон Гельмгольц** (1821 – 1894 гг., *Hermann von Helmholtz*) — немецкий физик, физиолог и психолог.

радиусу. В центре системы имеется зона однородного магнитного поля.

Пусть расстояние между центрами катушек равно a. Выбрав за начало отсчета, центр симметрии катушек, определим величину магнитной индукции на оси z между катушками.

В силу принципа суперпозиции поле на оси системы будет складываться из полей каждой из катушек $\mathbf{B} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2$.

В соответствии с формулой (2.5а) найдём:

$$B = \frac{\mu_0 IN}{2R}\left(\frac{1}{\left(1+(A_1)^2\right)^{3/2}} + \frac{1}{\left(1+(A_2)^2\right)^{3/2}}\right), \qquad (2.6)$$

где $A_1 = \frac{(a/2+z)}{R}$, $A_2 = \frac{(a/2-z)}{R}$, a – расстояние между катушками, z – координата точки наблюдения магнитного поля.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка для изучения свойств магнитного поля (рис. 2.2) состоит из пары катушек (катушки Гельмгольца) радиуса R = 200 мм, и числа витков N = 154, цифровых тесламетра и мультиметра, датчика Холла (входит в комплект тесламетра), предназначенного для определения величины магнитного поля, универсального блока питания, двух линеек длиной 1000 мм, лабораторного штатива и соединительных проводов.

Электрическая принципиальная схема включения катушек приведена на рис. 2.3. Катушки включаются в цепь последовательно, таким образом, чтобы токи в обмотках имели одно и то же направление.

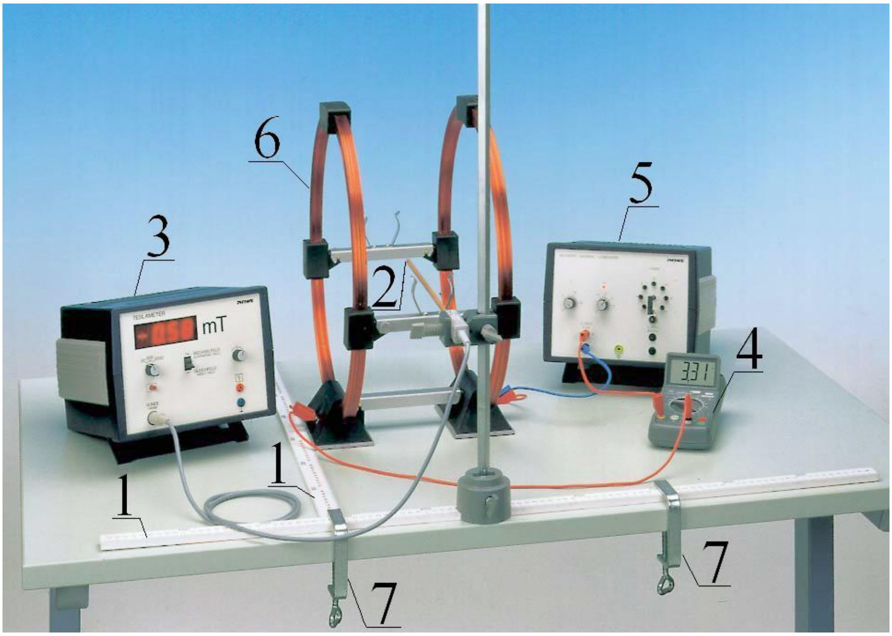


Рис. 2.2. Установка для изучения свойств магнитного поля.

Постоянное напряжение U в цепи выбирается в интервале от +18 В до -18 В, при этом ток I не должен превышать 3,5 А.

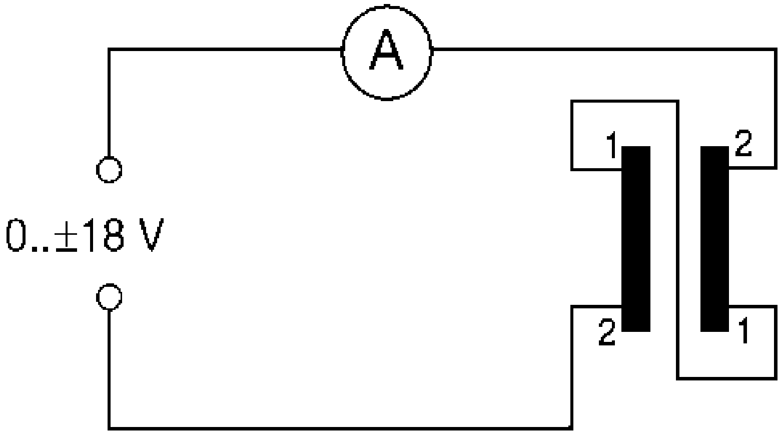


Рис. 2.3. Принципиальная электрическая схема включения катушек.

Внимание! В начале каждой серии измерения необходимо калибровать датчик Холла к нулю при отсутствии магнитного поля катушек. Для калибровки датчика используются рукоятки грубо и плавно на лицевой панели тесламетра.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Прежде чем включить питание схемы, необходимо проверить правильность ее монтажа, правильность начальных положений различных регулировок, а также подготовиться к проведению измерений. Не превышать рекомендуемых значений тока. Не оставлять установку включенной без присмотра.

Включив установку, необходимо провести измерения, не отвлекаясь от проведения измерений.

Закончив измерения, выключить установку и разобрать схему.

ЗАДАНИЕ 1

Измерения осевой составляющей индукции магнитного поля на оси системы катушек.

В этом задании (и во всех последующих) за начало отсчёта принимается центр симметрии катушек.

1. Катушки установлены на расстоянии *a,* равном радиусу катушек (200 мм).
2. Датчик тесламетра расположить на оси системы катушек так, как указано на рис. 2.4.
3. Перемещая датчик вдоль оси z измерить зависимость величины магнитной индукции B_z поля от координаты z. Координата z изменяется в интервале -100 мм до

+100 мм, с рекомендуемым шагом 20 мм. Значения измеренных величин записать в *таблицу 2.1*.

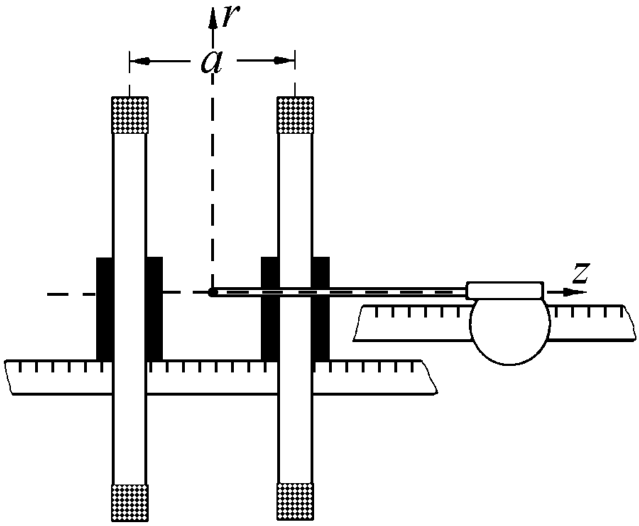


Рис. 2.4 Измерение осевой компоненты B_z по оси системы.

Таблица 2.1.

№ п/п	z, мм	B_z, мТл (a = R)	
		экспериментальная	теоретическая
1	-100		
2	-80		
…	…	…	…

Измерения величины магнитной индукции на оси z можно проводить также с помощью смартфона, имеющего установленную программу (рис. 2.5)

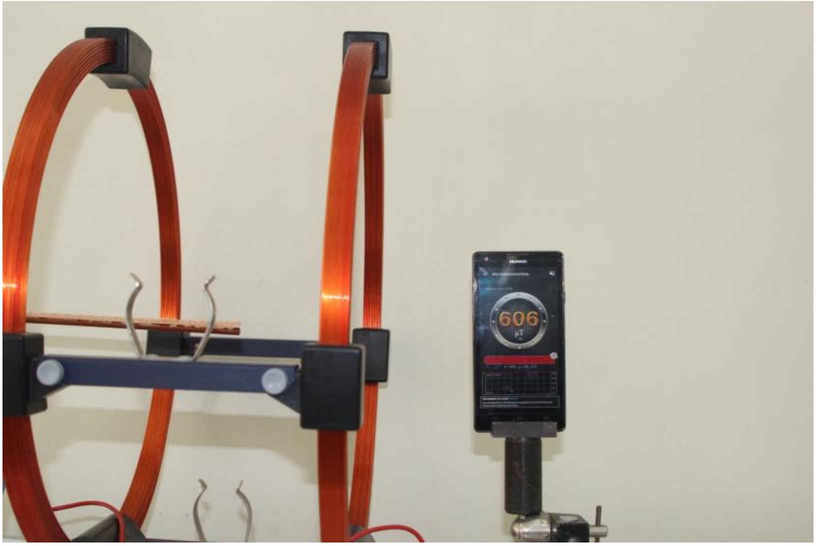


Рис. 2.5 Измерение осевой компоненты B_z смартфоном

ЗАДАНИЕ 2

Измерения осевой составляющей индукции магнитного поля вне оси системы катушек.

В силу симметричности системы достаточно произвести измерения в одной половине исследуемой области.

1. Используя предыдущую схему установки, сместить датчик Холла по радиусу катушек на расстояние r = 100 мм (рис.2.6).
2. Перемещая датчик вдоль оси z, с шагом 20 мм, измерить зависимость величины магнитной индукции B_z поля от координаты z. Значения измеренных величин записать в *таблицу 2.2*.
3. Повторить измерения для r = 140 мм и 160 мм.

таблица 2.2.

№ п/п	z, мм	$B_z(z, r)$, мТл		
		r = 100 мм	r = 140 мм	r = 160 мм
1	0			
2	10			
…	…	…	…	…

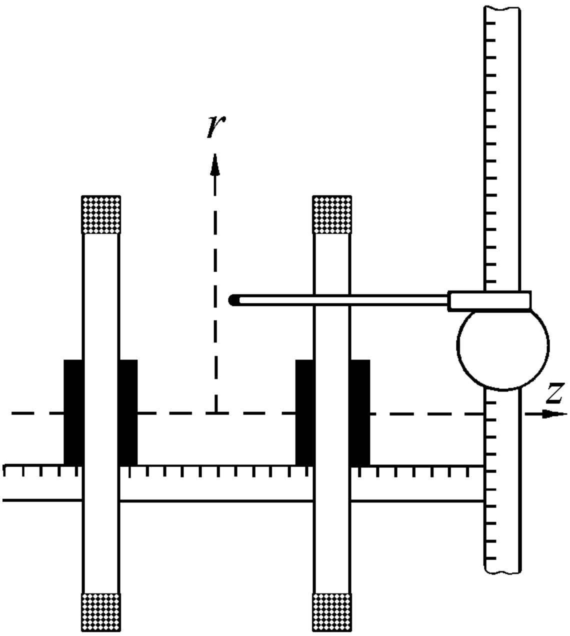


Рис. 2.6. Измерение $B_z(z, r)$ вдоль оси z с параметром r.

ЗАДАНИЕ 3

Измерения радиальной составляющей индукции магнитного поля.

Для измерения радиальной составляющей поля необходимо повернуть систему катушек на 90°. Схема приведена на рисунке 2.7.

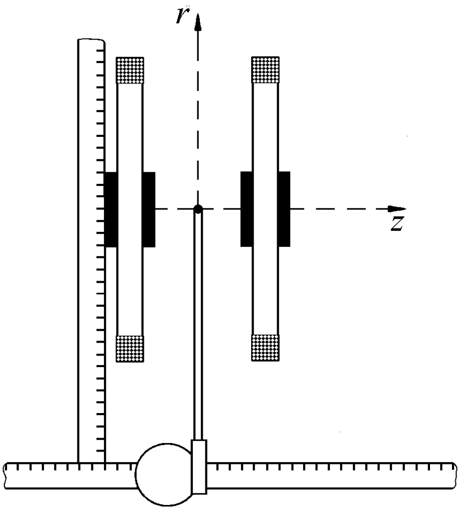


Рис. 2.7. Измерение $B_r(z, r)$ вдоль оси z с параметром r.

1. Перемещая датчик Холла вдоль оси z, с шагом 20 мм, измерить радиальную составляющую поля B_r для расстояния r = 100 мм. Координата z изменяется в интервале -70 мм до +70 мм, с рекомендуемым шагом 10 мм. Значения измеренных величин записать в *таблицу 2.3*.
2. Повторить измерения для r = 140 мм и 160 мм.

таблица 2.3.

№ п/п	, мм	$B_r(z, r)$, мТл		
		r = 100 мм	r = 140 мм	r = 160 мм
1	70			
2	60			
…		…	…	…

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

По результатам измерений построить график зависимости $B_z(z)$, по формуле (2.6) рассчитать и нанести на тот же график теоретические значения, построить график зависимости $B_z(z, r)$.

Измеренные и рассчитанные значения первого и второго задания наносятся на один и тот же график.

Построить график зависимости $B_r(z, r)$.

ПРЕДОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

При написании заключения необходимо: сделать вывод о характере полученной зависимости магнитного поля на оси системы катушек и вне оси системы катушек

Сделать вывод о характере полученной зависимости радиальной компоненты магнитного поля на оси системы катушек и вне оси системы катушек.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение магнитной индукции.

2. В каких единицах измеряется магнитная индукция?

3. Дайте определение дипольного магнитного момента.

4. Получите формулу для магнитной индукции на оси соленоида.

5. Получите формулу для магнитной индукции на оси катушек Гельмгольца.

6. Каков характерный размер области однородного магнитного поля, создаваемого катушками Гельмгольца?

7. Объясните принцип работы датчика Холла.

8. Как включаются катушки в электрическую цепь?

9. Какими токами обусловлена радиальная составляющая магнитного поля катушек?

10. Какие погрешности преобладают в работе?

ЛИТЕРАТУРА

ОСНОВНАЯ

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2.- М.: Астрель - АСТ, 2001, 2004,2009.
2. Калашников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики. Т.1.- М.: Дрофа, 2007.
3. Елютин С.О., Самоварщиков Ю.В., Матятина А.Н., Исаев А.А., Бакун А.Д., Куракин Д.А.Основы физического эксперимента и подготовка к ОГЭ по физике. Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. – 82 с.
4. Воронова Н.С., Бежанов С.Г., Воронов С.А., Хангулян Е.В., Цупко О.Ю., Романов А.И. Анализ и представление результатов эксперимента, учебное пособие, НИЯУ МИФИ, Москва, 2015
5. Сквайрс Дж., Практическая физика, Москва, Мир, 1971

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ

1 Фейнмановские лекции по физике. Электричество и магнетизм. Т.5.- М.:Мир,1977.
2 Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. Т.3 – М.: Физматлит,2006
3. Калашников С.Г. Электричество. - М.: Физматлит, 2004.
4. Лабораторный практикум «ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ» - М.: МИФИ, 2008.
5. Парсел Э. Электричество и магнетизм. - М.: Наука, 1971,1975.
6. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. - М.: Высшая школа, 1991.