

**И.В.Милютин, С.Н.Костенков**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ И МАГНЕТИЗМУ**

**Учебно-методическое пособие  
для студентов физических направлений и направления  
«Химия, физика и механика материалов»**

Декан одного из факультетов УдГУ иногда говорит своим студентам-первокурсникам, начинающим изучать физику:  
«По окончании изучения физики вы должны точно знать, что электрон такой маленький, что у него даже ножек нет».  
Студент-физик, закончив изучать электричество и магнетизм, должен знать больше – у электрона и ручек нет (ну..., скорее всего).

**Ижевск  
2012**

Министерство образования и науки РФ  
ФГБОУ ВПО «Удмуртский государственный университет».

**И.В.Милютин, С.Н.Костенков**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ И МАГНЕТИЗМУ**

**Учебно-методическое пособие  
для студентов физических направлений и направления  
«Химия, физика и механика материалов»**

**Ижевск  
2012**

УДК 537  
ББК 22.33

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УдГУ

Рецензент:

зав. кафедрой физики твердого тела УдГУ, канд. физ.-мат. наук П.Н.Крылов

**Лабораторный практикум по электричеству и магнетизму.**

Учебно-методическое пособие для студентов физических направлений и направления «Химия, физика и механика материалов»/ составители:

И.В.Милютин, С.Н.Костенков; УдГУ, Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2012. 48 с.

Пособие подготовлено на кафедре общей физики УдГУ для организации работы в учебной лаборатории «Электричество и магнетизм» студентов физических направлений бакалавриата, но, при корректировке объема предлагаемого к изучению материала, может быть использовано студентами других направлений.

УДК 537  
ББК 22.33

© И.В.Милютин, С.Н. Костенков, 2012

© Удмуртский госуниверситет, 2012

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие предназначено студентам-бакалаврам физических направлений и направления «Химия, физика и механика материалов». С учетом этого составлены описания, поставлены задачи, сформулированы контрольные вопросы и требования по оформлению результатов и представлению отчета.

Использование пособия студентами нефизических направлений и специальностей потребует корректировки по указанным позициям и объему заданий со стороны преподавателя.

Изложение материала в пособии ведется с использованием Международной системы единиц (СИ), что не дает оснований студенту-физику «расслабиться» - при сдаче допуска и отчета преподаватель может спросить (и спросит) математическую запись основных законов (формул) в Гауссовой системе.

В «Приложении» описывается построение прямой методом парных точек.

### Памятка студенту

1. Перейдя в новую лабораторию физического практикума, студент в первую очередь обязательно проходит инструктаж по технике безопасности в этой лаборатории, и расписывается в журнале по ТБ.
2. Лабораторная работа выполняется на листах формата А4, графики – на миллиметровой бумаге.
3. Студент не допускается к выполнению работы, если не сдан допуск к ней. В случае если накоплено два допуска без сдачи отчетов, к сдаче следующего студент не допускается.
4. Допуск к работе считается сданным, если каждым студентом заготовлен отчет по лабораторной работе, студент может удовлетворительно ответить на вопросы преподавателя в рамках того объема теоретического материала, который необходим для понимания сути поставленных задач практикума и их выполнения (с целью обозначить данный объем, в тексте лабораторных работ приведены контрольные вопросы), студент знает суть проводимых исследований, порядок их выполнения и особенности требований ТБ по данной работе физического практикума, знает в каком виде должны быть представлены и проанализированы результаты.
5. Заготовка отчета включает титульный лист, формулировку целей работы, перечисление используемых приборов и материалов, краткую теорию, схемы или рисунки установок, основные характеристики установок, описание хода выполнения заданий, вида и особенностей представления результатов. Желательно заранее заготовить таблицы, чтобы сразу вносить туда получаемые результаты.
6. Включать установку и проводить измерения можно только с разрешения преподавателя или лаборанта. До начала работы следует записать характеристики приборов и продумать последовательность измерений. Не рекомендуется без необходимости крутить ручки приборов, так как обычно приборы настроены для работы.

7. Результаты измерений записываются на отдельных листах, прилагаемых к заключительному отчету по работе, и визируются лаборантом или преподавателем.
8. Отчет по работе дополняется представлением результатов в виде таблиц и графиков, расчетами величин и погрешностей и заключением. Работа считается сданной, если преподаватель принял отчет и студент удовлетворительно ответил на блок вопросов практикума, предложенных студенту для ознакомления перед сдачей работы.

**При составлении и заполнении таблиц следует учитывать следующее:**

1. Если вид таблицы не задан в описании к лабораторной работе, то необходимо до получения допуска самостоятельно спланировать и начертить таблицу на основании информации, данной в описании к лабораторной работе. Для этого нужно определить, какие данные будут заноситься в таблицу и как они должны в ней располагаться, чтобы хватило места и не было пустых строк и столбцов. Таблица должна содержать столбец «примечания».
2. При вычерчивании таблиц необходимо пользоваться простым карандашом, а данные записывать авторучкой. Недопустимо записывать сначала карандашом, а в конце обводить авторучкой.
3. Результат заносится в таблицу сразу после проведения измерения. Допустимо провести пробную серию измерений для проверки работы оборудования или определения диапазона измерений.
4. Таблицы нумеруются, таблица должна иметь название, отражающее суть проведенных измерений. Общий множитель для однотипных результатов указывается один раз, в заголовке соответствующего столбца, там же указываются единицы измерения, как правило, соответствующие системе СИ и записанные кириллицей.

Например:

Таблица 1. Определение удельного сопротивления меди.

№ Измерения	I, mA	U, mV	$\rho$ , $10^{-7}$ Ом·м	Примечания

**При построении графиков** необходимо следовать следующим правилам:

1. График выполняется на миллиметровой бумаге, на которую наносятся координатные оси. Для величины, зависимость от которой рассматривается, всегда используется ось абсцисс.
2. График должен содержать надпись, из которой было бы ясно физическое содержание представленной закономерности.
3. На оси наносится масштаб (а не измеренные величины), неудачный выбор которого - одна из наиболее распространенных ошибок, зачастую обесценивающая график. При выборе масштаба необходимо помнить,

что точность построения графика должна быть не ниже точности измерений. Масштаб наносится равноотстоящими друг от друга делениями так, чтобы расстояние между ними составляло 1, 2, 5 единиц ( допустимы 2,5 и 4 ). Число делений с цифрами на каждой оси составляет обычно от 4 до 10.

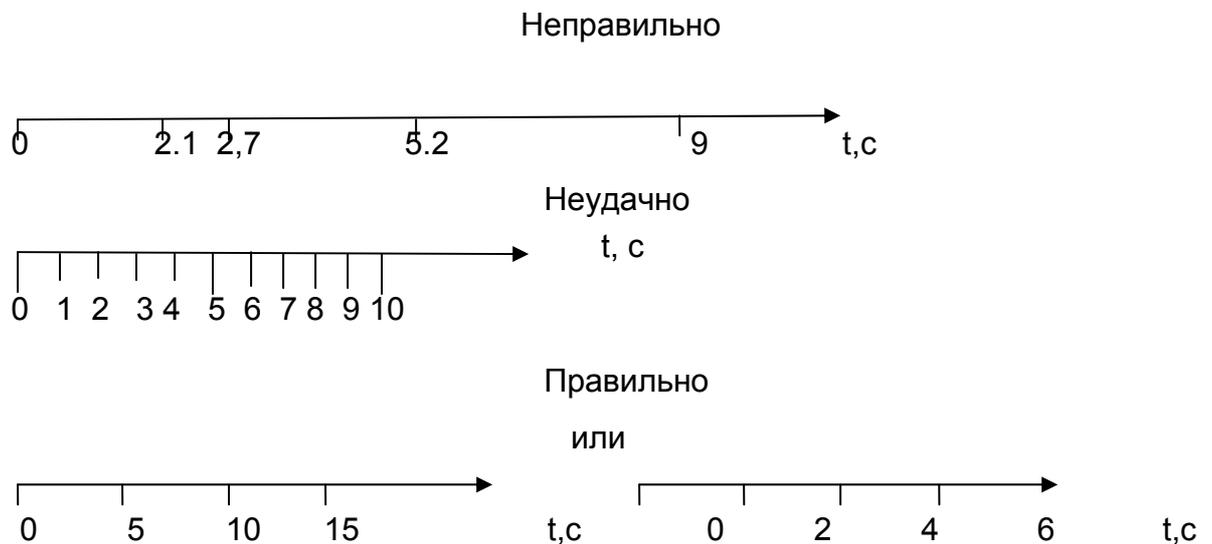
Если необходимо отложить по осям числа, например: 20000, 30000, 40000 и т.д., то проставляются 2, 3, 4 и т.д., а в конце оси около стрелки переменная умножается на  $10^4$ .

Каждая из осей должна отстоять от края листа примерно на 1,5-2 см.

В конце оси около стрелки проставляется переменная и, через запятую, знак единицы измерения, например:  $m \times 10^{-3}$ , кг.

На рис.1 приведены примеры правильного и неправильного нанесения масштаба.

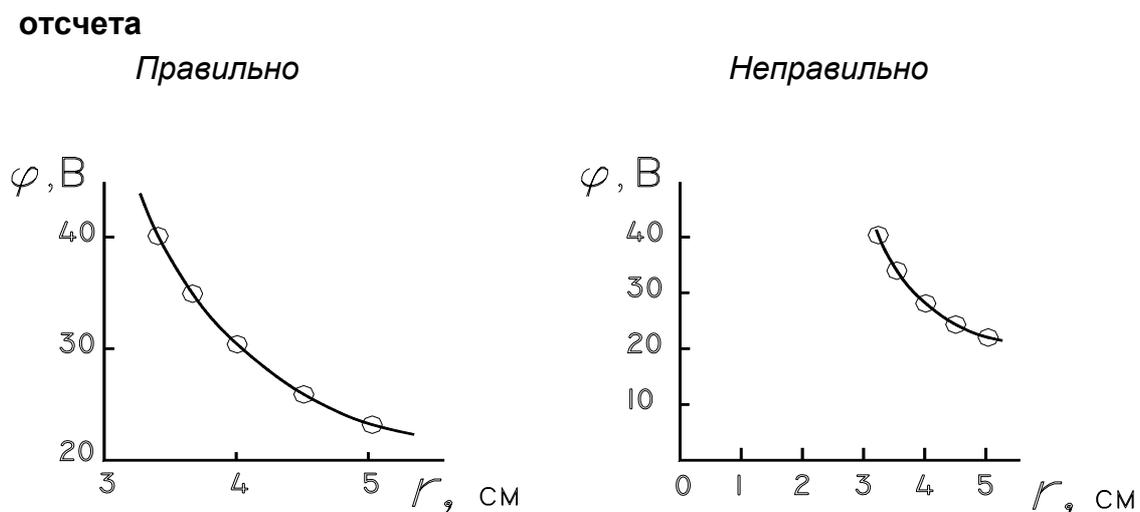
**Рис. 1. Примеры неправильного, неудачного и правильного нанесения масштаба**



- Масштаб нужно выбирать так, чтобы кривая заняла большую часть листа как по одной, так и по другой переменной (см. рис.2), а погрешность измерения соответствовала одному-двум мелким делениям графика. В этом случае экспериментальные точки обозначают окружностями, квадратами, треугольниками (для разных серий измерений, представленных на графике, используют различные обозначения, с соответствующими пояснениями на графике) с центрами в точках, соответствующих экспериментальным данным, а точками обозначают результаты «теоретического» расчета.

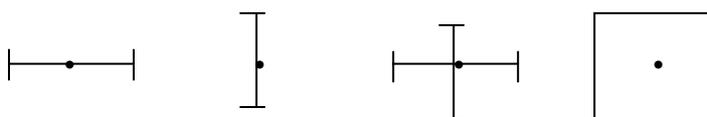
Начало отсчета на графике не обязательно начинать с нуля, иногда удобнее выбирать округленное число, отличное от нуля.

**Рис.2. Примеры правильного и неправильного выбора масштаба и начала отсчета**



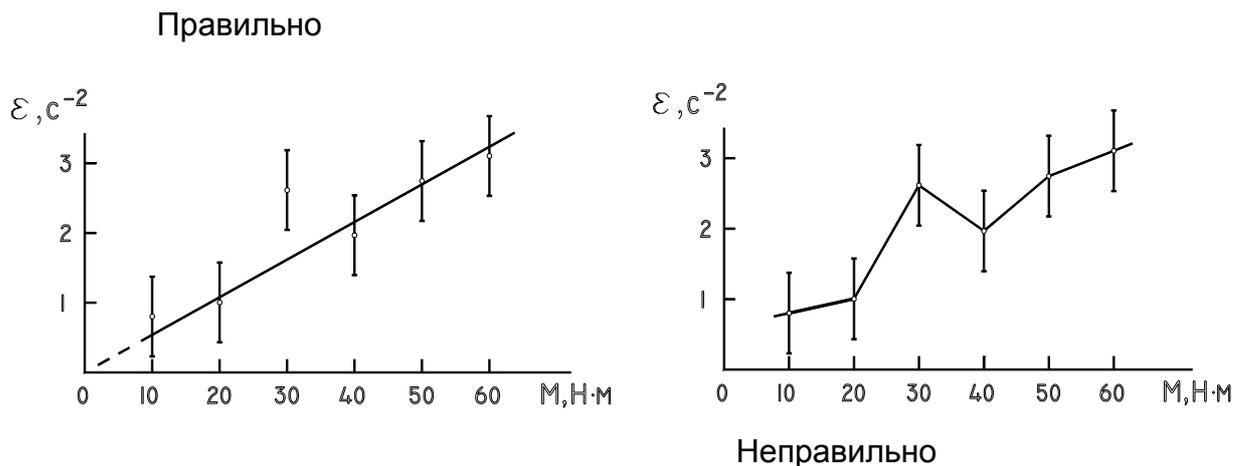
5. На концах осей указываются откладываемые величины и, через запятую, используемые единицы их измерения. Обычно туда же выносятся и порядок масштаба ( $10^{\pm n}$ , где  $n$  – целое число).
6. Если не удастся выбрать масштаб графика в соответствии с погрешностями (см. пункт 4), экспериментальные значения величин (точки) отчетливо наносятся вместе с погрешностями - отрезками длиной в доверительный интервал (или систематическую погрешность), расположенными параллельно соответствующей оси (см. рис. 3).

**Рис. 3 Варианты нанесения на график экспериментальных точек вместе с доверительными интервалами (или систематическими погрешностями)**



7. Экспериментальная кривая проводится плавно через доверительные интервалы всех или большинства экспериментальных точек так, чтобы экспериментальные точки наиболее близко и равномерно располагались с разных сторон кривой (см. рис.4, на котором речь идет о линейной зависимости). При этом сумма отрезков отклонений точек от кривой в одну сторону должна быть равна сумме отклонений точек от этой же кривой в другую сторону; по возможности не должно быть очень больших отклонений точек от кривой, лучше иметь два-три небольших отклонения, чем одно большое.

**Рис. 4. Правильное и неправильное представление данных на графике**



Исключение составляет градуировочный график, на котором точки соединяются последовательно прямыми линиями, так как при этом мы считаем значения величин точными, а кривая служит для отыскания промежуточных значений линейной интерполяцией.

8. Если на графике изображается теоретическая кривая, то указывается формула, по которой она рассчитывается.

9. При изображении нескольких кривых на одном поле графика каждая из них нумеруется или выделяется каким-то другим способом. В свободной части поля даются соответствующие пояснения.

10. Если неизвестная величина определяется по графику, то необходимо

все построения для нахождения этой величины нанести на график.

### **Точность записи результатов измерений и правила округлений**

Точность записи (число значащих цифр) отдельных измерений и последующих вычислений при их обработке должна быть согласована с необходимой точностью результата измерения. Здесь в начальной учебной лаборатории рекомендуется придерживаться следующих правил.

1. При числе измерений менее 100 окончательную погрешность результата измерения следует округлять до одной значащей цифры. Например, если расчет погрешности дает 0,347 м/с, то это значение нужно округлить до 0,3 м/с. Есть только одно исключение из этого правила – если первая значащая цифра в погрешности 1, то сохраняют две значащие цифры в погрешности. Пусть, например, некоторый расчет дал погрешность 0,14, округлив это значение до 0,1, мы уменьшим ошибку сразу на 40%, так что правильнее в этом случае – привести в качестве погрешности величину 0,14.

2. Число цифр в результатах промежуточных расчетов обычно должно быть на одну больше, чем в окончательном результате. Погрешности при промежуточных вычислениях должны быть выражены не более чем тремя значащими цифрами.

3. Когда погрешность в измерении рассчитана, необходимо проанализировать, какие цифры в измеренной величине являются значимыми. Утверждение

типа  $L=127, 547 \pm 2$  см нелепо. Погрешность 2 означает, что вместо цифры 7 на третьем месте от начала в действительности может быть любая цифра в интервале от 5 до 9, последующие же цифры 5, 4 и 7 приводить вовсе бессмысленно, и они должны быть округлены. Корректная запись результата будет выглядеть так

$$L=128 \pm 2 \text{ см.}$$

Т.е. округлять результат измерения следует так, чтобы он оканчивался цифрой того же разряда, что и значение погрешности.

4. Если первая (слева направо) из заменяемых нулями или отбрасываемых цифр меньше 5, то оставшиеся цифры не изменяют. Лишние цифры в целых числах заменяют нулями, а в десятичных дробях отбрасывают. Например, при сохранении четырех значащих цифр число 782 447 должно быть округлено до 782 400; число 283,437 – до 283,4.

5. Если первая из заменяемых нулями или отбрасываемых цифр равна 5, а за ней не следует никаких цифр или идут нули, то округление производят до ближайшего четного числа, т.е. четную последнюю цифру или нуль оставляют без изменения, нечетную увеличивают на единицу. Например, при сохранении трех значащих цифр число 264,50 округляют до 264; число 645,5 округляют до 646.

6. Если первая из заменяемых нулями или отбрасываемых цифр больше или равна 5, но за ней следует отличная от нуля цифра, то последнюю оставляемую цифру увеличивают на единицу. Например, при сохранении трех значащих цифр число 17,58 округляют до 17,6; число 18598 – до 18600; число 352,512 – до 353.

В настоящее время выработаны некоторые общие правила записи физических констант, результатов измерений и расчетов, ставшие фактическим стандартом (по крайней мере, в физике). Все указанные исходные данные, предполагаемые для дальнейшего использования, записывают только значащими цифрами (в виде десятичных дробей). Запятую ставят сразу после первой отличной от нуля цифры, а число (в составе значащих цифр) умножают на десять в соответствующей степени. Нули, стоящие в начале или конце числа, как правило, не записывают. Например, числа 0,00435 и 234000 записывают в виде  $4,35 \cdot 10^{-3}$  и  $2,34 \cdot 10^5$ . Подобная запись, иногда называемая **стандартной**, упрощает возможные дальнейшие вычисления, особенно в случае формул, удобных для логарифмирования (т.е. умножение, деление, возведение в степень и т.п.),

Именно в такой стандартной форме в физических справочниках приводят основные физические константы. Например, скорость света в вакууме

$c = 2,9979 \cdot 10^8$  м/с, заряд электрона  $e = 1,60219 \cdot 10^{-19}$  Кл и т.д. Подобным же образом с использованием стандартной формы числа можно записать и полный результат измерения, т.е. с учетом ошибки, например,  $(2,3407 \pm 0,0002) \cdot 10^{-3}$  А, естественно, дополнительно указав доверительную вероятность, если здесь ошибка – случайная.

## Рекомендации по написанию Заключения к лабораторной работе

**Заключение** к лабораторной работе является учебной моделью написания выводов для всякого научного исследования. Текст «Заключения» должен дать читателю возможность в короткое время, не обращаясь к самой работе, получить ясное представление о полученных в работе результатах и способах их

получения. Написание «Заключения» требует от студента четкого понимания, что он делал и что получил, умения пользоваться научной терминологией, обобщать и делать выводы.

Заключение к лабораторной работе должно формально содержать следующие основные блоки:

1. Краткое описание того, что, каким методом и на каком оборудовании выполнялось. При этом не должно быть пересечений с описанием, данным во введении к лабораторной работе. То есть, не следует переписывать в заключении введение.

Например: «В данной работе определялась величина элементарного заряда методом Милликена в ходе трех серий измерений, проводившихся при подаче на обкладки конденсатора напряжений в 300, 400, и 500В.

2. Описание выбранного диапазона, в котором производились измерения, интервалов между измерениями и количества измерений, а также, по возможности, обоснование такого выбора.

3. Описание, каким методом обрабатывались данные (если это имело место) и как использовались результаты, например, строились графики, рассчитывались константы и т.д.

Например: «Прямые построены по методу парных точек»

4. Описание полученных графиков. При этом необходимо различать экспериментальные данные и построенные по ним кривые и теоретические зависимости. Важно понимать следующее:

а. они не обязаны совпадать;

б. никакая экспериментальная зависимость не является абсолютно достоверной, так как всегда могут при дополнительных измерениях найтись точки, изменяющие картину; степень достоверности зависит от количества данных (и распределения их в диапазоне измерений) и их погрешностей;

в. с помощью эксперимента нельзя доказать или проверить теорию, ибо экспериментальные данные могут лишь свидетельствовать в пользу той или иной теоретической модели, поэтому принято говорить о степени согласия с теорией.

Например, неверно: «полученные данные доказывают справедливость закона сохранения механической энергии».

Нужно: «полученные данные находятся в хорошем согласии с законом сохранения механической энергии».

5. Описание результатов, полученных из анализа графиков или другими методами, а также их погрешностей, с указанием, как эти погрешности рассчитывались. При этом необходимо указать характер погрешности: случайный, приборный систематический.

6. Обсуждение источников погрешностей. Необходимо попытаться найти реальную причину неточностей в методике эксперимента или в характеристиках

экспериментального оборудования. Недопустимо формально ссылаться на неточность приборов, объясняя этим неудачные результаты.

7. Обсуждение согласия теории (если такая имеется) и эксперимента. Необходимо обязательно указать, совпали ли результаты в пределах погрешности или нет. Здесь необходимо также высказать своё мнение и допустимы неточные оценки: «удовлетворительно согласуется, находится в хорошем согласии, не согласуется» и т.д.

Заключение чаще всего пишется в безличной форме, например: «В данной работе исследовалась зависимость ...». Не рекомендуется писать от первого или третьего лица. Необходимо строго соблюдать единый стиль изложения, недопустимо использовать чрезмерно усложнённые грамматические конструкции, пытаться все заключение написать одним предложением, нарушать последовательность изложения и делать смысловые разрывы в тексте.

В заключение не принято вставлять таблицы с результатами измерений, допустимы лишь небольшие таблицы с окончательными результатами. Недопустимо вклеивать в заключение графики и иллюстрации. На них можно и нужно ссылаться.

Каждый результат необходимо сравнивать с табличными или теоретическими значениями. Не рекомендуется представлять экспериментальные и табличные значения в разных системах единиц. Необходимо также обсуждать в заключении расхождение в экспериментальных и табличных значениях. Для простоты сравнения результаты должны быть представлены в одинаковом виде.

## Лабораторная работа №1

### Исследование электростатических полей и токов в сплошной среде с помощью ванны со слабо проводящей средой.

#### Цель работы:

Исследовать конфигурацию электростатического поля при различной форме электродов, опираясь на аналогию между распределением потенциалов, создаваемых неподвижными заряженными телами, и их распределением между электродами, создающими токи в сплошной среде. Научиться изображать поля графически, с помощью силовых линий и эквипотенциальных поверхностей (линий).

Изучить закономерности протекания тока в сплошной среде, научиться оценивать удельное сопротивление среды, емкость системы электродов.

#### Оборудование:

Ванна с влажным песком, набор электродов, мультиметр, блок питания (источник постоянного тока), измерительная линейка, совок.

#### Указание:

До того, как приступить к рассмотрению содержания лабораторной работы, изучите следующие теоретические вопросы:

1. Силовая и энергетическая характеристики электрического поля - вектор напряженности и потенциал.
2. Вектор электрической индукции.
3. Теорема Гаусса и теорема о циркуляции для электростатического поля.
4. Силовые линии (линии напряженности).
5. Эквипотенциальные поверхности (линии).
6. Граничные условия на границе раздела двух диэлектриков.
7. Законы постоянного тока.
8. Граничные условия на границе раздела двух проводников с током.

### Часть 1. Исследование конфигурации электростатического поля при различной форме электродов.

#### Краткая теория.

Электростатическое поле в диэлектрике подобно полю постоянного тока в проводящей среде при одинаковой конфигурации электродов. Если потенциалы электродов в обоих случаях одни и те же, то одинаковы и распределения потенциала в диэлектрике и в проводящей среде с током. Подобие полей иллюстрируют следующие сопоставления их свойств:

1. Электростатическое поле в диэлектрике потенциально, циркуляция вектора напряженности электростатического поля

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0.$$

Поле в проводящей однородной (без источников сторонних сил) среде тоже потенциально. Постоянный ток не образует вихрей между электродами, следовательно

$$\oint \vec{j} \cdot d\vec{l} = 0 \quad \text{или} \quad \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad \text{и при постоянном токе, т.к.}$$

согласно закону Ома в дифференциальной форме  $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ , где  $\vec{j}$  - плотность тока,  $\sigma$  – удельная электропроводность среды.

2. Существует подобие между граничными условиями. На границе раздела двух диэлектриков наблюдается непрерывность между тангенциальными составляющими вектора напряженности и нормальными составляющими вектора электрической индукции

$$E_{\tau 1} = E_{\tau 2}; \quad \varepsilon_1 \varepsilon_0 E_{n1} = \varepsilon_2 \varepsilon_0 E_{n2}.$$

В проводящей среде непрерывность тангенциальных составляющих следует из потенциальности поля тока (теоремы о циркуляции), граничные условия для нормальных составляющих плотности тока

$$\sigma_1 E_{n1} = \sigma_2 E_{n2}$$

следует из уравнения непрерывности  $j_{n1} = j_{n2}$ .

Из подобия граничных условий следует, что проводящая среда с током может служить моделью для исследования электростатического поля. Для этого следует в математических выражениях удельную электропроводность среды  $\sigma$  заменить диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  моделируемого диэлектрика, а электроды в обоих случаях расположить одинаково. Поле в неоднородном диэлектрике, различные области которого имеют неодинаковую проницаемость  $\varepsilon$ , можно также моделировать на проводящей среде, если в ней распределение  $\sigma$  подобно распределению  $\varepsilon$  в диэлектрике.

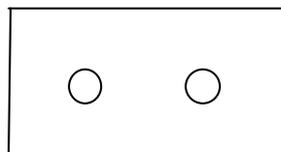
Измерить распределение потенциала в проводящей среде проще, чем в диэлектрике, поэтому исследование на модели зачастую предпочтительнее, чем на электростатическом оригинале.

### Задания к части 1.

#### 1а. Моделирование поля разноименно заряженных тел.

Разместите два кольцевых электрода в ванне с песком так, как показано на рисунке 1. В этом случае и в последующих электроды следует заглублять до упора в дно.

Рисунок 1.



Один электрод подсоедините к положительному полюсу блока питания, а другой к отрицательному. С помощью мультиметра измерьте разность потенциалов между электродами и определите шаг, с которым будет пройдена эта разность при построении сети эквипотенциальных линий. Возьмите, например, в качестве шага 1/8 от общей разности потенциалов. Поместите один из зондов мультиметра в песок в точку, разность потенциалов между которой и положительным электродом

равна выбранной величине «шага». Постройте проходящую через данную точку эквипотенциальную линию. Точку, имеющую такой же потенциал, что и первый зонд, удобно определять, двигая второй зонд до смены знака разности потенциалов на экране мультиметра (смена знака и означает прохождение через ноль).

Для быстрого и успешного нахождения эквипотенциальных точек, руководствуйтесь общими представлениями о конфигурации исследуемого поля.

Следующую линию равного потенциала строите проходящей через точку, для которой значение разности потенциалов с положительным электродом составляет удвоенный «шаг», затем – утроенный, и так далее, до построения всей картины линий. Зарисуйте полученную картину, постройте соответствующие ей силовые линии.

#### **1б. Моделирование поля заряда у проводящей плоскости.**

Выберите соответствующие электроды (плоский и кольцевой малого диаметра). Подключите их к разным полюсам блока питания. Получите картину линий равного потенциала, по ней постройте силовые линии.

#### **1в. Моделирование поля плоского конденсатора.**

Выберите соответствующие электроды. Подключите их к разным полюсам блока питания. Получите картину линий равного потенциала, по ней постройте силовые линии.

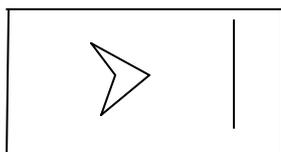
#### **1г. Исследование зависимости поля у поверхности электрода от кривизны этой поверхности (поле у острия).**

Выберите электроды, показанные на рисунке 2. Подключите их к разным полюсам блока питания. Получите картину линий равного потенциала, по ней постройте силовые линии.

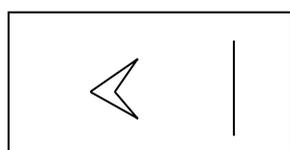
Для того, чтобы уменьшить искажения поля, вызываемые бортами ванны, сначала построение линий равного потенциала проводится в пространстве между электродами при положении электродов, указанном на рисунке 2а), затем в пространстве между электродами при их положении, указанном на рисунке 2б). При подготовке отчета к работе обе картины следует совместить.

Рисунок 2.

а).



б).



### 1д. Моделирование поля цилиндрического конденсатора.

Выберите кольцевые электроды разного диаметра и расположите их так, чтобы их оси совпадали. Подключите их к разным полюсам блока питания. Получите картину линий равного потенциала, по ней постройте силовые линии.

Убедитесь, что вне пространства между электродами поле отсутствует.

### Часть 2. Определение удельного сопротивления проводящей среды и емкости различных конденсаторов.

#### Краткая теория.

Рассмотрим два проводника произвольной формы, находящиеся в безграничной однородной слабо проводящей среде с удельным сопротивлением  $\rho$  и диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Найдем значение  $RC$  для данной системы, где  $R$  - сопротивление среды между проводниками,  $C$  – взаимная емкость проводников при наличии среды. Пусть проводникам сообщили заряды  $+q$  и  $-q$ . Т.к. среда между ними слабопроводящая, то каждый проводник представляет собой эквипотенциальную область, и конфигурация поля такая же, как и при отсутствии среды. Окружим, например, положительно заряженный проводник замкнутой поверхностью  $S$ , непосредственно прилегающей к его поверхности, и вычислим отдельно  $R$  и  $C$ :

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U}{\oint j_n dS} = \frac{U}{\sigma \oint E_n dS} ,$$

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\oint D_n dS}{U} = \frac{\epsilon \epsilon_0 \oint E_n dS}{U} , \text{ где интегралы берутся по поверхности } S. \text{ Т.о.,}$$

$$RC = \frac{\epsilon \epsilon_0}{\sigma} = \epsilon \epsilon_0 \rho \quad (*) .$$

Результат справедлив для простого конденсатора с любой формой обкладок.

В данной работе сопротивление среды между электродами можно измерить непосредственно с помощью мультиметра. Затем, используя формулу Ома для сопротивления цилиндрических и призматических проводников

$$R = \rho L/S \quad (**) ,$$

где  $L$  – длина проводника,  $S$  – площадь сечения проводника, нормальная к протекающему току, определяется удельное сопротивление среды.

Если электроды расположены в среде с известной диэлектрической проницаемостью (например, в воде, проницаемость которой равна 81), то по формуле (\*) можно рассчитать емкость системы.

Данным методом удобно пользоваться в тех случаях, когда емкость мала для непосредственного измерения, а сложная форма электродов не допускает ее прямой расчет.

## **Задания к части 2.**

### **Задание 2а. Плоский конденсатор: определение удельного сопротивления среды между обкладками и емкости.**

Измерьте размеры больших плоских металлических пластин.

Поместите пластины плоского конденсатора параллельно друг другу в ванну с песком. С помощью совка полностью заполните пространство между обкладками влажным песком, постарайтесь добиться того, чтобы вещество между обкладками было однородным. Измерьте линейкой расстояние между пластинами.

С помощью мультиметра определите сопротивление среды между электродами.

Определите удельное сопротивление влажного песка, используя формулу для расчета сопротивления плоского конденсатора - ф. (\*\*).

Используя ф. (\*), найдите значение  $C/\epsilon$  для плоского конденсатора.

Подключите пластины к разным полюсам источника постоянного тока. С помощью мультиметра определите напряжение между пластинами.

Затем рассчитайте напряженность поля между пластинами.

Определите  $C/\epsilon$  плоского конденсатора, опираясь на полученные результаты и на формулу

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\oint D_n dS}{U} = \frac{\epsilon \epsilon_0 \oint E_n dS}{U}.$$

Сопоставьте полученные двумя способами значения  $C/\epsilon$  между собой и сравните со значением теоретически рассчитанной емкости для данного конденсатора.

### **Задание 2б. Цилиндрический конденсатор: определение удельного сопротивления среды между обкладками и емкости.**

Выберите кольцевые электроды разного диаметра, измерьте их диаметры и высоту.

Расположите электроды так, чтобы их оси совпадали. С помощью совка полностью заполните пространство между электродами влажным песком, постарайтесь добиться того, чтобы вещество между обкладками было однородным.

С помощью мультиметра определите сопротивление среды между электродами.

Определите удельное сопротивление влажного песка. Необходимую для расчета формулу, аналогичную ф. (\*\*), получите для цилиндрического конденсатора сами.

Используя ф. (\*), найдите значение  $C/\epsilon$  для цилиндрического конденсатора.

Подключите электроды к разным полюсам блока питания. Измерьте напряжение между электродами и напряженность между электродами на расстоянии  $R$  от оси системы.

Для оценки величины напряженности поля следует разместить электроды мультиметра вплотную друг к другу на нормали к линии равного потенциала, расположенной на расстоянии  $R$  от оси системы (один из электродов располагается на самой линии), и измерить напряжение между электродами. Напряженность поля примерно равна измеренному напряжению, деленному на расстояние между электродами (принять его равным 1 см).

Определите  $C/\epsilon$  цилиндрического конденсатора, опираясь на полученные результаты и на формулу

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\oint D_n dS}{U} = \frac{\epsilon \epsilon_0 \oint E_n dS}{U}.$$

Сопоставьте полученные двумя способами значения  $C/\epsilon$  между собой и сравните со значением теоретически рассчитанной электроемкости для данного конденсатора.

**В выводе сравните так же результаты, полученные для удельного сопротивления влажного песка в случаях плоского и цилиндрического конденсаторов.**

**Вопросы, которые следует разобрать при подготовке к сдаче отчета по работе.**

1. Поле у острия. Электрический ветер, механизмы его возникновения.
2. Сопротивление заземления.
3. Шаговое напряжение ( с рассмотрением конкретного примера).

## Лабораторная работа №2

### Определение элементарного заряда в опыте Миллиkena

#### Цель работы:

Исследование движения заряженных капель в электрическом и гравитационном полях (опыт Миллиkena). Определение элементарного заряда.

#### Оборудование:

Устройство Миллиkena

Мультиметр

Источник напряжения 0-600 В

Микрометр 1 мм – 100 делений

Секундомер, 2 шт.

Стекла 18 на 18 мм,

Переключатель

Треножник

Трубка

Соединительный провод, черный,  $l=25$  см.

Соединительный провод, красный,  $l=75$  см, 2 шт.

Соединительный провод, синий,  $l=25$  см, 2 шт.

Соединительный провод, черный,  $l=75$  см, 3 шт.

#### Темы для изучения.

Электрическое поле, вязкость, закон Стокса, подвижность, капельный метод, второй закон Ньютона, дискретность заряда, заряд электрона.

#### Краткая теория.

На заряженную каплю масла, помещенную в однородное электрическое поле, действуют следующие силы:

- сила трения со стороны воздуха; по закону Стокса она равна:

$$F_1 = 6\pi \cdot r \cdot \eta \cdot v, \quad (1)$$

где  $r$  - радиус частицы,

$\eta$  - вязкость воздуха  $\eta = 1,82 \cdot 10^{-5}$  кг/м с,

$v$  - скорость капли;

- сила тяжести:

$$F_2 = m \cdot g = \rho_1 \cdot V \cdot g, \quad (2)$$

где  $m$  - масса капли,

$g$  - ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ,

$V$  - объем капли,  $V = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3$

$\rho_1$  - плотность масла,  $\rho_1 = 1,03 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;

- выталкивающая сила (сила Архимеда) со стороны воздуха:

$$F_3 = \rho_2 \cdot V \cdot g, \quad (3)$$

где  $\rho_2$  - плотность воздуха,  $\rho_2 = 1,293 \text{ кг/м}^3$ ;

- сила со стороны электрического поля (поле заряженного конденсатора):

$$F_4 = Q \cdot E = Q \cdot \frac{U}{d}, \quad (4)$$

где  $Q$  - заряд капли,

$E$  - напряженность электрического поля,

$U$  - напряжение на пластинах конденсатора,

$d$  - расстояние между пластинами (это постоянная прибора, равная 2,5 мм).

При установившемся движении капли вниз со скоростью  $v_1$ :

$F_1 + F_3 = F_2 + F_4$ , следовательно:

$$v_1 = \frac{1}{6\pi \cdot r \cdot \eta} \cdot \left( Q \cdot E + \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_2) \right). \quad (5)$$

При установившемся движении капли вверх со скоростью  $v_2$ :

$F_1 + F_2 = F_3 + F_4$ , следовательно:

$$v_2 = \frac{1}{6\pi \cdot r \cdot \eta} \cdot \left( Q \cdot E - \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_2) \right). \quad (6)$$

Из формул (5) и (6) можно получить формулы для определения заряда и радиуса капель через скорости движения капли вверх и вниз:

$$Q = C_1 \cdot \frac{(v_1 + v_2) \cdot \sqrt{v_1 - v_2}}{U}, \quad (7)$$

где  $C_1 = 2,73 \cdot 10^{-11} \text{ кг м}^{0,5} \text{ с}^{-0,5}$  и

$$r = C_2 \cdot \sqrt{v_1 - v_2}, \quad (8)$$

где  $C_2 = 6,37 \cdot 10^{-5} \text{ (м с)}^{0,5}$ .

### Выполнение работы.

Опыт рекомендуется выполнять двум студентам. Соберите установку, как показано на рисунке 1.

Соедините фиксированный (300 В) и варьированный (от 0 до 300 В) выходы источника напряжения, чтобы можно было получать напряжение выше 300 В. Через переключатель направления поля источник соединяется с установкой Милликена. Параллельно присоединяется вольтметр. Оптическая система установки Милликена подсоединяется на выход 6,3 В источника напряжения. При выполнении работы следует учитывать, что микроскоп формирует перевернутое изображение.

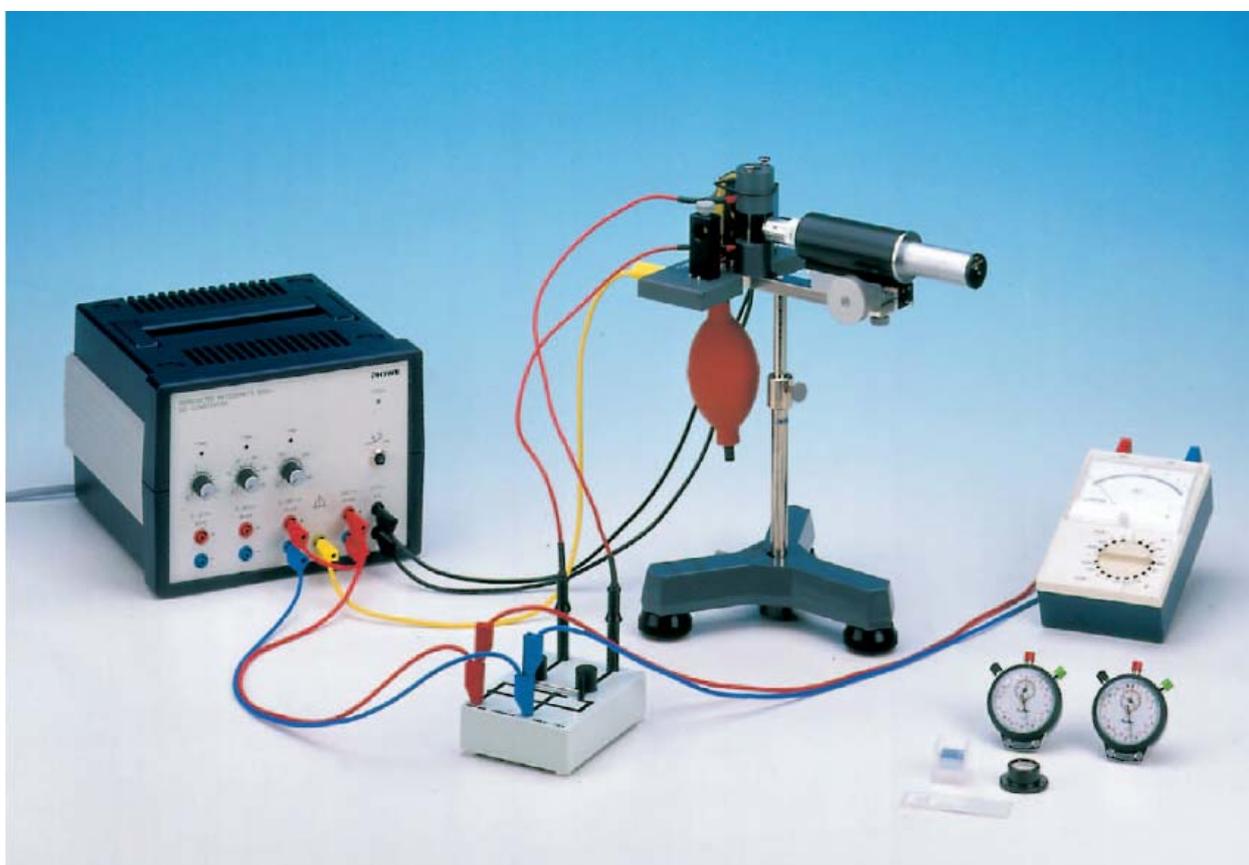


Рис. 1. Экспериментальная установка для определения элементарного заряда с помощью устройства Милликена

Задание. Определение радиусов и зарядов заряженных капель.

1. Включите оптическую систему установки Милликена и проведите калибровку микрометра, используя специальное градуировочное стекло.
2. Установите напряжение 300 В на установке Милликена. Впрысните капли масла в пространство наблюдения в установке. Настроив слегка оптическую систему, наблюдайте движение капель масла. Для изменения направления движения капель меняйте с помощью переключателя направление электрического поля. Из видимых капель выделите ту, которая движется строго вертикально и с небольшой скоростью. Так как размеры получающихся капель малы, можно считать с большой степенью точности, что наблюдаемое движение уже является установившимся (капля движется с постоянной скоростью).
3. С помощью секундомера определите время движения  $t_1$  выделенной капли вверх при прохождении определенного расстояния  $S_1$ , а также время движения  $t_2$  этой же капли вниз при прохождении определенного расстояния  $S_2$ . Пройденное каплей расстояние определяется как произведение цены деления микрометра (см. п.1 задания) на число пройденных делений шкалы. Занесите данные в таблицу 1. Повторите опыт с несколькими каплями (5-6 капель).

Таблица 1.

Номер капли	$U$ , В	$S_1$ , мм	$t_1$ , с	$S_2$ , мм	$t_2$ , с

4. Повторите эксперимент для нескольких капель (5-6 капель) при напряжениях на установке Милликена 400 В и 500 В. Занесите данные в таблицу 1.
5. Используя данные таблицы 1 сделайте расчет скоростей  $v_1$  и  $v_2$  капель по формулам (5) и (6) и, затем, радиусов и зарядов капель по формулам (7) и (8). Так как заряд капли есть целое число  $n$  элементарного заряда  $e$  (заряда электрона):

$$Q = n \cdot e \quad (9),$$

то можно определить этот элементарный заряд. Заполните таблицу 2.

Таблица 2.

Номер капли	$v_1$ , м/с	$v_2$ , м/с	$Q$ , Кл	$r$ , м	$n$	$e$ , Кл

Сравните радиусы капель с длиной свободного пробега молекул воздуха.

Проведите математическую обработку полученных результатов.

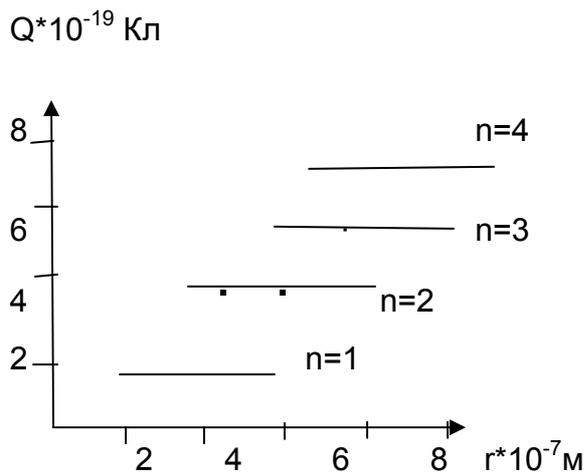


Рисунок 2. Пример графического представления результатов.

**Вопросы, которые следует разобрать при подготовке к сдаче допуска к работе.**

1. Сформулируйте закон Стокса.
2. Дайте определение подвижности частицы.
3. В чем состоит классический опыт Милликена? В чем его отличие от версии, реализованной в используемой лабораторной установке?
4. Какие силы действуют на заряженную каплю масла в опыте Милликена?
5. Получите формулу (5).
6. Получите формулу (6).

**Вопросы, которые следует разобрать при подготовке к сдаче отчета по работе.**

1. Почему в установке используется масло, а не вода?
2. Почему капля должна быть маленькой? Каков нижний предел размеров капель?
3. Дайте определение электрического заряда.

## Лабораторная работа №3

### Закон Био-Савара-Лапласа. Магнитное поле соленоида

#### Цель работы.

Исследование магнитного поля вдоль оси катушек с различными параметрами (проверка закона Био-Савара-Лапласа и теоремы о циркуляции вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ ).

#### Оборудование.

Индукционная катушка, 300 витков,  $d=41$  мм,  $l=165$  мм.

Индукционная катушка, 300 витков,  $d=33$  мм,  $l=165$  мм.

Индукционная катушка, 300 витков,  $d=25$  мм,  $l=165$  мм.

Индукционная катушка, 200 витков,  $d=41$  мм,  $l=110$  мм.

Индукционная катушка, 100 витков,  $d=41$  мм,  $l=55$  мм.

Индукционная катушка, 150 витков,  $d=26$  мм,  $l=165$  мм.

Индукционная катушка, 75 витков,  $d=26$  мм,  $l=165$  мм.

Датчик Холла, аксиальный

Тесламетр

Источник питания, универсальный

Линейка демонстрационная,  $l=1000$  мм.

Цилиндрическая опора –PASS,

Струбцина, 2 шт.

Подставка под катушки.

Соединительный шнур,  $l = 500$  мм, синий.

Соединительный шнур,  $l = 500$  мм, красный, 2 шт.

#### Темы для изучения.

Магнитное поле, его характеристики - вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ , напряженность магнитного поля  $\vec{H}$ , закон Био-Савара-Лапласа, теорема о циркуляции векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  для случая постоянного тока, магнитное поле кругового тока и катушки с током, эффект Холла.

#### Краткая теория.

Согласно теореме о циркуляции вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ , в случае поля постоянного тока:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{r} = I, \quad (1)$$

где  $L$  - замкнутый контур, по которому вычисляется циркуляция,

$\vec{H}$  - вектор напряженности магнитного поля,

$I$  - алгебраическая сумма токов, пронизывающих область, охваченную контуром  $L$ .

Для вектора  $\vec{B}$  теорема о циркуляции имеет вид

$$\oint_L \vec{B} d\vec{r} = \mu_0 \mu I, \quad (2)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная (абсолютная магнитная проницаемость вакуума),  $\mu$  - магнитная проницаемость вещества, заполняющего пространство между токами.

Согласно закону Био-Савара-Лапласа, напряженность магнитного поля  $d\vec{H}$ , создаваемая элементом тока  $I d\vec{l}$  в точке, положение которой характеризуется проведенным от элемента тока радиус-вектором  $\vec{\rho}$  (смотри рисунок 1), определяется по формуле:

$$d\vec{H} = \frac{I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{\rho}}{\rho^3}. \quad (3)$$

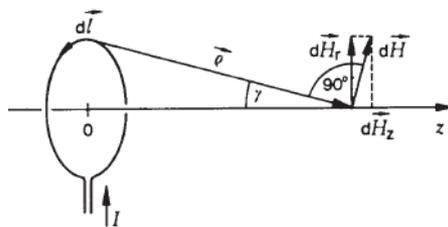


Рис. 1. Схема для определения магнитного поля на оси кругового тока

Закон позволяет определять магнитное поле от произвольного тока. Для кругового тока и точки наблюдения на оси витка (ось OZ направлена по оси витка, начало отсчета – в центре витка):

$$dH = \frac{I}{4\pi\rho^2} dl = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{dl}{R^2 + z^2}, \quad (4)$$

где  $R$  - радиус витка.

Разложим вектор  $d\vec{H}$  на поперечную (относительно оси Z) компоненту  $dH_r$  и продольную  $dH_z$ .

Компоненты  $dH_r$  в сумме от всех элементов проводника дают нулевое значение

$$H_r(z) = 0. \quad (5)$$

Компоненты  $dH_z$  имеют одно направление для всех элементов проводника  $d\vec{l}$ , поэтому результирующая составляющая поля вдоль оси витка равна сумме всех  $dH_z$ .

Следовательно, величина результирующего поля на оси витка с током равна:

$$H(z) = H_z(z) = \frac{I}{2} \cdot \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{3/2}} \quad (6)$$

и вектор магнитной индукции равен:

$$B(z) = \frac{\mu_0 \mu \cdot I}{2} \cdot \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{3/2}} \cdot (7)$$

Величина магнитной индукции на оси катушки длиной  $l$ , радиусом  $R$  и количеством витков на единицу длины  $n$  определяется по формуле:

$$B(z) = \frac{\mu_0 \mu n}{2} \cdot \left( \frac{a}{\sqrt{R^2 + a^2}} + \frac{b}{\sqrt{R^2 + b^2}} \right), (8)$$

где  $a = l/2 - z$  и  $b = l/2 + z$ .

Для длинной катушки - соленоида ( $l \gg R$ ), получаем:

$$B(0) = \mu_0 \cdot \mu \cdot n \cdot I. (9)$$

Формула (9) легко может быть получена и на основе теоремы о циркуляции.

### Выполнение работы.

Соберите установку, как показано на рисунке 2.

**Уточнение.** В используемом нами варианте работы источник питания без шкалы и мультиметр заменены регулируемым источником питания со шкалой.

Источник питания работает в режиме постоянного тока, если над регулятором тока горит красный светодиод.

### Внимание.

Не меняйте значение силы тока во время эксперимента, но перед тем как разомкнуть цепь в конце опыта обязательно уменьшите напряжение до нуля!



Рис. 2. Экспериментальная установка для измерения магнитного поля.

**Задание 1.** Исследование магнитной индукции вдоль оси катушки с током, проверка закона Био-Савара-Лапласа (проводится с индукционной катушкой в 300 витков,  $d=26$  мм).

1. Перед включением теслометра, убедитесь, что переключатель пределов измерений установлен в положение 20 мТл, и прибор включен на измерение постоянных магнитных полей (тумблер переключения режима измерений, расположенный в центральной части лицевой панели прибора, находится в положении «Direct Field»).
2. Включив теслометр, дайте ему прогреться в течение 5 мин., после чего произведите установку прибора на «0» с помощью соответствующей рукоятки, расположенной в правой части лицевой панели прибора.  
В дальнейшем, перед каждой новой серией измерений проверяйте, по-прежнему ли прибор установлен на «0».
3. Перед включением источника питания убедитесь, что рукоятки регулировки напряжения («V») и силы тока («A») выведены в крайнее левое положение. Включите источник питания и установите силу тока в катушке равной 1 А. Для этого рукоятку «V» вращайте вправо до тех пор, пока не загорится красный светодиод над рукояткой «A», после чего еще немного поверните ее вправо. Теперь рукояткой регулировки силы тока «A» можно установить требуемое значение силы тока в катушке.  
Поместите датчик Холла в катушку так, чтобы он измерял магнитную индукцию на оси катушки в ее центре. При этом используйте соответствующую (белую) нанесенную на датчик вспомогательную метку. Запишите показания теслометра.
4. Проведите измерения магнитной индукции, смещая датчик влево вдоль оси катушки с шагом 10мм до тех пор, пока измерительная головка датчика не окажется вне катушки.  
Выведите рукоятки «V» и «A» в крайнее левое положение, тем самым подготовив прибор к проведению новой серии измерений.
5. По результатам измерений заполните таблицу. Таблица должна также включать вычисленные по ф.(8) значения магнитной индукции в соответствующих точках.
6. Представьте результаты в виде графика зависимости  $B(z)$ , расположив начало координат в центре катушки. График должен включать как экспериментальную, так и расчетную кривые.
7. По формуле (9) определите значение магнитной постоянной  $\mu_0$ .

**Задание 2.** Исследование зависимости величины магнитной индукции вдоль оси катушки с током от длины катушки, числа витков и их диаметра.

**Задание 2а.** Зависимость магнитной индукции от числа витков при фиксированных длине и диаметре катушек. Используются катушки диаметром 26мм, длиной 165 мм, с числом витков 300, 150, 75.

1. В этой и всех последующих сериях измерений сила тока в катушках устанавливается равной 1А. Измерения проводятся подобно тому, как это описано в Задании 1.
2. Результаты представьте в виде таблиц и графика, аналогичного графику, представленному на Рис.3.

**Задание 2б.** Зависимость магнитной индукции от диаметра катушек.

С катушками 300 витков,  $d=41$  мм; 300 витков,  $d=33$  мм; 300 витков,  $d=26$  мм изучите зависимость величины магнитной индукции вдоль оси катушек от диаметра катушек. Результаты представьте в виде таблиц и графика

**Задание 2в.** Зависимость магнитной индукции от длины катушки.

С катушками  $d=41$  мм и числом витков 300, 200, 100 изучите зависимость величины магнитной индукции при одинаковых диаметрах, но разной длине катушек и числе витков, однако, при одинаковом числе витков на единицу длины. Результаты представьте в виде таблиц и графика.

Пример одного из получающихся графиков представлен на рисунке 3.

Сделайте выводы.

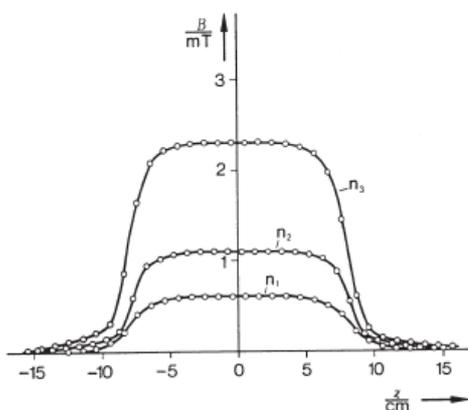


Рис. 3. Зависимость величины магнитной индукции вдоль оси катушек при различном количестве витков, но одинаковых диаметрах и длинах катушек.

**Вопросы, которые следует разобрать при подготовке к сдаче допуска к работе.**

1. Сформулируйте закон Ампера. Как определить направление силы, действующей на элемент тока со стороны магнитного поля?
2. Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа. Как определить направление вектора магнитной индукции, создаваемого элементом тока в данной точке?
3. Поле на оси кругового витка с током. Вывод формулы (7).
4. Поле на оси катушки с током. Вывод формул (8) и (9).

**Вопросы, которые следует разобрать при подготовке к сдаче отчета.**

1. Теорема о циркуляции векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  в разных системах единиц..
2. Ток смещения. Теорема о циркуляции в общем случае.
3. Применения теоремы о циркуляции к расчету полей (магнитное поле прямого тока; магнитное поле цилиндра с током; магнитное поле плоскости с током).
4. Какие допущения были сделаны при выводе ф.(8)? К каким результатам приведет учет этих допущений?
5. В чем состоит суть эффекта Холла? Какую величину измеряют датчики Холла?
6. Поясните полученные графики.

## Лабораторная работа №4

### Изучение поведения рамки с током в магнитном поле

#### Цель работы

Установить вид зависимости величины вращающего момента, действующего на рамку с током от

- 1) значения индукции внешнего магнитного поля
- 2) угла между направлением вектора магнитной индукции внешнего поля и направлением вектора магнитного момента рамки
- 3) значения магнитного момента рамки.

#### Оборудование

Катушки Гельмгольца

Набор используемых проводников, контактов, держателей

Динамометр вращения, 0.01 Н.

Универсальный источник питания

Источник питания типа 15 VAC/12 VDC/5 A

Цифровые мультиметры

Основание штатива –PASS-

Стойка штатива –PASS- квадратного сечения,  $l = 630\text{мм}$

Правоугольный зажим –PASS-

Соединительные провода (красные и синие),  $l = 750\text{мм}$

Рамки с различным числом витков (1, 2, 3) и разного диаметра.

#### Темы для изучения

Основные законы магнетизма, магнитный момент контура с током, вращающий момент, магнитный поток, однородное магнитное поле, катушки Гельмгольца.

#### Краткая теория

Замкнутый плоский контур с током  $I$  обладает магнитным моментом  $\vec{p}_m$ :

$\vec{p}_m = I \cdot \vec{S}$ , где  $\vec{S}$  - вектор, численно равный охваченной контуром площади, и направленный по нормали к плоскости контура так, что его направление связано с направлением тока в контуре правилом правого винта. Магнитный момент произвольной системы замкнутых токов равен векторной сумме магнитных моментов отдельных замкнутых контуров, составляющих систему.

Со стороны магнитного поля с индукцией  $\vec{B}$  на рамку с током действует вращающий момент  $\vec{M}$ , величина которого равна

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B} \quad (1)$$

Если магнитное поле неоднородно, на различные части проводника действуют различные вращающие моменты. Поэтому желательно исследуемый контур поместить в однородное магнитное поле. Две катушки, расстояние между которыми равно примерно их радиусу, как показано на рис.1, используются для создания однородного поля (катушки Гельмгольца).

Для рассматриваемого случая, когда контур представляет собой плоское кольцо с диаметром  $d$  и числом витков  $n$ ,

$$\vec{p}_m = I \cdot n \cdot \vec{S} \quad (2)$$

$$|\vec{p}_m| = I \cdot n \cdot \frac{\pi}{4} d^2$$

где  $\vec{S}$  - вектор площади кольца. Если в катушках Гельмгольца протекает ток  $I'$ , то из (1):

$$|\vec{M}| = c \cdot I \cdot n \cdot |\vec{S}| \cdot I' \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

где  $\alpha$  - угол между  $\vec{B}$  и вектором площади  $\vec{S}$ ,  $c$  - постоянная катушек Гельмгольца.

### Экспериментальная установка и ход эксперимента

На рамку с током, помещенную в однородное магнитное поле, со стороны поля действует вращающий момент. В ходе экспериментов проверяется, что его величина зависит от числа витков рамки, ее радиуса, ее ориентации в поле, тока, протекающего по ней, а также от величины внешнего поля.

Внешний вид экспериментальной установки показан на рис. 1. Магнитное поле создается каждой из показанных катушек.

Катушки Гельмгольца - две одинаковые, соединенные последовательно катушки с общей осью, расположенные на расстоянии, равном их радиусу. В средней части такой системы создается область практически однородного поля.



Рис. 1. Экспериментальная установка для определения значения вращающего момента рамки с током, помещенной во внешнее магнитное поле.

По схеме Гельмгольца, обеспечивающей наилучшую однородность магнитного поля, проводник, соединяющий катушки, замыкает клеммы 1-1 или 2-2. В режиме постоянного включения ток через катушки не должен превышать 3 А.

Соединительные провода располагаются свободно. Они скручиваются вместе (бифилярно) для исключения возможности появления дополнительного магнитного момента.

Положение нулевой точки для вращающейся рамки должно проверяться постоянно, т. к. быстрые вращательные движения могут изменить ее положение. Для установки динамометра на ноль следует верхним верньером прибора поставить указатель значений в нулевое положение, после чего рамка динамометра вращением нижнего верньера перемещается в «нулевое» положение.

На отсчетном устройстве подвеса рамок нанесены отметки с интервалом в  $30^{\circ}$ . Чтобы избежать использование неградуированной части, рекомендуется использовать углы поворота рамки, кратные  $30^{\circ}$ .

**Упражнение 1.** Установите вид зависимости вращающего момента, действующего на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле от величины тока  $I'$  в катушках Гельмгольца.

1. Собрать установку согласно рис.1. Подключить необходимые источники питания

2. Выбрать для эксперимента контур с тремя витками. Подвесить контур к рамке динамометра так, чтобы в ходе эксперимента обеспечивалось максимальное значение момента сил.

3. Зафиксировать ток через контур в 2 А.

4. Меняя ток в катушках Гельмгольца в интервале 0-3 А (4-5 значений на интервал), снять зависимость.

5. По результатам измерений заполнить таблицу и построить график зависимости.

Оценить погрешность измерений.

**Упражнение 2.** Установите вид зависимости вращающего магнитного момента, действующего на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле от числа витков контура.

1. Собрать установку согласно рис.1. Подключить необходимые источники питания

2. Выбрать контур для эксперимента. Подвесить контур к рамке динамометра так, чтобы в ходе эксперимента обеспечивалось максимальное значение момента сил.

3. Зафиксировать ток через контур в 3 А.

4. Зафиксировать ток в катушках Гельмгольца в 3А. Провести измерение.

5. Заменить контур. Провести пп. 3 – 4.

6. По результатам измерений заполнить таблицу и построить график.

Оценить погрешность измерений.

После каждого измерения при выключенных источниках питания проводится установка динамометра на ноль.

**Упражнение 3.** Установите вид зависимости вращающего момента, действующего на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле, от угла между магнитным моментом контура и направлением магнитного поля.

1. Собрать установку согласно рис.1. Подключить необходимые источники питания .
2. Выбрать для эксперимента большой контур с одним витком. Подвесить контур к рамке динамометра так, чтобы в ходе эксперимента обеспечивалось максимальное значение момента сил.
3. Зафиксировать ток через контур в 3 А и ток в катушках в 3 А.
4. Проведите серию измерений. Для этого с помощью отсчетного устройства подвеса рамок меняйте ориентацию магнитного момента контура в магнитном поле с шагом  $30^\circ$  (три отсчета в одну и другую сторону от начального положения).
5. По результатам измерений заполнить таблицу и построить график зависимости .

Оценить погрешность измерений.

После каждого измерения при выключенных источниках питания проводится установка динамометра на ноль.

**Упражнение 4.** Установите вид зависимости вращающего магнитного момента, действующего на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле, от тока в контуре  $I$  .

1. Собрать установку согласно рис.1. Подключить необходимые источники питания .
2. Выбрать для эксперимента большой контур с одним витком. Подвесить контур к рамке динамометра так, чтобы в ходе эксперимента обеспечивалось максимальное значение момента сил.
3. Зафиксировать в катушках в 3 А.
4. Меняя ток в контуре в интервале 0-3 А (4-5 значений на интервал), снять зависимость.
5. По результатам измерений заполнить таблицу и построить график зависимости .

Оценить погрешность измерений.

**Упражнение 5.** Установите вид зависимости вращающего момента, действующего на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле, от диаметра контура.

Провести измерения, используя большой и маленький контуры с одним витком. Через катушки и контуры пропускайте токи в 3 А. Результаты

представьте в виде таблицы и графически. Оцените погрешность измерений.

После каждого измерения при выключенных источниках питания проводится установка динамометра на ноль.

**Вопросы, которые следует разобрать при подготовке к сдаче допуска к работе.**

1. Магнитный момент контура с током.
2. Силы, действующие на контур с током в магнитном поле. Поведение контура с током в магнитном поле.

**Вопросы, которые следует разобрать при подготовке к сдаче отчета по работе.**

1. Работа по перемещению контура с током в магнитном поле.
2. Магнитный момент плоской спирали с током (на конкретном примере, предложенном преподавателем).

## Лабораторная работа №5

### Изучение явления электромагнитной индукции.

#### Цели работы:

- изучить явление электромагнитной индукции;
- измерив импульс наведенного напряжения  $U_{SS}$  и скорость падающего магнита, рассмотреть зависимость импульса наведенного напряжения  $U_{SS}$  от скорости магнита;
- определить зависимость величины магнитного потока, возбужденного падающим магнитом, от скорости этого магнита.

#### Темы для изучения

Закон индукции, магнитный поток, уравнения Максвелла.

#### Оборудование

Базовая установка Кобра3	1	
Источник питания, 12 В	1	
Информационный стандартный кабель RS 232	1	
Программное обеспечение для универсального плоттера, Система "Кобра 3"	1	
Световой барьер, компактный	1	
Штативный стержень, круглый, 600 мм	1	
Зажим-насадка для круглых или прямоугольных стержней		3
Треножник – PASS -	1	
Универсальный зажим	1	
Стеклянная трубка, 300 мм	1	
Держатель катушки	1	
Катушка, 600 витков, короткая	1	
Магнит, $d = 8$ мм, $l = 60$ см	1	
Соединительный шнур, 32 А, 50 см, красный	2	
Соединительный шнур, 32 А, 50 см, синий	2	
Соединительный шнур, 32 А, 50 см, желтый	1	
ПК с системой Windows® 95 или выше		

#### Идея эксперимента и установка

Постоянный магнит падает с разной скоростью сквозь катушку. Изменение магнитного потока  $\Phi$  порождает импульс наведенного напряжения. Импульс наведенного напряжения  $U_{SS}$  записывается компьютерной интерфейсной системой. В зависимости от полярности магнита импульс напряжения либо положительный, либо отрицательный.

Для проведения эксперимента, соберите установку, как показано на рис 1 и 2. Расположите световой барьер прямо над катушкой. Магнит при падении должен пересекать луч света.

Стенки стеклянной трубки ограничивают движение магнита и обеспечивают его поступательное движение даже при падении с большой высоты.

Рис. 1: Экспериментальная установка.

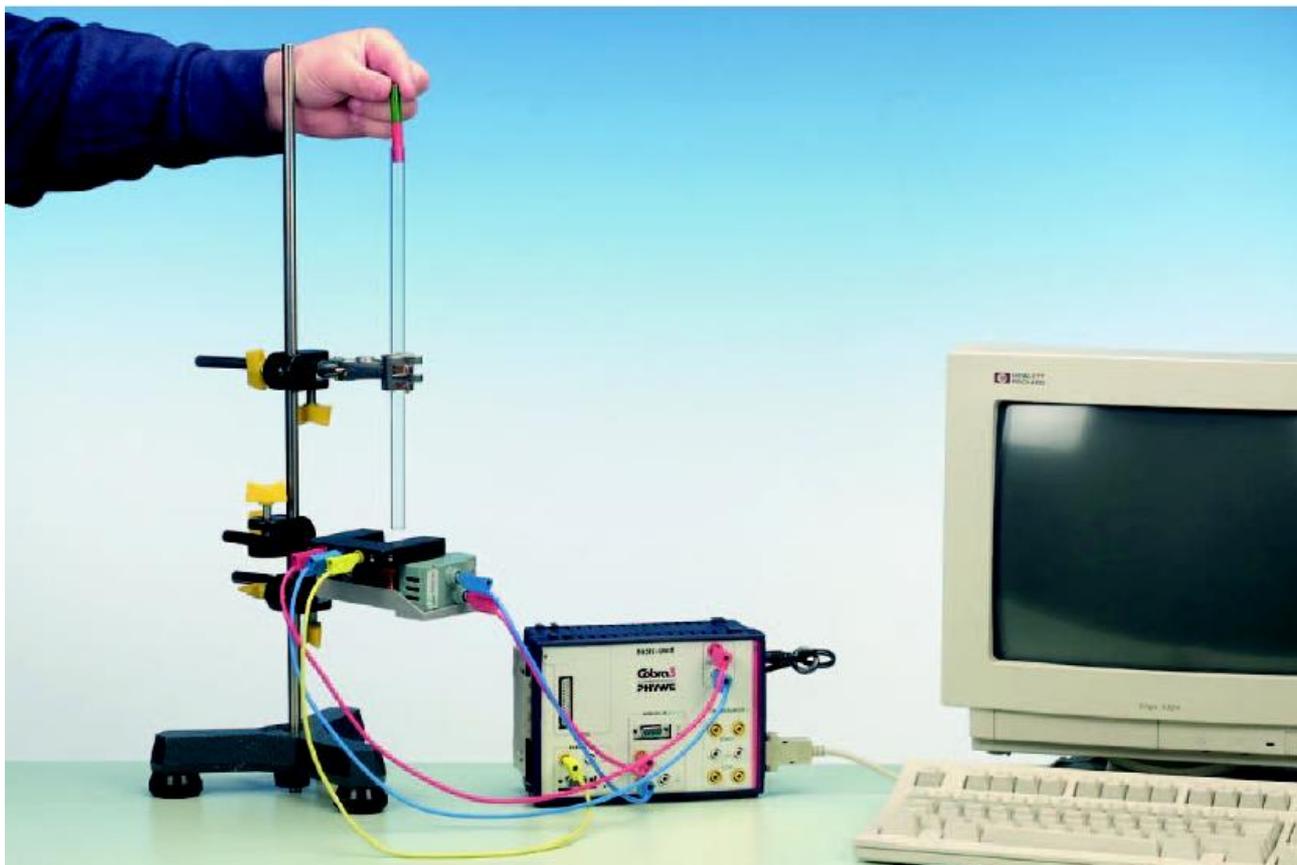
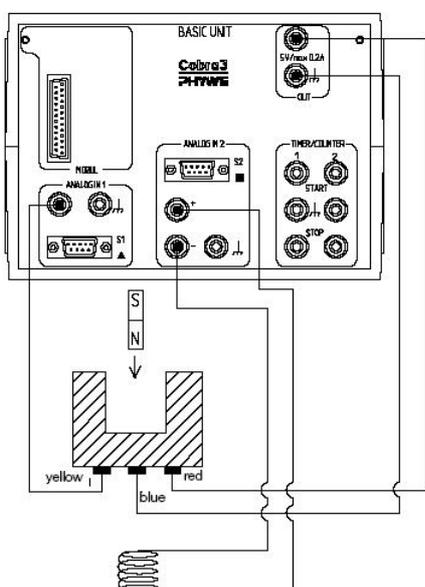


Рис. 2: Схема цепи.



## Ход работы

- Запустите программу «Measure». В пункте меню «Gauge» выберите программу измерений «Cobra3 Universal Writer». Установив параметры так, как указано на рис. 3, нажмите «Продолжить» («Continue»).
- Отожмите кнопку «Начало измерений» (“Start measurement”).
- Просуньте кончик магнита в стеклянную трубку, отпустите магнит, поймите его другой рукой под катушкой и вручную завершите процедуру измерения, нажав кнопку «Остановить измерение» (“Stop measurement”).
- Оцените по графику интервал времени, в течение которого меняется поток магнитной индукции в катушке. Выберите пункт меню «Настройки дисплея» («Display options»), в котором войдите в раздел «Данные по оси X» («X- data») и в строке «Отображаемый интервал» («Displayed area») введите нижнюю и верхнюю границы временного интервала так, чтобы в него заведомо (с запасом) вписался интервал, на котором изменяется поток магнитной индукции.
- Измерьте период прерывания сигнала канала IN 1 (световой барьер), используя опцию «Обзор» (“Survey”) (рис. 4). Данному каналу соответствует красная кривая на графике. В рассматриваемом примере  $\Delta x = \Delta t = 26,2$  мс. Длина магнита составляет  $l = 6$  см, следовательно, скорость магнита перед входом в катушку равна  $v = l / \Delta t = 2,29$  м/с.

Рис. 3: Параметры измерения.

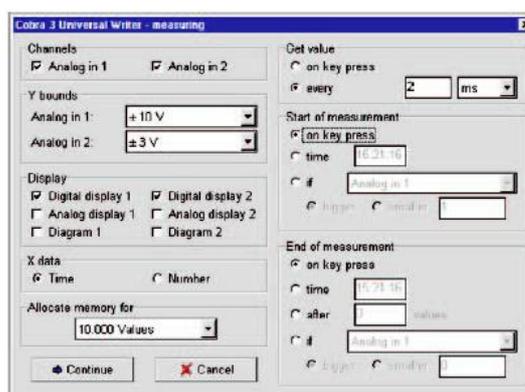
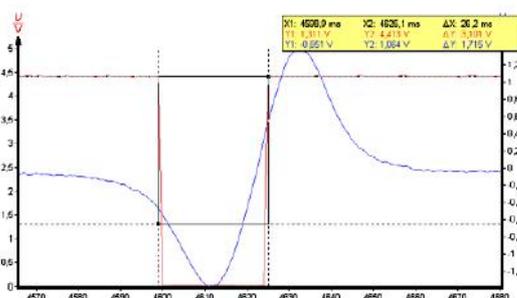


Рис. 4: Определение скорости падающего магнита.



- При помощи опции «Обзор» измерьте общую амплитуду  $U_{SS}$  (от пика к пику) наведенного напряжения (рис. 5); в данном случае:  $U_{SS} = \Delta y = 2,764$  В.
- С помощью опции «Отметить» («Mark») выделите неиспользуемые отрезки кривой до и после импульса индукции и вырежьте их при помощи опции «Отрезать» (“Cut”).

- Отдельно отметьте положительную ( $F_1$ ) и отрицательную ( $F_2$ ) части кривой (сравните рис. 7). Вычислите площади, используя опцию «Показать интеграл» (“Show integral”). Добавьте значения двух площадей (рис. 6).

Используя направляющую стеклянную трубку, меняйте начальную высоту магнита по отношению к катушке (а, следовательно, и скорость прохождения магнитом катушки). Эксперимент проведите для 5-6 различных начальных высот. Результаты представьте в виде таблиц и графиков 8 и 9.

### Краткая теория.

- Для наведенного напряжения справедливо следующее:

$$U = -n \frac{d\Phi}{dt},$$

где

$n$  - количество витков в катушке;

$\Phi$  - магнитный поток;

$t$  - время.

Проинтегрируем выражение:

$$\Phi = -\frac{1}{n} \int U dt = B \cdot A,$$

где

$B$  - плотность магнитного потока (магнитная индукция);

$A$  - площадь поперечного сечения катушки.

Рис. 5: Определение наведенного напряжения  $U_{SS}$ .

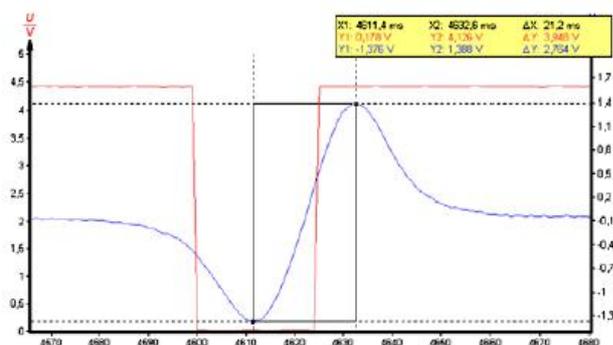
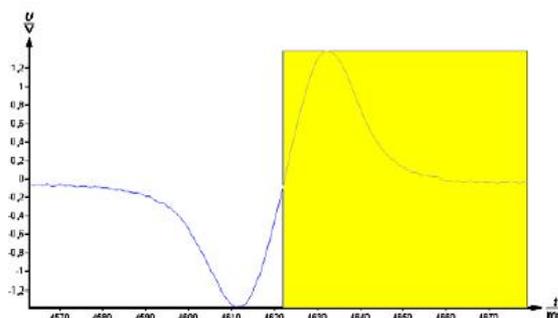


Рис. 6: Расчет магнитного потока.



- Постройте график зависимости напряжения  $U_{ss}$  от скорости падения  $v$  магнита (рис. 8). Из него видно, что напряжение прямо пропорционально скорости:  $U_{навед} \sim d\Phi / dt$ .
- Из рис. 9 следует, что интегралом от наведенного напряжения является постоянная, не зависящая от скорости изменения поля:

$$\Phi = B \cdot A .$$

### Замечания

- На рис. 4, 5 и 6 видно, что кривые проходят симметрично, особенно при малой высоте падения.
- При приближении магнита и при его удалении знак наведенного напряжения различен.

Рис. 7: Расчет магнитной индукции.

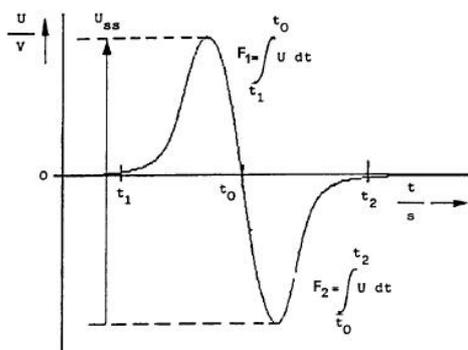


Рис. 8: Зависимость амплитуды наведенного напряжения  $U_{ss}$  от скорости падения магнита  $v$ .

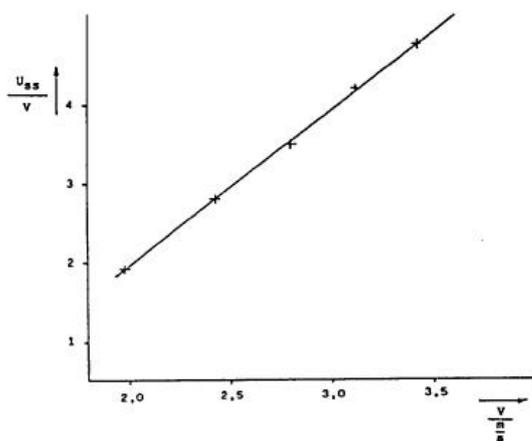
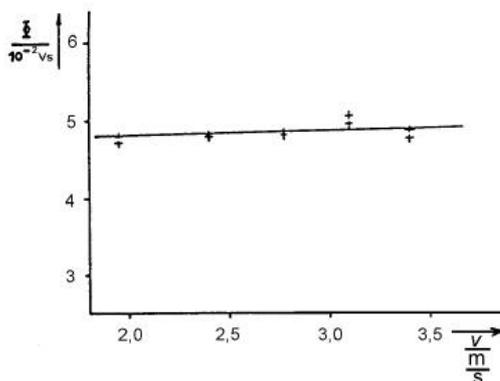


Рис. 9: Магнитный поток  $\Phi$ , определенный при помощи кривых на графике рис. 6, для различных скоростей магнита.



**Теоретические вопросы, которые следует разобрать при подготовке к сдаче допуска к работе.**

1. Дайте определения вектора магнитной индукции, потока вектора магнитной индукции.
2. В чем состоит суть явления электромагнитной индукции?
3. Сформулируйте закон электромагнитной индукции в формулировке Максвелла, Фарадея.
4. Сформулируйте правило Ленца. На примерах поясните его действие.

**Теоретические вопросы, которые следует разобрать при подготовке к сдаче отчета по работе.**

1. Каковы механизмы электромагнитной индукции?
2. Сила Лоренца.
3. Теорема о циркуляции вектора электрической напряженности в общем виде.
4. Ток смещения. Теорема о циркуляции вектора магнитной индукции в общем виде.

## Лабораторная работа №6 ГИСТЕРЕЗИС ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

### **Цель работы.**

Исследование внутреннего магнитного поля в различных ферромагнитных средах в зависимости от внешнего поля (ферромагнитный гистерезис).

### **Оборудование.**

Катушка, 600 витков, 2 шт.

Железный сердечник, U-образный, цельный

Железный сердечник короткий, цельный

Железный сердечник, U-образный, пластинчатый

Железный сердечник, короткий, пластинчатый

Перекрестный выключатель

Источник питания, универсальный,

Реостат, 10 Ом, 5,7 А

Датчик Холла, аксиальный

Цилиндрическая опора -PASS-

Прямоугольный зажим -PASS-

Штативный стержень, 150 мм

Соединительный шнур, 750 мм, красный

Соединительный шнур, 750 мм, синий

Базовая установка Кобра3

Источник питания 12 В/ 2 А

Измерительный модуль, Сила/Тесла

Программное обеспечение для измерителя

силы/ тесла, система "Кобра 3"

Информационный стандартный кабель RS 232

ПК с системой Windows®

### **Темы для изучения.**

Магнитная индукция, магнитный поток, напряженность магнитного поля, магнитное поле катушек, магнитный момент, спин, магнетики, их виды, намагниченность, токи намагничивания, ферромагнетики, гистерезис, остаточная намагниченность, коэрцитивная сила.

### **Краткая теория.**

Ферромагнетиками называются вещества, в которых ниже определенной температуры, называемой точкой Кюри, устанавливается ферромагнитный

порядок магнитных моментов атомов (ионов) в неметаллических веществах и спиновых магнитных моментов коллективизированных электронов в металлических веществах. Ферромагнитный порядок означает, что большинство магнитных моментов параллельны друг другу, так что вещество обладает спонтанной намагниченностью в отсутствие магнитного поля.

Намагниченность ферромагнетиков растет с увеличением магнитного поля нелинейно и достигает насыщения при определенных значениях внешнего поля. Намагниченность ферромагнетиков также зависит от «магнитной предыстории образца», что делает зависимость намагниченности от внешнего поля неоднозначной и приводит к магнитному гистерезису.

На рисунке 1 представлен гистерезис ферромагнитного материала – график зависимости магнитной индукции  $B$  в ферромагнетике от напряженности внешнего магнитного поля  $H$  при измерениях в прямом и обратном направлениях из размагниченного состояния среды.

Координата точки пересечения графика с осью  $OY$  определяет так называемую остаточную магнитную индукцию, по которой можно определить остаточную намагниченность, то есть намагниченность среды в отсутствие внешнего магнитного поля. Координата точки пересечения графика с осью  $OX$  определяет коэрцитивную силу или значение напряженности внешнего магнитного поля, при котором среда полностью размагничивается.

В данном эксперименте внешнее магнитное поле создается с помощью катушки, а в качестве ферромагнитного образца выступает сердечник, расположенный внутри катушки. Напряженность  $H$  магнитного поля внутри катушки рассчитывается по формуле:

$$H = I \cdot n / L ,$$

где  $n$  - количество витков в катушке (600),

$L$  - средняя длина катушки (для цельного сердечника  $L = 232$  мм, для пластинчатого сердечника  $L = 244$  мм).

Коэффициент  $n/L$  для двух различных сердечников равен:

- сплошной сердечник:  $n/L = 2586 \text{ м}^{-1}$ ;
- пластинчатый сердечник:  $n/L = 2459 \text{ м}^{-1}$ .

Поскольку интерфейс Кобра3 измеряет напряжения  $U$ , и в установке используется реостат на 10 Ом, сила тока в катушке будет определяться по формуле:

$$I = U / 10 .$$

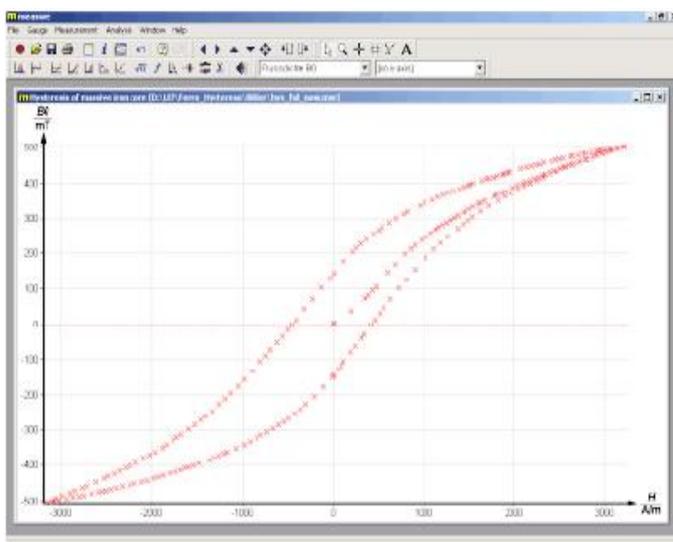


Рис. 1. Гистерезис ферромагнитного материала

### Выполнение работы.

Соберите установку, как показано на рисунке 2.

Разместите установку из катушек как можно дальше от компьютера и от базовой установки Кобра 3 во избежание помех в процессе передачи данных под влиянием сильных магнитных полей.

Подключите модуль «сила/тесла» к модульному порту базовой установки, а резистор – к аналоговому входу 2 базовой установки.

Соедините кабель датчика Холла с модулем «сила/тесла»

Установите ограничитель тока на источнике питания на 5 А и сопротивление на реостате равное 10 Ом (ползунок реостата должен быть в положении, показанном на рисунке 2). Направление магнитного поля меняется на противоположное с помощью переключателя. Следует помнить, что менять направление магнитного поля следует только при напряжении 0 В, чтобы избежать перепадов напряжения, влияющих на передачу данных. Величина магнитной индукции во время эксперимента не должна превышать 1000 мТл (допустимое значение для датчика).

Задание. Получение петли гистерезиса для сплошного и пластинчатого сердечников. Определение основных характеристик петли.

1. Разместите в катушке сплошной сердечник, расположите датчик Холла внутри сердечника так, чтобы он оказался над круглым небольшим отверстием в разрезе сердечника. Регулятор напряжения на источнике питания установите на «0». Включите источник питания.
2. Запустите программу «Measure» и в пункте меню «Gauge» выберите нужную программу измерений «Cobra3 Force/Tesla». Установите параметры измерения и опции экрана, как на рисунках 3а, 3б и 3с. Нажмите «Далее» («Continue»), после чего на экране появятся значения силы тока в катушке и индукции в сердечнике.

3. Если в железном сердечнике наблюдается остаточная магнитная индукция ( $B \neq 0$ ), необходимо размагнитить сердечник, выполнив следующие действия:
- установите положение переключателя знака напряжения так, чтобы генерировалось обратное к остаточной намагниченности магнитное поле,
  - регулятором резко, но не намного, повысьте и затем сбросьте напряжение; повторите эту процедуру несколько раз, каждый раз уменьшая напряжение, пока намагниченность станет равной нулю ( $B = 0$ ).



Рис. 2. Экспериментальная установка для изучения гистерезиса ферромагнитных материалов

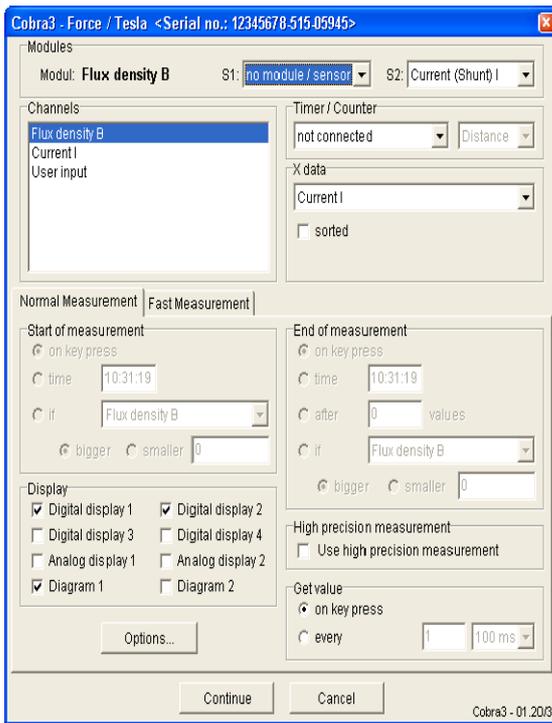


Рис. 3а. Окно установки параметров измерения гистерезиса

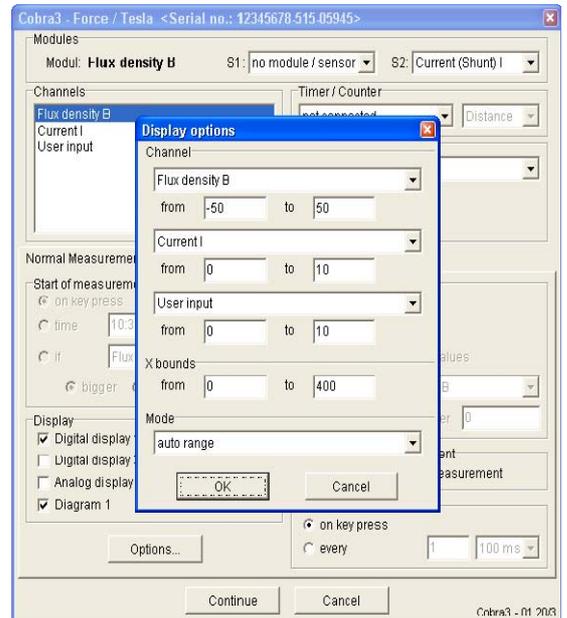


Рис. 3б. Окно установки параметров измерения гистерезиса

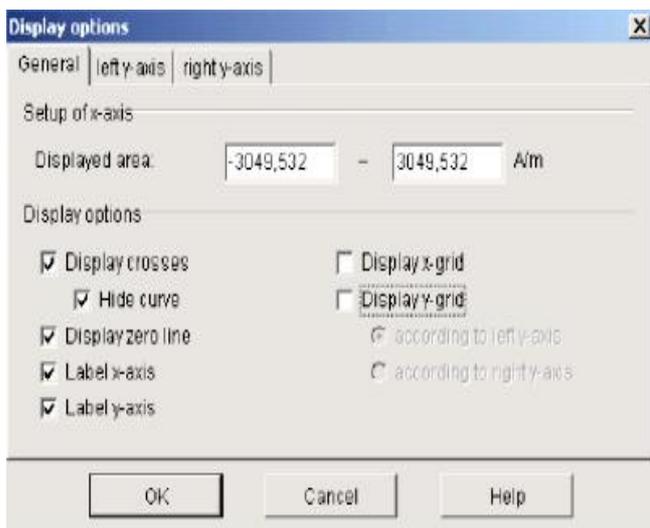


Рис. 3с. Окно установки параметров графического представления

4. Нажмите «Начало измерения» («Start measurement»), регулятором источника питания медленно и с небольшим шагом увеличивайте напряжение и затем уменьшите его до нуля, внося после каждого сдвига регулятора результаты в программу обработки. Для этого после каждого шага изменения напряжения нажимайте на экране опцию «Save value» («Сохранить величину»). В первом опыте возьмите в качестве максимального напряжения 10 В.
5. При помощи переключателя измените полярность магнитного поля (напряжения). Повторите процедуру повышения и понижения величины напряжения с одновременной записью результатов. Еще раз измените полярность и проведите только увеличение напряжения с записью результатов. Остановите измерение, нажмите на экране опцию «Закреть» («Close»). Уменьшите напряжение до 0 В. Записанные значения представляются в виде графика зависимости магнитной индукции от силы тока в катушке. Для того, чтобы программа автоматически считала величину напряженности магнитного поля по измеренному значению тока и представляла полученные результаты в осях  $B$  и  $H$  в пункте «Изменение каналов» («Channel modification») выберите параметры, указанные на рисунке 5. Для сплошного сердечника поставьте коэффициент в «Операции» («Operation») равным 2586 (для пластинчатого сердечника этот коэффициент равен 2459).
6. По графику гистерезиса определите коэрцитивную силу и остаточную магнитную индукцию. Для этого при помощи функций «Масштаб» («Zoom») и «Обзор» («Survey») в области пересечения осей и графика функции определите точки пересечения графика с осями  $OX$  и  $OY$ , используя линии курсора, которые можно легко перемещать.
7. Сняв необходимые результаты с графика на экране, представьте в отчете по работе таблицу и график на миллиметровой бумаге. Значения, описывающие зависимость  $B(H)$ , можно вывести на экран, кликнув правой кнопкой мыши по графику и войдя в пункт «Data table».

8. Повторите пункты 2-7, взяв в качестве максимального напряжения 15В.
9. Смените сплошной сердечник на пластинчатый, повторите эксперимент, пункты 2 – 6, дважды. Один раз в качестве максимального напряжения возьмите 10В, другой раз – 15В.

**Дополнительное пояснение.** В отчет должен войти один график, на котором приводятся кривые гистерезиса для сплошного и пластинчатого сердечников при максимальном напряжении 10В. Для максимального напряжения 15 В представьте только таблицы результатов и укажите остаточную намагниченность и коэрцитивную силу.

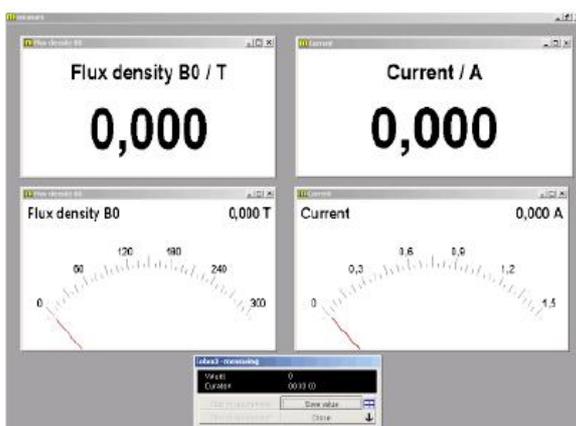


Рис. 4. Вид окна показаний тока и магнитной индукции при измерении

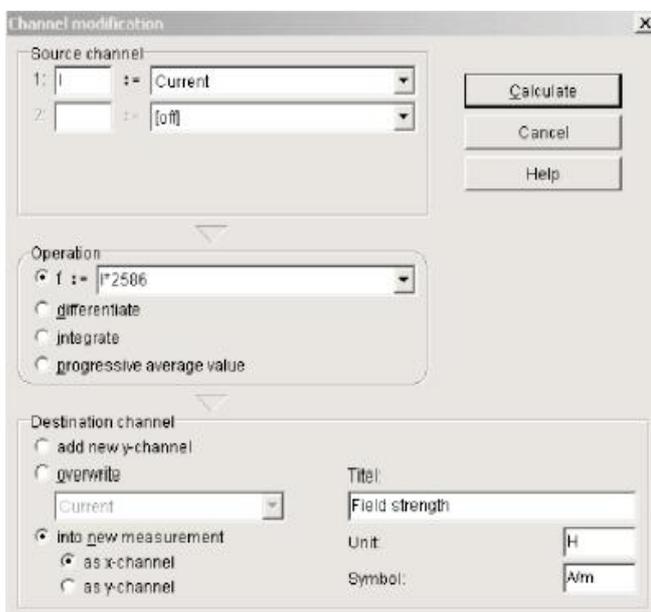


Рис.5. Окно установки размерности оси OX

**Вопросы, которые следует разобрать при подготовке к сдаче допуска к работе.**

1. Дайте определение напряженности магнитного поля.
2. Дайте определение магнитной индукции.
3. Магнетики, их классификация.
4. Какие вещества называются ферромагнетиками? Основные свойства ферромагнетиков.
5. Какие параметры и величины определяют величину магнитного поля внутри катушки с током?
6. Что такое намагниченность вещества?
7. Токи намагничивания.
8. Что такое остаточная намагниченность? Чем она обусловлена?
9. Что такое коэрцитивная сила?

**Вопросы, которые следует разобрать при подготовке к сдаче отчета по работе.**

1. Как можно размагнитить ферромагнетик?
2. Что такое магнитный гистерезис? Чем он обусловлен? Какие физические процессы соответствуют основным участкам петли гистерезиса?
3. В чем отличие кривых  $B(H)$  и  $J(H)$ ?
4. Как в принципе можно проверить, что полученная петля гистерезиса является максимальной?
5. Из мягкого или жесткого ферромагнетика изготовлен сплошной сердечник, наборный сердечник?

## Приложение

### Построение прямой методом парных точек

Угловой коэффициент к линейной зависимости

$$y=k \cdot x+b$$

можно достаточно точно определить методом парных точек.

Пронумеруем экспериментальные точки и возьмем две из них, например 1 и 4, и проведем через них прямую. Угловой коэффициент этой прямой равен

$$k_1 = \frac{y_4 - y_1}{x_4 - x_1}. \text{ Возьмем другую пару точек - 2 и 5, снова построим прямую и}$$

определим ее угловой коэффициент. Проведя таким образом еще несколько прямых, получим набор угловых коэффициентов. Их среднее даст коэффициент к искомой прямой. Погрешность углового коэффициента  $\Delta k$  определяется так же, как и погрешность серии измерений. Пары точек для проведения вспомогательных прямых следует выбирать так, чтобы расстояния между x-ми координатами этих точек для всех пар были одинаковыми и немного превышали половину всего интервала значений величины x. При этом точность определения k будет наибольшей, лишь немного уступающей точности при использовании метода наименьших квадратов (см. ниже).

Для нахождения b нужно учесть, что наилучшая прямая должна проходить через центр тяжести экспериментальных точек, т.е. через точку с координатами, равными средним значениям  $\bar{X}$  и  $\bar{y}$ , вычисляемым согласно формулам

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad \text{и} \quad \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i,$$

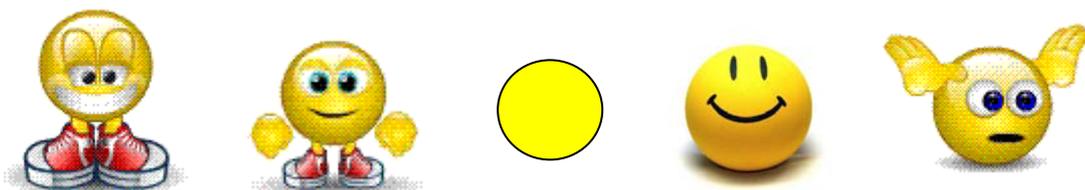
следовательно, b находится из уравнения прямой  $b = \bar{y} - k\bar{x}$ . Оценка погрешности b делается так, как это принято для косвенных измерений.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	3
Памятка студенту .....	3
Лабораторная работа №1. Исследование электростатических полей и токов в сплошной среде с помощью ванны со слабо проводящей средой. ....	11
Лабораторная работа №2. Определение элементарного заряда в опыте Милликена. ....	17
Лабораторная работа №3. Закон Био-Савара-Лапласа. Магнитное поле соленоида. ....	22
Лабораторная работа №4. Изучение поведения рамки с током в магнитном поле. ....	27
Лабораторная работа №5. Изучение явления электромагнитной индукции. ....	32
Лабораторная работа №6. Гистерезис ферромагнитных материалов.	38
Приложение. Построение прямой методом парных точек. ....	46

**Заключительный тест на усвоение материала курса «Электричество и магнетизм»**

**На каком из рисунков изображен электрон?**



**Правильный ответ:  
ни на каком**

Игорь Владимирович Милютин  
Сергей Николаевич Костенков

**Лабораторный практикум по электричеству и магнетизму**  
Учебно-методическое пособие  
для студентов физических направлений и направления  
«химия, физика и механика материалов»

Напечатано с оригинал-макета заказчика

Подписано в печать 2012. Формат  
Усл. печ.л. . Уч.-изд. л. .  
Тираж 50 экз. Заказ №

Типография ФГБОУ ВПО «Удмуртский государственный университет»  
426034, Ижевск, ул. Университетская, 1, корп.2.