



Санкт-Петербургский  
государственный  
университет

Научный парк



*Образовательный ресурсный центр по направлению физика  
Первая физическая лаборатория*

**Е.А. Денисов**

# **ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ПРОВОДНИКОВ**

**Учебно-методическое пособие  
(описание лабораторной работы)**

**№ 12**

Санкт-Петербург

2014

УДК 537.211, 537.217, 53.01

*Рецензенты:* к. ф.-м. наук, доцент И.Р. Крылов, к. ф.-м. наук, доцент Т.Л. Ким

Рекомендовано к печати Учебно-методической комиссией физического факультета СПбГУ (выписка из протокола № 10 от 17.06.2014 г.)

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов СПбГУ младших курсов естественно-научных направлений обучения, а также может быть полезно учащимся и преподавателям средних и средне-специальных учебных заведений.

Лабораторная работа выполняется на оборудовании Образовательного ресурсного центра по направлению физика Научного парка СПбГУ (<http://researchpark.spbu.ru>).

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
1. Основные законы и понятия электростатики .....	5
2. Методика проведения эксперимента .....	12
2.1. Описание экспериментальных установок .....	12
2.2. Постановка эксперимента. Методика и техника измерений.....	15
3. Техника безопасности по работе с приборами .....	18
4. Порядок выполнения лабораторной работы.....	19
4.1. Измерение силы взаимодействия зарядов .....	19
4.2. Измерение заряда шариков .....	23
5. Обработка результатов эксперимента, требования к оформлению отчета .....	25
6. Контрольные вопросы.....	27
Список рекомендованной литературы и справочные данные .....	28
Приложение. Построение графиков в пакете Origin .....	29

## Введение

Закон, описывающий взаимодействия точечных электрических зарядов, был открыт французским военным инженером и исследователем Шарлем Кулоном в далеком 1785 году (за 4 года до начала Великой французской революции) и по праву считается основным законом электростатики. Как отметил в своих лекциях выдающийся физик XX столетия Ричард Фейнман: «Это и есть все, что имеется в электростатике. Если добавить к закону Кулона принцип суперпозиции, то больше ничего в ней не останется». С момента открытия закон Кулона многократно перепроверялся во всё более точных экспериментах. Одной из основных целей этих исследований было выяснение, насколько показатель степени расстояния между зарядами может отличаться от 2.

В данной работе вам предоставлена возможность с помощью лабораторного оборудования Leybold-Didactic провести эксперимент аналогичный опыту Кулона, пронаблюдать электростатическое взаимодействие одноименных и разноименных зарядов и измерить его силу.

Вы познакомитесь с современной компьютеризированной системой сбора и обработки данных на основе датчиков силы и перемещения, сенсора CASSY 2 и программы CASSY Lab 2. На примере этой системы вы приобретете ценный опыт работы с такими комплексами.

При выполнении работы вам предстоит экспериментально убедиться в справедливости закона обратных квадратов, выяснить область его применимости для тел конечных размеров, самостоятельно определить значение электрической постоянной  $\varepsilon_0$ , а также оценить погрешность использованного метода.

# 1. Основные законы и понятия электростатики

## *Закон Кулона. Электрическое поле. Напряженность. Потенциал*

Честь открытия закона взаимодействия электрических зарядов принадлежит французскому исследователю Шарлю Кулону, опубликовавшему результаты своей работы в 1785 году [1, 2]. Предполагая аналогию сил электростатического и гравитационного взаимодействия, Кулон создал прибор для проверки закона обратных квадратов для электрических зарядов, схема которого представлена на рисунке 1.

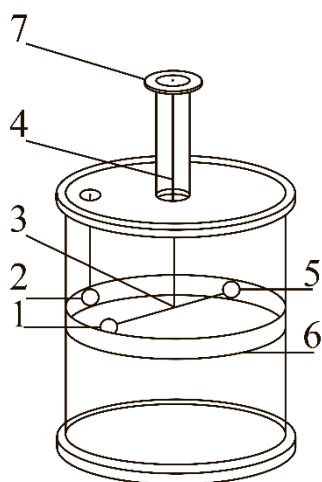


Рис. 1. Схема опыта Кулона. 1, 2 — одноименно заряженные шарики, 3 — коромысло крутильных весов, 4 — упругая серебряная нить, 5 — противовес-демпфер в виде диска, 6 — нижняя шкала угла закручивания нити, 7 — верхняя подвижная шкала.

Проводя опыты, Кулон заряжал шарики одноименными и равными по величине зарядами. Поворот подвижной шкалы, соединенной с верхним концом нити, позволял изменять расстояние между шариками. По углу закручивания нити определялась сила взаимодействия зарядов. В результате экспериментов была установлена зависимость силы отталкивания от обратного квадрата расстояния:  $F \sim 1/r^2$ .

Позднее с использованием другой установки Кулон подтвердил этот закон также для силы притяжения разноименных зарядов. Кроме этого, он предложил способ деления заряда на части кратные степеням двойки. Для этого необходимо привести в контакт заряженное тело с таким же незаряженным. При этом

заряд между ними делится поровну. Такой метод позволяет установить линейную зависимость силы взаимодействия от произведения зарядов:  $F \sim q_1 q_2$ . В результате закон Кулона может быть сформулирован следующим образом:

два неподвижных точечных заряда в вакууме действуют друг на друга с силой пропорциональной произведению модулей этих зарядов, обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними и направленной вдоль прямой, соединяющей эти заряды.

Интересно, что закон обратных квадратов был установлен примерно за 11 лет до Шарля Кулона выдающимся британским экспериментатором — Генри Кавендишем. Однако в силу неизвестных нам причин он не стал публиковать результаты своей работы в открытой печати. Лишь более ста лет спустя (в 1879 г.) неизвестные до того момента рукописи Кавендиша были систематизированы и подготовлены к печати другим великим британским ученым — Джеймсом Клерком Максвеллом.

В своей работе Кавендиш не измерял непосредственно силу взаимодействия зарядов. При постановке эксперимента он исходил из тех соображений, что при выполнении закона обратных квадратов заряд распределяется только по поверхности проводника (в частности сферы), а внутри проводника его плотность в каждой точке равна нулю. При нарушении этого закона можно было бы обнаружить избыточный заряд и внутри проводника. Проведя эксперименты по электризации с двумя концентрическими металлическими сферами, соединенными проводником, Кавендиш обнаружил, что внутренняя сфера всегда остается электронейтральной. В результате он сделал вывод о том, что сила взаимодействия зарядов обратно пропорциональна расстоянию между ними в степени  $2 \pm 0,2$ . В настоящее время показатель степени определен с точностью  $\sim 3 \cdot 10^{-16}$ .

В системе СИ сила взаимодействия двух точечных зарядов записывается следующим образом:

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r}, \quad (1)$$

где  $\vec{F}_{12}$  — сила, с которой первый заряд действует на второй,  $q_1, q_2$  — величины зарядов,  $\vec{r}_{12}$  — радиус-вектор от первого заряда ко второму,  $r_{12}$  — его модуль,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная. Электрическая постоянная по определению равна

$$\epsilon_0 \equiv 1/(\mu_0 c^2) \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}, \quad (2)$$

где  $\mu_0 \equiv 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$  — магнитная постоянная,  $c \equiv 299\,792\,458 \text{ м/с}$  — скорость света в вакууме.

## **Электрическое поле. Напряженность**

С точки зрения концепции близкодействия электростатическое взаимодействие передается посредством электрического поля, создаваемого зарядами. Электрическое поле в некоторой точке пространства характеризуется векторной величиной — напряженностью:

$$\vec{E} \equiv \vec{F} / q, \quad (3)$$

где  $\vec{F}$  — сила, действующая на малый точечный пробный заряд  $q$ . Тогда закон Кулона может быть записан в виде выражения для напряженности электрического поля точечного заряда:

$$\vec{E}_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^3} \vec{r}, \quad (4)$$

где  $\vec{r}$  — радиус вектор из точки нахождения заряда в точку, в которой определяется напряженность. А сила, действующая на точечный заряд  $q_2$  в поле с напряженностью  $\vec{E}_1$ , равна  $\vec{F}_2 = q_2 \cdot \vec{E}_1$ .

### **Принцип суперпозиции**

Другим основным законом электростатики является так называемый *принцип суперпозиции* электрических полей. Согласно ему напряженность электростатического поля  $\vec{E}_\Sigma$ , создаваемого в данной точке системой из  $n$  точечных зарядов, есть векторная сумма напряженностей  $\vec{E}_i$  полей отдельных зарядов

$$\vec{E}_\Sigma = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i. \quad (5)$$

Стоит заметить, что хотя на первый взгляд это утверждение кажется очевидным, тем не менее, в некоторых случаях оно может нарушаться. Например, для случая нелинейных сред, а также в вакууме при учете квантовых явлений.

### **Взаимодействие распределенных зарядов**

Закон Кулона вместе с принципом суперпозиции позволяют рассчитывать взаимодействие распределенных зарядов, то есть таких, размеры которых сравнимы с расстоянием между ними. В общем случае задача сводится к двойному

интегрированию силы электростатического взаимодействия по объемам, занимаемым распределенными зарядами. Для силы, действующей на заряд  $q$  со стороны заряда  $q'$  можно записать следующее выражение:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \int_{V'} \frac{\rho(\vec{r})\rho(\vec{r}')(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dV dV', \quad (6)$$

где  $V, V'$  — объемы, занимаемые зарядами  $q$  и  $q'$ ,  $\rho(\vec{r}), \rho(\vec{r}')$  — распределения объемных плотностей зарядов,  $\vec{r}, \vec{r}'$  — радиус-векторы элементарных объемов  $dV$  и  $dV'$ .

Несложно показать, что взаимодействие распределенных зарядов, обладающих сферической симметрией (например, равномерно распределенных по поверхности сферы или по объему шара), аналогично взаимодействию таких же по величине точечных зарядов, расположенных в центрах распределенных зарядов. То есть для них также применим закон Кулона. Однако на практике добиться сферически симметричного распределения заряда весьма проблематично. В случае заряженных проводников сложность связана с так называемым явлением электростатической индукции, сопряженным с перераспределением заряда на проводнике под действием внешнего электрического поля. В случае двух заряженных проводящих сфер поле каждой из них приводит к перераспределению заряда на другой и нарушению сферической симметрии для плотности заряда. Проявление электростатической индукции приводит к парадоксальным на первый взгляд эффектам, например, к притяжению тел с одноименным зарядом.

Аналитически в общем случае задача о взаимодействии двух заряженных сфер пока не решена. Однако для некоторых частных случаев решение может быть получено. Например, для случая двух почти соприкасающихся сфер произвольного радиуса этот вопрос рассмотрен в [3]. Еще проще получить выражение для силы, действующей на точечный заряд  $q$ , расположенный на расстоянии  $r$  от сферы с зарядом  $Q$  и радиусом  $R$  (см., например, [4]):

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q(Q + qR/r)}{r^2} - \frac{q^2 R}{r(r - R^2/r)^2} \right). \quad (7)$$



В случае взаимодействия с точечным зарядом  $q$  нейтральной сферы для расстояний  $r \gg R$  выражение для силы взаимодействия принимает вид:

$$F = \frac{2}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2 R^3}{r^5}. \quad (8)$$

То есть поправка, связанная с силами зеркального отражения в сфере, убывает намного быстрее силы взаимодействия точечных зарядов. В результате уже при расстояниях между заряженными сферами всего в несколько раз превышающих их радиус, их взаимодействие можно рассматривать как взаимодействие точечных зарядов.

### **Потенциал**

Согласно закону Кулона, сила Кулона является центральной силой, поскольку направлена вдоль линии, соединяющей взаимодействующие точечные заряды. Несложно показать, что все центральные силы, и сила Кулона в частности, являются *консервативными* силами, то есть их работа не зависит от траектории перехода, а определяется только конфигурацией начального и конечного состояния системы. В силу принципа суперпозиции данное свойство можно обобщить на систему произвольно распределенных зарядов.

Поля консервативных сил называются *потенциальными* полями. К потенциальным силовым полям относятся гравитационное и электростатическое поле. Для таких полей можно ввести понятие потенциала, точнее, *разности потенциалов*. Разностью потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$  между точками 1 и 2 называется работа, совершенная силами поля при перемещении малого пробного заряда по произвольной траектории из точки 1 в точку 2, отнесенная к величине этого заряда:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q} = \frac{1}{q} \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} q \vec{E} d\vec{r} = \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E} d\vec{r}, \quad (9)$$

где  $q$  — величина пробного заряда  $\vec{r}_1$ ,  $\vec{r}_2$  — радиус-векторы начальной и конечной точек траектории, а интегрирование ведется по произвольной кривой из точки 1 в точку 2. Данное определение имеет смысл поскольку работа консер-

вативных сил не зависит от формы траектории. Единица измерения потенциала — вольт ( $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ Кл}$ ).

Выражение (9) не позволяет определить абсолютное значение потенциала какой-либо точки поля. Поэтому потенциал отсчитывается относительно некоторой точки (или множества эквипотенциальных точек), потенциал которой принят за ноль. Согласно общей договоренности, когда говорят о потенциале удаленного тела, нулевым считается потенциал бесконечно удаленных точек. При наличии заземленных предметов нулевым считается их потенциал. Однако такой выбор не является обязательным. С практической точки зрения интерес представляет разность потенциалов между какими-либо двумя точками, а она не зависит от выбора точки с нулевым потенциалом.

Для потенциала, так же, как и для напряженности электрического поля, действует принцип суперпозиции — потенциал поля, создаваемого в некоторой точке пространства системой зарядов, равняется алгебраической сумме потенциалов полей каждого из этих зарядов:

$$\varphi_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \varphi_i. \quad (10)$$

Потенциал поля точечного заряда может быть вычислен исходя из определения. Найдем потенциал в точке, находящейся на расстоянии  $r$  от заряда  $Q$ , полагая потенциал на бесконечности равным нулю.

$$\varphi(r) = \varphi(r) - \varphi(\infty) = \frac{1}{q} A_{r \rightarrow \infty} = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 q} \int_r^{\infty} \frac{dx}{x^2} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left( -\frac{1}{x} \right) \Big|_{x=r}^{x=\infty} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}. \quad (11)$$

Здесь  $A_{r \rightarrow \infty}$  — работа электрического поля по перемещению пробного заряда  $q$  из точки, расположенной на расстоянии  $r$ , на бесконечность.

Поскольку поле вне заряженной сферы совпадает с полем точечного заряда той же величины, расположенного в центре сферы, то потенциал на ее поверхности вычисляется подобным образом:

$$\varphi_{\text{сф}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R}, \quad (12)$$

где  $R$  — радиус сферы.

## **Емкость**

Электрическая емкость — мера способности проводника накапливать электрический заряд. Эта величина для уединенного проводника (то есть при условии, что другие проводники бесконечно удалены от него) определяется как отношение величины сообщенного ему пробного заряда  $Q$  к потенциалу проводника  $\varphi$  относительно бесконечности:

$$C = Q / \varphi. \quad (13)$$

Единица измерения электрической емкости — фарад ( $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл} / 1 \text{ В}$ ). Воспользовавшись выражением для потенциала заряженной сферы (12), получаем емкость уединенной сферы:

$$C_{\text{сф}} = 4\pi\epsilon_0 R. \quad (14)$$

Следует заметить, что на практике вы никогда не встретитесь с уединенным проводником. Поэтому пользоваться вышеприведенной формулой можно лишь для приближённых вычислений. Емкость уединенного проводника крайне незначительна. Даже емкость проводящего шара размером с Землю составляет всего 710 мкФ. Поэтому для накопления заряда в радио- и электротехнике используются элементы, состоящие из двух разделенных диэлектриком проводников, называемые конденсаторами. Емкость конденсатора также может быть определена выражением (13), только в качестве  $Q$  следует принимать модуль заряда каждого из проводников, а  $\varphi$  — модуль разности потенциалов между ними. Емкость конденсаторов зависит от назначения и может достигать десятков и более фарад.

## 2. Методика проведения эксперимента

### 2.1. Описание экспериментальных установок

В данной работе эксперимент проводится с использованием двух установок. Схема установки для измерения силы электростатического взаимодействия в зависимости от расстояния между зарядами представлена на рисунке 2.

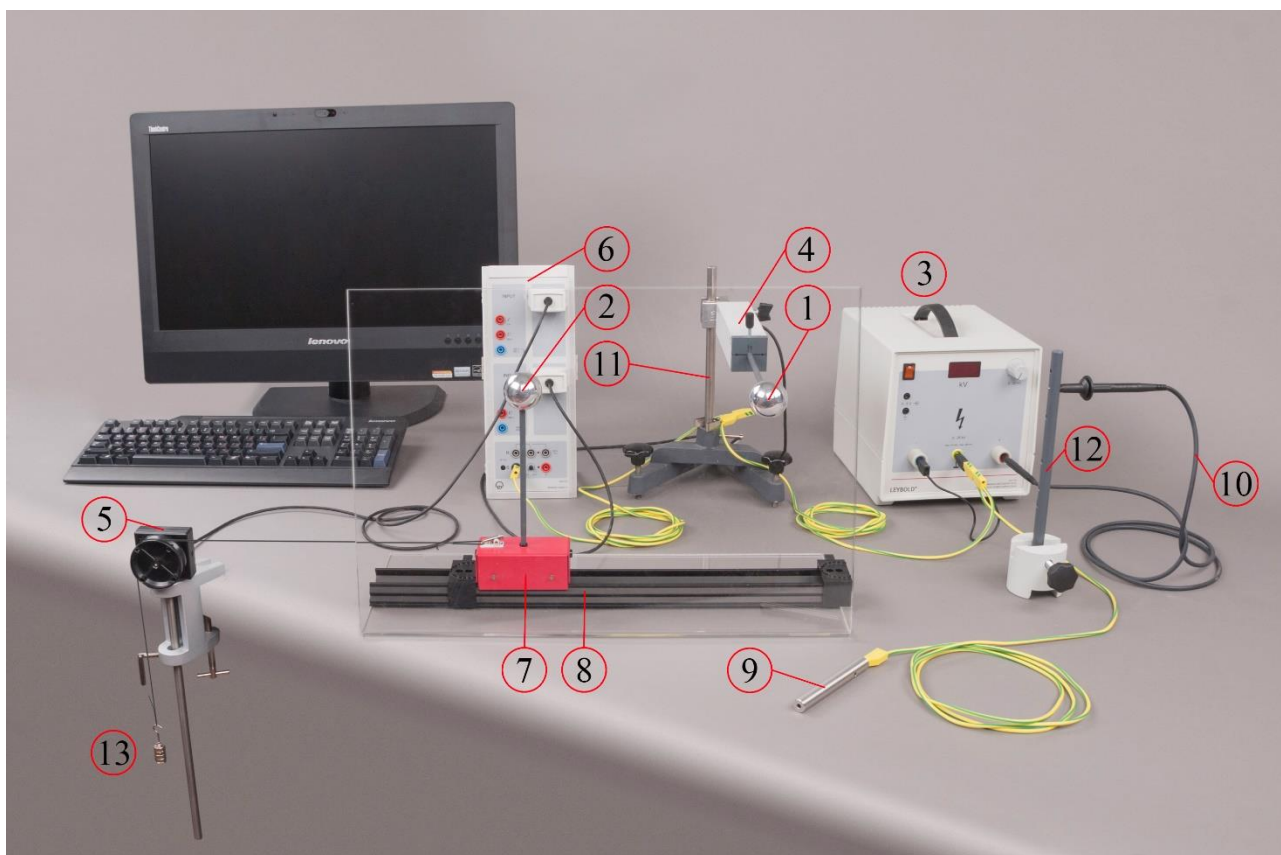


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для измерения силы электростатического взаимодействия: 1, 2 — металлизированные шарики на изолирующих стержнях, 3 — высоковольтный источник питания, 4 — датчик силы, 5 — датчик вращательного движения, 6 — сенсор CASSY-2, 7 — каретка, 8 — металлический рельс, 9 — соединительный стержень, 10 — высоковольтный кабель, 11 — штатив, 12 — изолирующий стержень в салазковом штативе, 13 — грузик.

Средняя клемма высоковольтного источника соединяется с одной из крайних клемм (в зависимости от желаемой полярности на высоковольтном кабеле), клеммой заземления на рабочем столе, стержнем штатива 11, на котором закреплен датчик силы 4, соединительным стержнем 9, а также с земляной клеммой S источника питания сенсора CASSY-2 6. Щуп высоковольтного кабеля 10, соединенный со второй крайней клеммой источника, закрепляется на изолирующем стержне, зажатом в салазковом штативе 12.

**ВНИМАНИЕ! Неправильно сделанное или отсутствующее заземление может привести к выходу из строя электронных приборов: датчика силы, датчика поворота, сенсора CASSY-2, а также к воздействию болезненного электрического разряда.**

Датчик силы 4 и датчик вращения 5 соединяются интерфейсными кабелями со входами А и В сенсора CASSY-2 6. Питание сенсора осуществляется от сетевого адаптера (на рисунке не показан). Данные, регистрируемые сенсором, передаются на компьютер с установленной программой CASSY Lab 2 по USB кабелю.

Высоковольтный источник предназначен для зарядки металлизированных шариков положительным или отрицательным зарядом, пропорциональным выходному напряжению источника. Выходное напряжение регулируется в пределах 0–25 кВ ручкой, расположенной в верхней правой части лицевой панели прибора, а его значение в киловольтах отображается на индикаторе. Заряд передается шарикам прикосновением к ним конца щупа высоковольтного кабеля. Измерение силы, действующей на шарик 1, осуществляется датчиком силы 4. Расстояние между шариками измеряется с помощью датчика вращательного движения 5. Через его шкив перекинута нить, соединенная одним концом с кареткой 7 с установленным на ней вторым шариком 2. Натяжение нити обеспечивается подвешенным на ней грузиком 13. В программе CASSY Lab 2 производится автоматический пересчет угла поворота вала датчика в величину перемещения каретки.

Для измерения заряда шариков в работе применяется установка, схема которой представлена на рисунке 3. Заряженный шарик вводится внутрь цилиндра Фарадея 2 и приводится в контакт с его дном. При этом заряд с шарика практически полностью передается цилиндру. Цилиндр соединен с одной из обкладок конденсатора 3 известной емкости ( $10 \text{ нФ} \pm 5 \%$ ), другая обкладка которого заземлена. Фактически цилиндр и земля образуют конденсатор, соединенный параллельно с конденсатором 3. Емкость такого конденсатора незначительна

по сравнению с емкостью конденсатора 3, поэтому практически весь заряд, полученный цилиндром, перетекает на соединенную с ним обкладку конденсатора. Напряжение с конденсатора подается на вход электрометрического усилителя 1 с высоким входным ( $\geq 10$  ТОм) и малым выходным ( $< 1$  Ом) сопротивлением, выполняющего роль повторителя напряжения (т.е. напряжение на выходе равно входному). Благодаря большому входному сопротивлению постоянная времени разряда конденсатора  $\tau = RC$  намного превышает время эксперимента. Сигнал с выхода усилителя подается на стрелочный мультиметр 5, работающий в режиме вольтметра постоянного тока. Таким образом, заряд шарика может быть определен по формуле:

$$Q = CU, \quad (15)$$

где  $C$  — емкость конденсатора 3,  $U$  — напряжение, считанное с мультиметра.

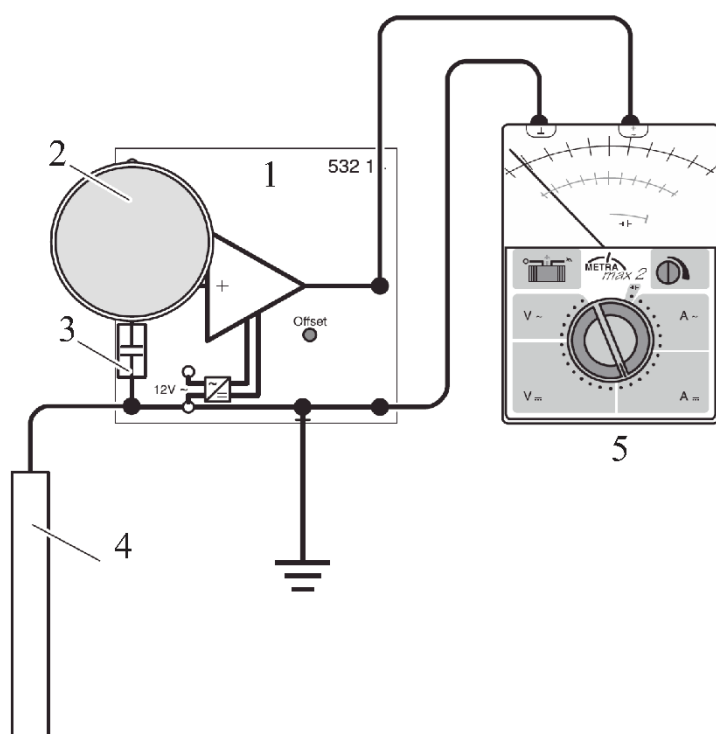


Рис. 3. Схема установки для измерения заряда: 1 — электрометрический усилитель, 2 — цилиндр Фарадея, 3 — конденсатор 10 нФ, 4 — соединительный стержень, 5 — мультиметр LD analog 20.

Питание электрометрического усилителя осуществляется сетевым адаптером с выходным напряжением 12 В (на рисунке не показан).

На рис. 4 показан внешний вид мультиметра. На его лицевой панели расположен стрелочный прибор с зеркальной шкалой и органы управления:

Балансировка усилителя производится потенциометром «Offset», шлицевая головка которого расположена напротив отверстия в корпусе прибора. Для устранения влияния экспериментатора на результаты измерений его тело также должно быть заземлено. Для этого предназначен соединительный стержень 4, который в ходе измерений следует держать зажатым в руке.



Рис. 4. Внешний вид мультиметра LD analog 20.

- переключатель типа шкалы, имеющий три положения — выключен, шкала с нулем по центру (красная), шкала с нулем слева (черная). Для измерений рекомендуется пользоваться последней шкалой как более точной. После окончания измерений необходимо перевести переключатель в положение «off»;

- переключатель типа входного сигнала (переменный (AC) / или постоянный (DC) ток (A) / или напряжение (V)) и диапазонов измерений. Для измерения постоянного напряжения необходимо установить переключатель в секторе DC/V, выбрав подходящий диапазон измерений, обеспечивающий наименьшую погрешность;

- подстройка положения нуля для красной шкалы (в работе не используется).

Входное сопротивление прибора составляет 10 МОм. Прибор имеет заявленный производителем класс точности 2, то есть относительная погрешность измерений составляет 2% от максимального значения, измеряемого в данном диапазоне работы прибора. Например, при диапазоне измерений 0–3 В абсолютная погрешность составляет  $3 \text{ В} \cdot 0,02 = 0,06 \text{ В}$ .

## 2.2. Постановка эксперимента. Методика и техника измерений

Для проверки применимости закона Кулона для взаимодействия заряженных проводящих сфер в данной работе предлагается решить следующие задачи:

1. установить линейную зависимость силы взаимодействия зарядов от обратного квадрата расстояния между ними;
2. установить линейную зависимость силы от величины одного из зарядов;
3. определить величину электрической постоянной, входящей в закон, и сравнить ее с истинным значением.

Задание 1. Для проверки закона обратных квадратов необязательно знать абсолютные величины взаимодействующих зарядов. Поэтому для этой цели достаточно использование установки, изображенной на рисунке 2. В ходе экспериментов в этой части работы вам предлагается измерить зависимости силы от расстояния для фиксированного заряда на одном шарике и ряда значений заряда на другом шарике (положительных и отрицательных). Поскольку мы предполагаем выполнение закона обратных квадратов, то для обработки данных будет удобно представить эти зависимости, откладывая по оси абсцисс величину  $1/r^2$ . Пример такой экспериментально полученной зависимости представлен на рис. 5. Видно, что линейная зависимость выполняется только на начальном участке, соответствующем расстояниям более 8–9 см. При меньших расстояниях закон обратных квадратов нарушается из-за явления электростатической индукции.

Таким образом, начальный участок на графике  $F(1/x^2)$  может быть аппроксимирован линейной функцией:

$$F = \frac{A}{r^2} + B, \quad (16)$$

где  $B$  — возможно ненулевой член, связанный со смещением нулевого значения у датчика силы. Величина  $A$  зависит от величин зарядов и согласно закону Кулона должна быть равна

$$A = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0}. \quad (17)$$

Шарики заряжаются с помощью высоковольтного источника. Величина заряда шарика задается напряжением на источнике и однозначно с ним связана. В результате выполнения этой части работы следует получить серию графиков  $F(1/x^2)$  и определить ряд значений  $A(q_1, q_2)$  для фиксированного значения одного заряда (например,  $q_2$ ) и различных значениях  $q_1$ . Абсолютные величины зарядов определяются во второй части работы.



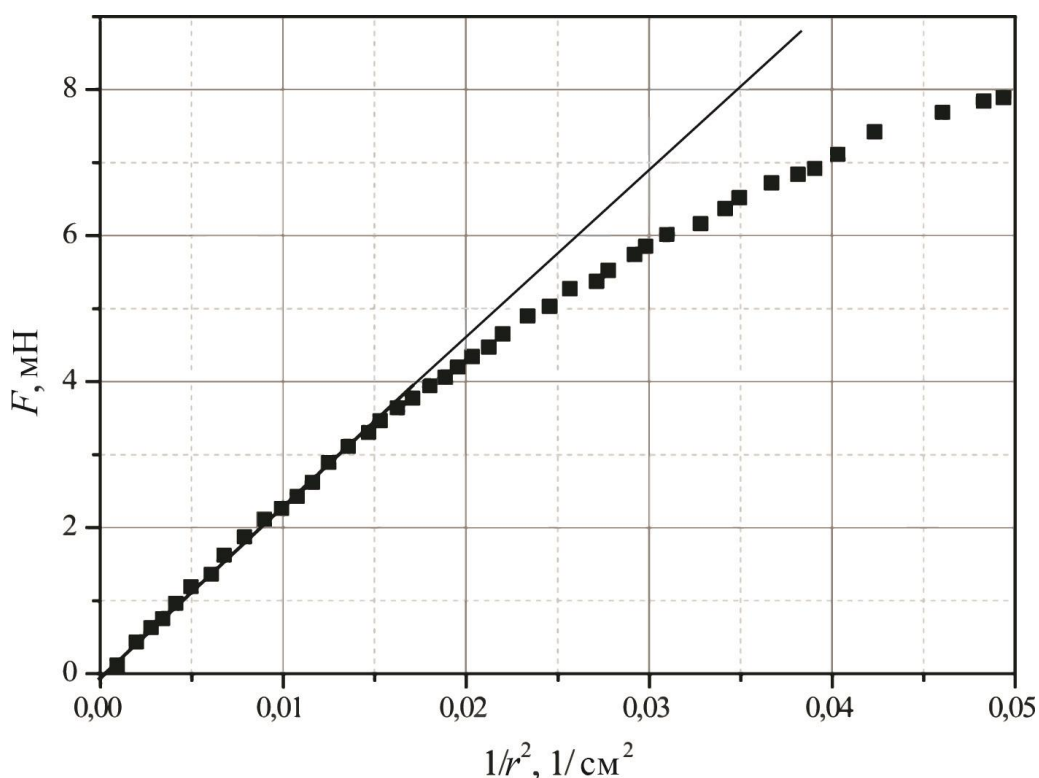


Рис. 5. Пример экспериментальной зависимости силы отталкивания одноименно заряженных шариков от обратного квадрата расстояния между их центрами.

Задание 2. Измерение зарядов шариков производится с помощью установки, представленной на рис. 3. Необходимо определить заряды шариков при значениях напряжения высоковольтного источника, использованных в первой части работы. В результате при фиксированном значении  $q_2$  может быть построена зависимость  $A(q_1)$ , которая согласно закону Кулона должна быть линейной:

$$A(q_1) = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0} q_1. \quad (18)$$

Задание 3. Величина коэффициента  $q_2/(4\pi\epsilon_0) \equiv \alpha$  при  $q_1$  в (18) определяется из угла наклона графика  $A(q_1)$ . Отсюда, используя измеренное значение заряда  $q_2$ , можно найти величину электрической постоянной:

$$\epsilon_0 = \frac{q_2}{4\pi\alpha}, \quad (19)$$

которую необходимо сравнить с истинным значением (2).

### 3. Техника безопасности по работе с приборами

Использование 25 кВ высоковольтного источника питания совместно с низковольтным оборудованием требует выполнения ряда требований безопасности при выполнении работы.

1. Хотя выходной ток высоковольтного источника не превышает 0,5 мА и не представляет опасности для здорового человека, заряд, накопленный на теле, может привести к болезненным ощущениям при разряде, а также к повреждению низковольтных измерительных и цифровых схем. В связи с этим при работе с высоковольтным источником питания необходимо обеспечить свое заземление, удерживая в руке заземленный соединительный стержень. Рекомендуется отказаться от выполнения работы людям с электрокардиостимуляторами, а также лицам, страдающим заболеваниями сердечно-сосудистой и центральной нервной системы.
2. Убедитесь в том, что напряжение на выходе высоковольтного источника равно нулю, прежде чем вносить изменения в электрическую схему экспериментальной установки. В том числе при изменении полярности выходного напряжения.
3. При проведении эксперимента следует исключить появление случайного контакта оголенного щупа высоковольтного кабеля с частями установки, соединительными кабелями, штекерами и гнездами. Кроме этого, необходимо обеспечить максимально возможное расстояние между высоковольтным кабелем и другими изолированными проводами, а также проводящими предметами и деталями установки.
4. Запрещается вынимать щуп высоковольтного кабеля из изолирующего стержня в салазковом штативе.
5. Всегда устанавливайте ручку регулировки высокого напряжения в крайнее левое положение перед включением высоковольтного источника.

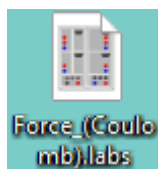
## 4. Порядок выполнения лабораторной работы

### 4.1. Измерение силы взаимодействия зарядов

В первой части предлагается провести измерения силы взаимодействия при различных величинах зарядов в зависимости от расстояния между ними.

#### *Подготовка к работе*

1. Для повышения точности производителем рекомендуется производить измерения силы не раньше чем через 30 минут после включения питания. Поэтому в первую очередь необходимо подать питание на сенсор CASSY-2. С него питание через интерфейсные кабели поступит на датчики силы и вращения. При появлении питания на сенсоре CASSY-2 должны засветиться красные светодиоды.
2. Проверьте правильность схемы электрических соединений в установке, приведенную на рис. 2. **Особое внимание уделите наличию и конфигурации заземления.**
3. Включите компьютер, если он был выключен.
4. На появившемся рабочем столе найдите и двойным нажатием на левую кнопку мыши откройте файл конфигурации лабораторной работы —



- “Force\_(Coulomb).labs”: . При этом запускается программа сбора и обработки экспериментальных данных CASSY Lab 2 с настройками, адаптированными для данной работы.
5. При старте программы автоматически открывается окно «CASSYs», которое следует закрыть. В результате активируются каналы измерений силы и перемещения, о чем можно судить по изменению цвета индикаторов, расположенных напротив соответствующих входов сенсора CASSY Lab 2, с красного на зеленый. Кроме этого, в окнах измерительных приборов «Force  $F_{A1}$ » и «Path  $S_{B1}$ » должны начать отображаться показания, снимаемые с соответствующих датчиков.

В случае если этого по какой-то причине не происходит, следует закрыть программу, отсоединить сетевой адаптер от сенсора на 10–15 секунд, подсоединить его обратно и снова запустить файл конфигурации. Если нештатная ситуация повторится — обратитесь за помощью к преподавателю или сотруднику лаборатории.

6. С помощью регулировочных винтов в штативе добейтесь горизонтального расположения продольной оси датчика силы и оси, вдоль которой измеряется сила (обозначена  $\leftarrow \rightarrow$ ).
7. Установите датчик силы по высоте таким образом, чтобы шарик, закрепленный в датчике, и шарик на каретке располагались на одном уровне.
8. Установите ограничительные зажимы на рельсе в крайних положениях.
9. Установите рельс таким образом, чтобы вертикальная плоскость, проходящая через его продольную ось, проходила также через центр шарика 1 и была перпендикулярна продольной оси датчика.
10. Установите датчик вращательного движения в положение, при котором горизонтальный участок нити будет направлен вдоль оси рельса.
11. Обратите внимание на то, чтобы при движении каретки вдоль всего рельса нить оставалась в натянутом состоянии.
12. Установите ближний к датчику силы упор на рельсе таким образом, чтобы шарик на каретке, прижатой к упору, слегка касался шарика на датчике силы.
13. Настройка датчика перемещения.

а) Нажмите правой кнопкой мыши на окно измерительного прибора «Path  $S_{B1}$ ». При этом в правой части экрана выпадает меню «Settings» с выделенным пунктом «Path  $S_{B1}$ » и расположенными ниже параметрами данного входа.

б) Установите диапазон измерений перемещения: Range 30 cm.

в) Проверьте правильность работы датчика перемещения. При увеличении расстояния между шариками значение, отображаемое в окне прибора «Path  $S_{B1}$ » должно возрастать. Если оно наоборот убывает, нажмите кнопку « $S \leftarrow \rightarrow S$ ».

г) Установите каретку в положение, при котором шарики слегка соприкасаются (для этого можно положить грузик на стол и придвинуть каретку к ранее

выставленному упору).

д) Установите начальное значение расстояния: нажмите кнопку «Correct»; в появившемся окне «Correct measured values» в поле «Target values» для параметра «Offset» введите расстояние между центрами шариков при их контакте (т.е. их диаметр) в сантиметрах — 3,8; сохраните изменения нажатием на кнопку «Correct offset» и закройте окно.

е) Задайте интервал между измерениями: Interval 200 ms.

ж) Остальные настройки оставьте без изменений.

#### 14. Настройка датчика силы.

а) Разрядив оба шарика с помощью заземленного соединительного стержня, разведите их на максимальное расстояние.

б) Откройте окно установок для датчика силы (нажмите правой кнопкой мыши на окне измерительного прибора «Force  $F_{A1}$ ») и установите следующие параметры:

- Range –10mN . . 10mN;
- В разделе «Record measured values» выберете пункт «Averaged values» и задайте период усреднение: over 100 ms.
- Interval 200 ms.

в) Нажмите кнопку автоматической установки нуля «→0←». После этого показания датчика силы должны флуктуировать вблизи нулевого значения.

15. Закройте окно «Setting». Теперь перед вами в окне программы должно остаться два поля (пока пустые) — слева таблица измеренных значений, справа график.

#### ***Зарядка шариков и измерение силы электростатического взаимодействия***

1. Включите тумблером высоковольтный источник питания. Убедитесь, что выходное напряжение равно нулю.

2. Разведите шарики на максимальное расстояние.

3. Проведите описанные ниже измерения при напряжении на высоковольтном источнике +25 кВ для зарядки шарика на датчике силы и

напряжениях  $-25$ ,  $-20$ ,  $-15$ ,  $-10$ ,  $-5$ ,  $0$ ,  $+5$ ,  $+10$ ,  $+15$ ,  $+20$ ,  $+25$  кВ для зарядки шарика на каретке.

4. Выберите знак заряда, который необходимо сообщить шарiku. Для получения положительного заряда соединяем высоковольтный провод с положительной клеммой источника, а отрицательную клемму с земляной (центральной). И наоборот.
5. Возьмите в одну руку заземленный соединительный стержень. Другой рукой возьмите изолирующий стержень с закрепленным в нем щупом высоковольтного кабеля и прикоснитесь концом щупа к шарiku на датчике силы. Не отрывая щупа от шарика, рукой со стержнем выставьте на высоковольтном источнике необходимое напряжение  $25$  кВ. Максимально быстро удалите щуп от шарика и тут же обнулите выходное напряжение на источнике. Дело в том, что вблизи острого конца щупа при больших напряженностях поля возникает коронный разряд, ионизирующий воздух, что приводит к стеканию заряда с шарика.
6. Проведите аналогичную процедуру с шариком на каретке, используя необходимое напряжение на источнике.
7. После зарядки шариков до желаемого потенциала необходимо насколько возможно быстро приступить к измерениям силы их взаимодействия. Это требование обусловлено тем, что заряд с шариков постепенно стекает. Скорость стекания определяется многими факторами, главные из которых: влажность и степень ионизации воздуха, загрязненность поверхности изолирующих стержней, величина заряда на шариках.

Для запуска измерений нажмите функциональную клавишу «F9», после чего начинайте перемещать шарик на каретке, приближая его к шарiku на датчике силы. При этом на графике и в таблице начнут отображаться текущие результаты измерений. Подберите скорость перемещения таким образом, чтобы на графике было достаточное для обработки количество точек. Рекомендуемая скорость перемещения  $\sim 1$  см/с. При достижении минимального расстояния остановите измерения, снова нажав клавишу «F9».

8. Разрядите шарики, коснувшись их заземленным стержнем, после чего его можно отложить.
9. Сохраните результаты измерений на жестком диске компьютера для дальнейшей обработки, нажав клавишу «F2» и выбрав желаемый путь и имя файла. Повторите измерения при других напряжениях.

## 4.2. Измерение заряда шариков

Вторая часть работы предполагает определение заряда шарика, который он приобретает при различных значениях потенциала относительно земли. То есть при значениях выходного напряжения высоковольтного источника, использованных для зарядки шариков:  $-25$ ,  $-20$ ,  $-15$ ,  $-10$ ,  $-5$ ,  $+5$ ,  $+10$ ,  $+15$ ,  $+20$ ,  $+25$  кВ.

1. Соберите схему, представленную на рисунке 3. **Обратите внимание на то, что электрометрический усилитель также должен быть заземлен!** Это можно сделать, соединив землю усилителя с заземленной клеммой высоковольтного источника питания.
2. Соедините высоковольтный кабель с клеммой требуемой полярности высоковольтного источника. Клемму противоположной полярности соедините с заземленной средней клеммой источника.
3. Установите изолирующий стержень в салазковом штативе с закрепленным в нем щупом высоковольтного кабеля таким образом, чтобы щуп и кабель находились на максимальном удалении от электрометрического усилителя и низковольтных соединительных проводов.
4. Включите питание усилителя и мультиметр.
5. Возьмите заземленный стержень в руку и удерживайте его в ходе всех дальнейших опытов по измерению заряда.
6. Снимите возможный избыточный заряд с цилиндра Фарадея кратковременным прикосновением к нему заземленным стержнем. При этом напряжение на выходе электрометрического усилителя должно обратиться в ноль. Однако, как правило, электрометрический усилитель требует подстройки смещения.

Подстройка осуществляется поворотом с помощью отвертки шлица потенциометра, расположенного за отверстием с надписью «offset» в корпусе усилителя. Необходимо добиться минимально возможного отклонения стрелки мультиметра от нулевого положения на самом маленьком диапазоне прибора (100mV).

7. После подстройки смещения переведите переключатель диапазонов в положение 10 В.
8. Включите высоковольтный источник и прикоснитесь к концу щупа высоковольтного кабеля металлизированным шариком, держа его за изолирующий стержень.
9. Выставьте на источнике необходимое напряжение из ряда значений, использованных в опытах по измерению силы.
10. Отсоедините шарик от щупа и тут же обнулите выходное напряжение источника.
11. Еще раз разрядите цилиндр Фарадея. Введите внутрь него шарик и коснитесь им дна цилиндра, после чего удалите шарик.
12. Измерьте напряжение на выходе усилителя, выбрав подходящий диапазон измерений. Запишите показания и выбранный диапазон.
13. Разрядите цилиндр Фарадея и убедитесь в равенстве нулю напряжения на выходе усилителя.
14. Для каждого напряжения рекомендуется провести не менее 4-х измерений заряда, повторяя пункты 9–13. Величина заряда шарика определяется по формуле (15).
15. Повторите измерения при других значениях напряжения высоковольтного источника. Обратите внимание, что при измерении отрицательных зарядов необходимо поменять полярность подключения мультиметра к выходу электрометрического усилителя. В конце работы выключите питание усилителя, высоковольтного источника и мультиметра.



## 5. Обработка результатов эксперимента, требования к оформлению отчета

1. Постройте графики зависимости силы взаимодействия от расстояния при различных потенциалах шариков в координатах  $F(1/r^2)$  по данным, сохраненным в программе CASSY Lab 2. Выделите на них линейные участки и проведите на них линейную аппроксимацию ( $F = Ax + B$ ) (см. (16)), определив набор значений  $A(q_1(U_1), q_2(U_2))$  при различных потенциалах шариков. Обработку можно проводить, используя возможности CASSY Lab 2, или в программе Origin, скопировав туда данные из таблицы CASSY Lab 2 (см. Приложение).
2. Определите значения зарядов и их погрешности при различных значениях напряжения высоковольтного источника. Процесс вычисления можно при желании автоматизировать, используя программу Excel.
3. Постройте зависимость величины заряда от потенциала шарика. Определите по нему емкость сферы относительно земли и сравните ее со значением для уединенной сферы такого же радиуса.
4. Постройте зависимость величины  $A(q_1, q_2)$  от  $q_1$  ( $q_2$  — заряд шарика на датчике силы, он неизменен) (см. (18)). Проведите её линейную аппроксимацию и определите величину коэффициента при  $q_1$ , а также его погрешность (рекомендуется делать в Origin).
5. Вычислите значение электрической постоянной  $\epsilon_0$  (см. (19)), оцените ее погрешность и сравните полученное значение с истинным. При вычислениях обратите внимание на то, что измерения расстояния в CASSY Lab 2 производятся в сантиметрах, а силы — в миллиньютонах.

По результатам работы составляется отчет, который должен содержать следующие пункты:

1. Цель работы, конкретная постановка задачи, априорные ожидания.
2. Схемы установок для измерения силы электростатического взаимодействия

и заряда проводников.

3. Необходимые расчетные формулы с указанием единиц измерения и расшифровкой всех введенных обозначений.
4. Процедуру проведения эксперимента, графики зависимости силы от обратного квадрата расстояния, таблицы первичных результатов измерений заряда.
5. Процедуру обработки экспериментальных данных. Графики зависимости заряда шарика от потенциала  $q(U)$ , коэффициента  $A$  от заряда  $q_1$ . Вычисление емкости сферы относительно земли по результатам экспериментов и уединенной сферы. Вычисление электрической постоянной  $\varepsilon_0$  с погрешностью.
6. Обсуждение результатов.
7. Выводы по работе.

## 6. Контрольные вопросы

1. Запишите закон Кулона в системе СИ.
2. Почему для опытов с крутильными весами Кулон использовал одноименные заряды?
3. Что такое принцип суперпозиции полей. В каких случаях он может нарушаться?
4. Могут ли отталкиваться разноименно заряженные проводники? Могут ли притягиваться одноименно заряженные проводники?
5. Что такое напряженность электрического поля?
6. Что такое потенциал?
7. Чему равен потенциал заряженной сферы?
8. Что такое емкость уединенного проводника и конденсатора? В чем она измеряется?
9. Чему равна емкость уединенной сферы?
10. Для чего необходимо применение в работе электрометрического усилителя?
11. Что такое класс точности прибора?
12. Почему при проведении экспериментов необходимо держать заземлённый соединительный стержень?

## Список рекомендованной литературы и справочные данные

1. Д.В. Сивухин, *Общий курс физики*, т. 3, Москва: «Наука», 1983, 704 с.
2. С.Р. Филонович, *Судьба классического закона*, Библиотечка «Квант», вып. 79, Москва: «Наука», 1990, 240 с. [http://ilib.mccme.ru/djvu/bib-kvant/kvant\\_79.htm](http://ilib.mccme.ru/djvu/bib-kvant/kvant_79.htm)
3. *J. Lekner*, Electrostatics of two charged conducting spheres, Proc. R. Soc. A (2012) 468, 2829–2848
4. Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс, *Фейнмановские лекции по физике*, т.5, Москва: «Мир», 1977, с. 124–126.

## Приложение. Построение графиков в пакете Origin

Построение графиков в пакете Origin 8.0, используя данные, полученные в результате измерений в CASSY Lab 2, производится следующим образом:


1. Скопировать данные из таблицы в CASSY Lab: Table → Copy table.
2. Запустить программу OriginPro 8.0
3. В таблице Book1 выделить ячейку Comments-A(X)
4. Вставить данные из буфера обмена: Ctrl-V

**Если необходимо построить зависимость не от X, а от  $1/X^2$ :**

5. Добавить столбец: щелкнуть правой кнопкой мыши по заголовку столбца B(Y), и в выпавшем меню выбрать пункт «Insert». При этом будет вставлен пустой столбец C1(Y) между столбцами A(X) и B(X).
6. Задать значение в столбце C1(Y): выделить столбец C1(Y), щелкнув левой кнопкой мыши на заголовке столбца; нажать комбинацию Ctrl-Q; ввести в появившемся окне «Set Values» формулу «1/col(a)^2» и нажать кнопку «OK».
7. Поменять тип столбца: щелкнуть правой кнопкой мыши по заголовку столбца C1(Y), и в выпавшем меню выбрать пункт «Set As» → «X».
8. Построить график в виде точек: выделить столбцы C1(X2) и B(Y2); выбрать в строке команд «Plot» → «Symbol» → «Scatter».

Данные в таблицу можно также вводить вручную и строить графики аналогичным образом.

**Линейная аппроксимация данных:**

1. С помощью инструмента «Data Selector»  при активном окне с графиком выберите интервал, на котором необходимо провести аппроксимацию. Границы интервала перемещаются вдоль графика перетаскиванием мышью. Выбор границ фиксируется нажатием клавиши «Enter»
2. Для запуска аппроксимации выберите в строке команд «Analysis» → «Fitting» → «Fit Linear» → «Open Dialog» → «OK». После этого на графике появится отрезок линейной аппроксимации и таблица с коэффициентами, вычисленными программой. Открывшееся окно закрываем, нажав кнопку «Cancel».