



Санкт-Петербургский  
государственный  
университет

Научный парк



*Образовательный ресурсный центр по направлению физика  
Первая физическая лаборатория*

**Т.В. Белопольская, Д.Ю. Иванов**

# **ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ОТ ЭЛЕКТРОДОВ ПРОСТОЙ ФОРМЫ**

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

**№ 25**

Санкт-Петербург

2014

УДК 537.218

*Рецензенты:* к. ф.-м. наук, доцент И.Р. Крылов, к. ф.-м. наук, доцент В.И. Яхонтова, к. ф.-м. наук, доцент М.В. Комарова

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. Некоторые вопросы теории .....	6
1.1. Закон Кулона. Принцип суперпозиции .....	6
1.2. Напряжённость электрического поля .....	8
1.3. Потенциал .....	9
1.4. Связь напряжённости и потенциала электрического поля .....	11
1.5. Теорема Гаусса .....	11
1.6. Электроёмкость. Поле и ёмкость плоского конденсатора .....	15
2. Методика проведения эксперимента .....	19
2.1. Описание экспериментальной установки .....	19
2.2. Постановка эксперимента. Методика и техника измерений.....	20
3. Техника безопасности по работе с приборами .....	21
4. Порядок выполнения лабораторной работы.....	22
5. Обработка результатов эксперимента.....	26
6. Контрольные вопросы.....	27
Список рекомендованной литературы и справочные данные .....	28
Приложение 1. Теорема Гаусса и показатель степени в законе Кулона .....	29
Приложение 2. Принцип действия измерителя напряжённости электрического поля .....	30

## Введение

К настоящему моменту известны четыре фундаментальных взаимодействия: гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое. В гравитационном поле Земли проходит вся наша жизнь. Эффекты сильного и слабого взаимодействий относятся исключительно к микромиру и в окружающей нас реальности, если не считать влияния фонового (и не только) радиоактивного излучения, мы практически с ними дела не имеем. В то же время электромагнитную природу имеют молекулярные, биологические, химические и атмосферные процессы, а также практически все силы, за исключением тяготения, встречающиеся в нашей повседневной жизни. Источником электромагнитного поля является электрический заряд. В той системе отсчёта, где заряд неподвижен, он создаёт электростатическое поле.

Притяжение / отталкивание наэлектризованных тел известно ещё с древности. Слово «электричество» по-гречески означает янтарь. Около 600-х годов до нашей эры Фалес Милетский, по-видимому, первым обнаружил, что янтарь, если его потереть, притягивает к себе легкие тела [1]. В XVII–XVIII веках изучением электричества занимались многие выдающиеся исследователи: в Германии Отто фон Герике (1602–1686) создал первую электрическую машину; во Франции Шарль Дюфе (1698–1739) открыл два рода электрического заряда: «стеклянный» и «смоляной» (сейчас их называют положительным и отрицательным); в Англии Джозеф Пристли (1733–1804) высказал, исходя из своих опытов, догадку о том, что электрические силы подчиняются закону «обратных квадратов», а Генри Кавендиш (1731–1810) экспериментально установил целый ряд электрических явлений, позже и независимо от него открытых другими исследователями. В частности, в одной из своих работ (1773) он за 12 лет до Кулона описал закон взаимодействия электрических зарядов<sup>1</sup>. В Италии Алессандро Вольты (1745–1827) создал первый в мире химический источник тока («вольтов столб»), а Луиджи Гальвани (1737–1798) провёл классические опыты, которые сделали его отцом электрофизиологии. В Америке Бенджамин Франклин

---

<sup>1</sup> Большинство работ Кавендиша оставались неизвестными до тех пор, пока Дж. К. Максвелл не опубликовал (1879) его исследования, хранившиеся в виде рукописей в библиотеке кембриджского университета.

(1706–1790) изобрёл молниеотвод, в России Франц Эпинус (1724–1802) опубликовал (1759) «Опыт теории электричества и магнетизма» [2] — труд, который принёс ему мировую славу. И, наконец, в 1785 г. французский военный инженер и член Парижской академии наук Шарль Огюстен де Кулон (1736–1806) установил закон, который теперь носит его имя (поучительную историю этого открытия можно с интересом прочитать в [3]).

Закон Кулона и принцип суперпозиции — это экспериментальная основа электростатики, всё остальное — следствия, которые могут быть получены теоретически. Ричард Фейнман (1918–1988), один из создателей квантовой электродинамики<sup>2</sup> и автор знаменитых лекций, как всегда тонко, заметил: «все предсказания электростатики следуют из двух её законов. Но одно дело высказать эти вещи математически, и совсем другое — применять их с лёгкостью и с нужной долей остроумия» [4].

Когда это удаётся сделать, то электростатика позволяет объяснить строение атомов и молекул; биохимические реакции, определяющие все жизненные процессы, и влияние лекарств на них; понять природу пьезо-, сегнето-, трибо-, атмосферного и животного электричества; создать такие методы исследования и диагностики, как электрокардиография и электроэнцефалография; изобрести не только приборы для их реализации, но и электрофотографию (ксероксы, факсы и принтеры) и многое другое (см., например, [5]). Современные исследования показывают огромное значение электростатики для понимания многих процессов живой и неживой природы.

В этой лабораторной работе на примере поля плоского конденсатора предлагается ознакомиться с основными понятиями электростатики, такими как напряжённость и потенциал электрического поля, электроёмкость проводников, и исследовать связывающие их физические закономерности.

---

<sup>2</sup> Нобелевская премия по физике за 1965 год.

# 1. Некоторые вопросы теории

## 1.1. Закон Кулона. Принцип суперпозиции

Кулон долго и планомерно изучал деформацию кручения нитей из различных материалов, изобрёл крутильные весы (рис. 1), с помощью которых и установил свой закон, согласно которому *сила взаимодействия двух неподвижных зарядов прямо пропорциональна произведению их модулей и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними*:

$$F_{1,2} = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r_{1,2}^2}. \quad (1)$$

На основании известного из опыта явления электризации возникает не только само понятие о заряде, но и тот факт, что заряды бывают двух знаков — положительные и отрицательные. Одноимённые заряды отталкиваются, а разноимённые — притягиваются друг к другу. Чтобы закон (1) учитывал это свойство зарядов автоматически, ему нужно придать, как это принято, векторную форму:

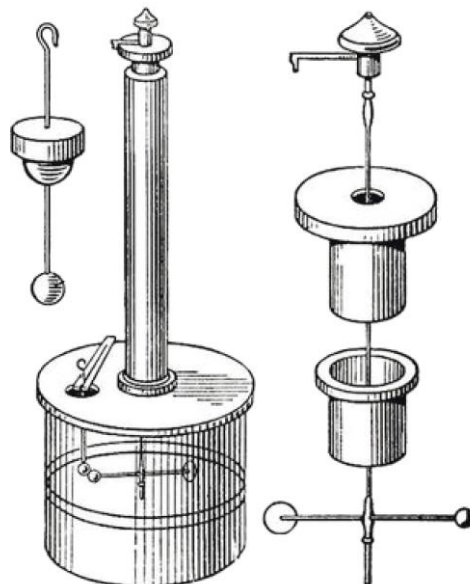


Рис. 1. Крутильные весы Кулона [6]

$$\vec{F}_{1,2} = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r_{1,2}^2} \cdot \frac{\vec{r}_{1,2}}{r_{1,2}}, \quad (2)$$

где  $\vec{r}_{1,2}/r_{1,2}$  — единичный радиус-вектор, направленный от первого заряда ко второму, а  $\vec{F}_{1,2}$  — сила, действующая со стороны первого заряда на второй.

В системе СГС, в которой единица измерения заряда определяется из закона Кулона, коэффициент пропорциональности  $k$  в формулах (1 и 2) равен единице. В СИ одной из основных единиц является сила тока — *ампер*, поэтому в ней  $k$  становится размерным, а закон Кулона приобретает следующий вид:

$$\vec{F}_{1,2} = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{1,2}^2} \cdot \frac{\vec{r}_{1,2}}{r_{1,2}}, \quad (3)$$

здесь сила  $\vec{F}_{1,2}$  измеряется в ньютонах, заряд  $q$  — в кулонах ( $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$ ), расстояние  $r$  — в метрах,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  ( $\text{Ф}$  = фарад — единица измерения ёмкости, подробнее см. п. 2.2.1.).

Для того, чтобы расстояние между зарядами могло быть определено однозначно, собственные размеры заряженных тел должны быть малы по сравнению с ним. Так возникает понятие *точечного заряда* — модели, близкой к приближению материальной точки в механике.

Кроме того, нужно определить, как поступать, если количество зарядов больше двух и / или они не точечные. В обоих случаях проблема решается с помощью установленного экспериментально *принципа суперпозиции*, или принципа независимого действия сил, содержание которого сводится к двум утверждениям:

- сила взаимодействия двух точечных зарядов не изменяется в присутствии других зарядов;
- сила, действующая на точечный заряд со стороны  $n$  других точечных зарядов, равна сумме сил, действующих на него со стороны каждого из них (см. рис. 2, где  $n = 3$ ).

В случае взаимодействия не точечных зарядов их следует мысленно разбить на такие части, каждая из которых могла бы рассматриваться как точечный заряд, после чего задача сведётся к тому, что рассмотрено, что позволит и здесь применить принцип суперпозиции.

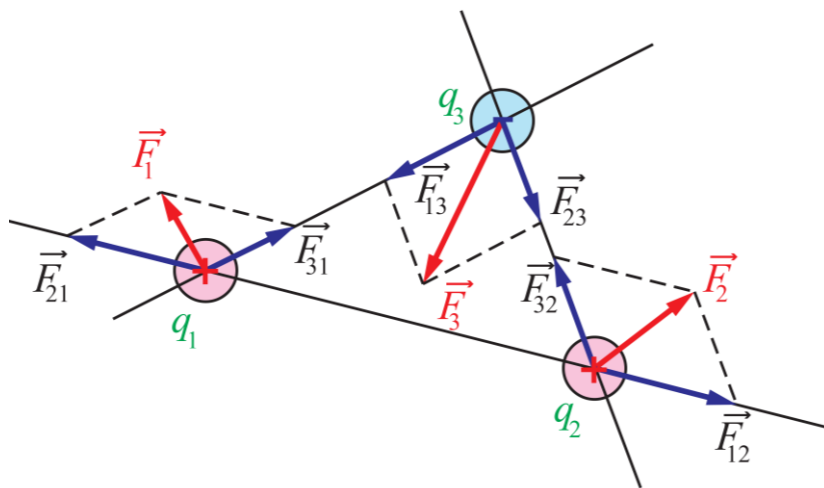


Рис. 2. Схема принципа суперпозиции для 3-х зарядов

Возможность применения принципа суперпозиции существенно зависит от среды. Он абсолютно точен в вакууме и лишь в качестве некоторого приближения — в сплошных средах. Если этот принцип в среде выполняется с хо-

рошей точностью, она называется *линейной*, если же реакция среды на внешнее поле такова, что линейность отклика нарушается (например, в сегнетоэлектриках), то о принципе суперпозиции говорить не имеет смысла [7].

## 1.2. Напряжённость электрического поля

Пусть имеется два заряда  $q_1$  и  $q_2$ . Поместим заряд  $q_1$  в начало координат. Меняя величину заряда  $q_2$  (для определённости — положительного), заметим, что действующая на него сила будет меняться пропорционально его величине (см. формулы (1)–(3)). В таком случае удобно ввести в рассмотрение силу, действующую на единичный положительный заряд, назвав её *напряжённостью* электрического поля, создаваемого зарядом  $q_1$ :

$$\vec{E}_1 = \frac{\vec{F}_{2,1}}{q_2} = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_{1,2}^2} \cdot \frac{\vec{r}_{1,2}}{r_{1,2}}. \quad (4)$$

Иными словами, заряд  $q_1$  создаёт поле, а заряд  $q_2$ , который можно назвать *пробным*, испытывает на себе его действие. Каким критериям должен отвечать пробный заряд? Это должен быть точечный (по определению), положительный (по договорённости) заряд, малый по величине настолько, чтобы с заранее заданной точностью можно было пренебречь вызываемым им механическим возмущением исследуемой системы зарядов [7].

До работ Фарадея (1791–1867) такой способ рассуждений был просто удобным представлением закона Кулона. При этом молчаливо предполагалось, что заряды действуют друг на друга без материальных посредников, через пустоту, на любом расстоянии, мгновенно передавая воздействие друг на друга. Такая точка зрения получила название *дальнодействия*. Противоположная ей концепция *близкодействия*, введённая в науку Фарадеем, выводила электрическое поле в ряд фундаментальных понятий. Согласно этой концепции, взаимодействия передаются с помощью особых материальных посредников и с конечной скоростью. В случае электромагнитных взаимодействий таким посредником является электромагнитное поле, а скорость равна скорости света. Для статического случая обе концепции, различаясь по существу, приводят к одинако-



вым практическим результатам.

В соответствии с (4) формулу для напряжённости электрического поля точечного заряда  $q$  можно представить в таком виде:

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^3} \cdot \vec{r}. \quad (5)$$

Для  $n$  точечных зарядов вектор напряжённости электрического поля (часто говорят, просто *электрическое поле*) находят в соответствии с принципом суперпозиции:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^{i=n} \vec{E}_i, \quad (6)$$

где  $\vec{E}_i$  определяется по формуле (5).

Единица измерения напряжённости электрического поля определяется, исходя из формулы (4):  $E = 1\text{Н/Кл}$ , однако в СИ её обычно записывают через другие единицы:  $E = 1\text{В/м}$  (подробнее см. п. 2.2.2.).

### 1.3. Потенциал

Кулоновская сила является примером *центральной силы*, т.е. такой силы, линия действия которой при любом положении тела, к которому она приложена, проходит через некоторую определённую точку, называемую центром силы. Для показанных на рис. 2 трёх зарядов таким центром силы может быть любой из них для двух оставшихся.

Кроме кулоновской, центральными являются гравитационная и упругая силы. Известно, что всякая центральная сила — сила консервативная, т.е. её работа не зависит от величины и формы пути, а определяется только положением начальной и конечной точек перемещения.

Покажем, что работа по перемещению пробного заряда  $q$  из точки (1)

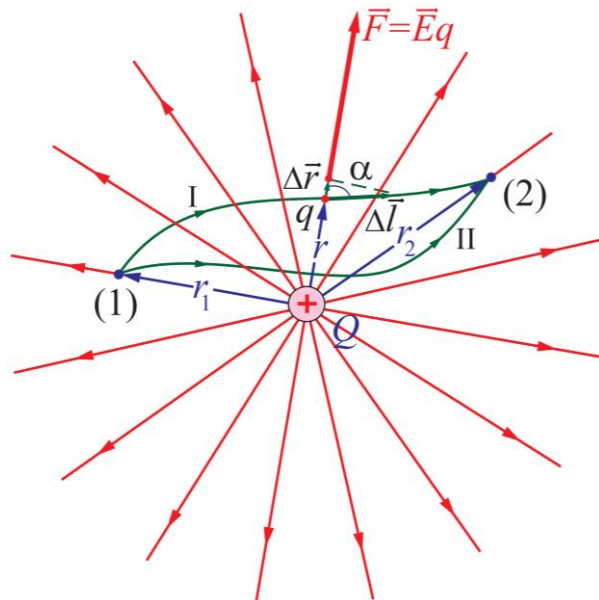


Рис. 3. Работа по перемещению заряда в электростатическом поле.

в точку (2) (рис. 3) в электростатическом поле заряда  $Q$  действительно не зависит от того, по какому пути (I или II) она совершается:

$$\begin{aligned} A_{1,2} &= \int_1^2 \vec{F} d\vec{l} = \int_1^2 F \cos \alpha dl = \int_1^2 F dr = q \int_1^2 E dr = \\ &= \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \int_1^2 \frac{dr}{r^2} = q \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Формула (7), кроме того, что она подтверждает независимость работы по перемещению заряда в электростатическом поле от вида траектории, даёт возможность ввести новую физическую величину — потенциал поля, и записать работу по перемещению заряда в этом поле как

$$A_{1,2} = q(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (8)$$

Сравнивая два последних выражения, для потенциала поля точечного заряда  $Q$  получим

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (9)$$

Если поле создаёт не один, а множество зарядов, то потенциал результирующего поля находится по принципу суперпозиции:

$$\varphi = \sum_i \frac{Q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i}, \quad (10)$$

где  $r_i$  — расстояние от заряда  $Q_i$  до точки пространства, в которой определяется потенциал  $\varphi$ . Однако, в отличие от напряжённости поля (6), потенциал — величина скалярная (10) и складывается алгебраически.

Потенциал, как и потенциальная энергия, определён с точностью до произвольной постоянной. Обычно эту постоянную выбирают равной нулю на бесконечности, тогда потенциал данной точки поля можно определить как работу поля по перемещению единичного положительного заряда из этой точки в бесконечность. Физический смысл, как показывает уравнение (8), имеет только разность потенциалов.

Единица измерения потенциала в СИ — *вольт*,  $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ Кл}$ .

## 1.4. Связь напряжённости и потенциала электрического поля

Из уравнения (8) в предположении бесконечно малого перемещения  $d\vec{l}$  и с учётом того, что  $dA = \vec{F}d\vec{l} = q\vec{E}d\vec{l}$ , получим:

$$\vec{E}d\vec{l} = -d\varphi. \quad (11)$$

Записав векторы  $\vec{E}$  и  $d\vec{l}$  в декартовой системе координат:  $\vec{E} = \vec{i}E_x + \vec{j}E_y + \vec{k}E_z$  и  $d\vec{l} = \vec{i}dx + \vec{j}dy + \vec{k}dz$ , преобразуем уравнение (11) к виду:  $E_x dx + E_y dy + E_z dz = -d\varphi$ . Откуда  $E_\alpha = \partial\varphi/\partial\alpha$ , где  $\alpha = x, y, z$ , тогда окончательно получим:

$$\vec{E} = -\left(\vec{i} \frac{\partial\varphi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial\varphi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) \equiv -\overrightarrow{\text{grad}}\varphi \equiv -\vec{\nabla}\varphi. \quad (12)$$

Напряжённость поля равна градиенту потенциала с обратным знаком.

Если в каждой точке пространства, заполненного электрическим полем, задать значения потенциала, то получим скалярное поле, а если задать вектор напряжённости — векторное поле. Уравнение (12) показывает, что для того, чтобы перейти от скалярного поля к векторному, на него нужно подействовать *дифференциальным векторным оператором*:

$$\overrightarrow{\text{grad}} \equiv \vec{\nabla} \equiv \left(\vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}\right). \quad (13)$$

Градиент скалярной функции — вектор, указывающий направление её наискорейшего роста. Термин и обозначение «grad» ввёл в математику Максвелл (1873). Символ  $\nabla$  (перевёрнутая дельта ( $\Delta$ )) принадлежит основателю векторного анализа В. Гамильтону (1853), а его название «на́бла» ( $\nu\alpha\beta\lambda\alpha$  — арфа, древнегреч.) — О. Хевисайду, который, помимо многого другого, привёл оригинальные результаты Максвелла к современному виду.

## 1.5. Теорема Гаусса

Графически электрическое поле удобно представлять силовыми линиями — кривыми, касательные к которым указывают направление вектора напряжённости поля в каждой точке (рис. 4). Величину поля даёт их густота,

которую можно определить как число линий, пересекающих площадку единичной площади, расположенную нормально к силовым линиям. Из рис. 4 видно, что  $|\vec{E}_1| > |\vec{E}_2| > |\vec{E}_3|$ . Силовые линии (рис. 5) начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных, нигде (кроме как на самих зарядах) не пересекаются и всегда перпендикулярны заряженной поверхности<sup>3</sup>. Может показаться, что точечный заряд (рис. 5) должен быть сопряжён с невообразимо большим числом силовых линий. Однако можно договориться, чтобы заряду в 1 Кл соответствовало  $1/\epsilon_0$  количество силовых линий (это число, конечно, очень большое, но вполне определённое).

Карл Гаусс (1777–1855), названный ещё при жизни «королём математиков», заметил, что полное число силовых линий, пронизывающих замкнутую поверхность, пропорционально заряду, находящемуся внутри неё. Это положение составляет смысл теоремы Гаусса, которая, являясь по сути эквивалентом закона Кулона, обладает большей общностью и входит в число основных законов электродинамики (уравнений Максвелла).

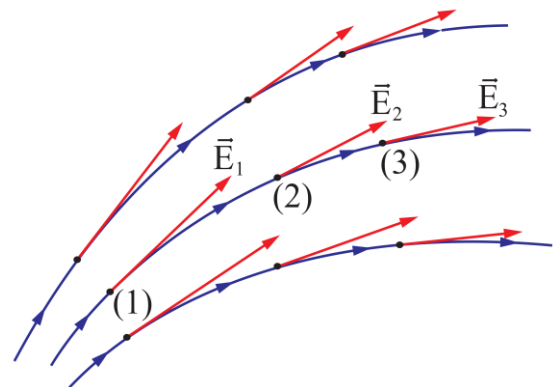


Рис. 4. Силовые линии электрического поля

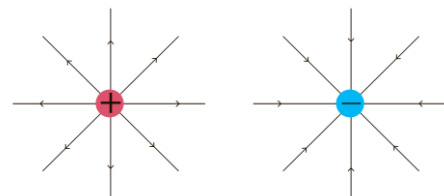


Рис. 5. Силовые линии поля точечных зарядов

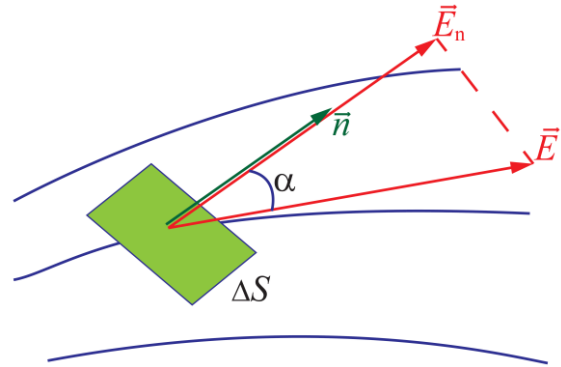
Сосчитаем, исходя из определения силовых линий, их число  $\Delta N$ , пронизывающее произвольную площадку  $\Delta S$ , расположенную под произвольным углом  $\alpha$  к ним (рис. 6):  $\Delta N = E_n \Delta S = E \Delta S \cos \alpha = \vec{E} \Delta \vec{S}$ ;  $\Delta \vec{S} = \Delta S \cdot \vec{n}$ . Переходя, как обычно, к пределу и затем интегрируя, получим

$$N = \int_S \vec{E} d\vec{S}. \quad (14)$$

Отметим, что электростатика получила своё развитие значительно позже

<sup>3</sup> Попробуйте сами придумать объяснение этому свойству силовых линий электростатического поля.

гидродинамики, поэтому многие математические понятия она позаимствовала у своей предшественницы. Так, если вместо вектора  $\vec{E}$  под интегралом в (14) подставить вектор скорости  $\vec{v}$  несжимаемой жидкости, движущейся, например, в трубе, то получим её объём, проходящий через сечение трубы в единицу времени, называемый в гидродинамике *поток*ом.



В теории поля это понятие обобщается на поле любого вектора. Таким образом,  $\int_S \vec{E} d\vec{S}$  — это поток вектора  $\vec{E}$  через поверхность  $S$ . В этом случае интеграл (14) вместо  $N$  обозначают через  $\Phi_E$ , индекс указывает на тип векторного поля, для которого рассчитывается поток.

Используя модель силовых линий, покажем, что теорема Гаусса действительно верна. Поместим положительный точечный заряд в центр сферической поверхности (рис. 7а) и рассчитаем поток вектора  $\vec{E}$  через неё:

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E dS = E \oint_S dS = ES = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \cdot 4\pi R^2 = \frac{q}{\epsilon_0}. \quad (15)$$

Преобразование после второго знака равенства возможно потому, что  $\vec{E} \uparrow\uparrow d\vec{S}$  в любом месте сферической поверхности, а после третьего — потому, что на ней  $E = \text{const}$ .

Теперь попробуем избавиться от всех ограничений. Пусть в центр помещён не один заряд, а несколько. Тогда понятно, что каждый из них будет связан со своей системой силовых линий, их общее число (а значит, и поток) возрастет и будет определяться суммой зарядов (принцип суперпозиции верен и здесь).

Сместим заряд от центра сферы (рис. 7б). Видно, что полное число линий, пронизывающих поверхность, при этом не изменится. Значит вычисленный поток не зависит от положения заряда внутри сферической поверхности. Рисунок 7в показывает, что и от требования сферичности поверхности можно отказаться и выбрать поверхность любой формы.

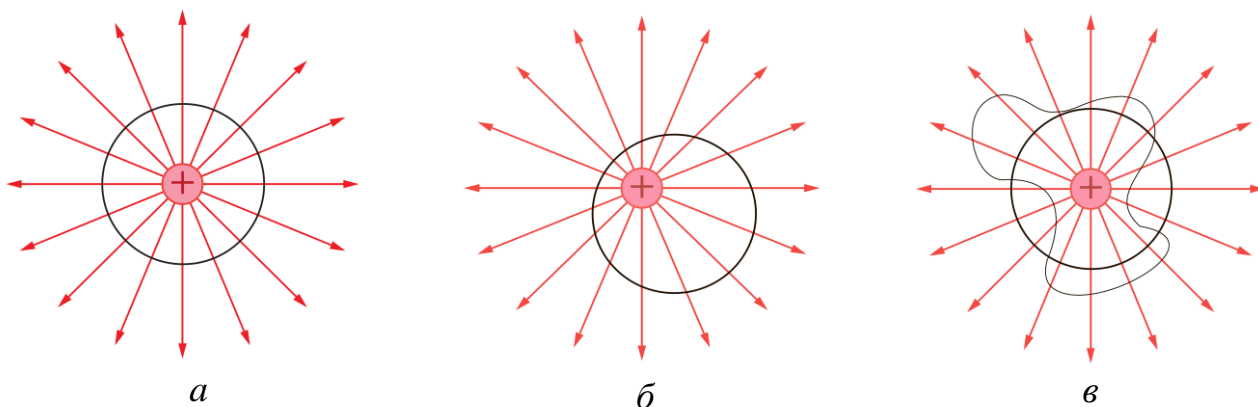


Рис. 7. К доказательству теоремы Гаусса

В окончательном виде теорема Гаусса формулируется следующим образом: поток вектора напряжённости электростатического поля через любую замкнутую поверхность равен сумме зарядов, охватываемых этой поверхностью, делённой на  $\epsilon_0$ :

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{\sum_i q_i}{\epsilon_0}. \quad (16)$$

Рисунок 8 иллюстрирует две особенности, связанные с вычислениями по формуле (16). Заряд, находящийся вне замкнутой поверхности, не вносит своего вклада в поток через неё. Видно, что силовые линии либо вообще не пронизывают поверхность, либо пронизывают её дважды (при более сложной форме поверхности — чётное число раз), в таком случае суммарный поток равен нулю. Вторая особенность объясняет, почему вычисление по теореме

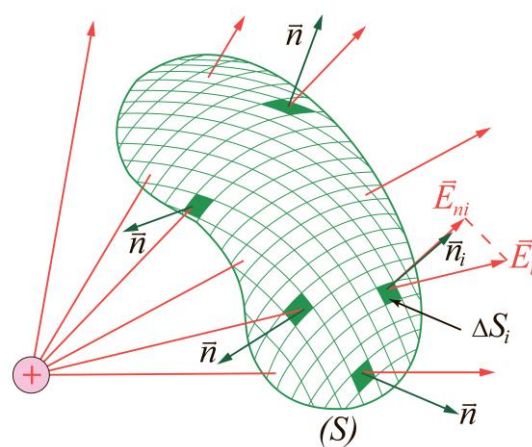


Рис. 8. К понятию «поток вектора»

Гаусса не потока, а напряжённости поля, сопряжено в общем случае с огромными математическими сложностями. Видно, что значения вектора  $\vec{E}$  и угла между ним и внешней нормалью в разных точках произвольной поверхности меняются произвольным образом, поэтому непосредственно вычислить интеграл  $\oint_S \vec{E} d\vec{S}$ , как правило, не удаётся.

Этих трудностей удаётся избежать для плоской, цилиндрической и сфери-

ческой симметрии расположения зарядов, создающих поле, поскольку только в этом случае удаётся выбрать такую замкнутую поверхность, одни части которой перпендикулярны, а другие (если имеются) — параллельны силовым линиям. Для этих типов симметрии (или когда отличием от неё можно пренебречь) интеграл  $\oint_S \vec{E} d\vec{S}$  легко вычисляется, и тогда с помощью теоремы Гаусса можно по найденному потоку рассчитать напряжённость поля.

Уравнение (11), проинтегрированное по замкнутому контуру, позволяет к теореме Гаусса добавить второе важнейшее свойство электростатического поля — его потенциальность:

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = 0. \quad (17)$$

Интегралы такого типа называют *циркуляцией вектора* (название также пришло из гидродинамики). Все векторные поля, циркуляция которых по замкнутому контуру равна нулю, поля потенциальные, в противном случае — вихревые, как например, магнитное поле.

Поток и циркуляция вектора — основные понятия теории электромагнитного поля, именно их свойства для электрического и магнитного полей и описываются уравнениями Максвелла.

## 1.6. Электроёмкость. Поле и ёмкость плоского конденсатора

**Электроёмкость.** Рассмотрим два проводника (А и Б) произвольной формы (рис. 9). Одним из них может служить Земля. Если один из проводников зарядить положительным зарядом  $Q$ ,

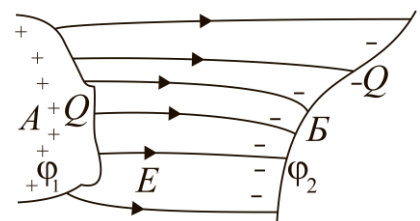


Рис. 9. К понятию электроёмкости проводников

то на другом индуцируется заряд противоположного знака, между ними возникает электрическое поле с напряжённостью  $E$  и разностью потенциалов (напряжением)  $\phi_1 - \phi_2 = U$ . Опыт показывает, что если взаимное расположение проводников и среды между ними не меняются, то и отношение величины заряда к разности потенциалов (напряжению) для них останется постоянным. Этот экспериментальный факт позволяет ввести но-

вую физическую величину — *ёмкость* (или, кратко, ёмкость)  $C$ :

$$C = Q/U = \text{const.} \quad (18)$$

Важно отметить, что ёмкость проводников зависит только от их геометрии и диэлектрических свойств среды между ними и не зависит ни от заряда, ни от разности потенциалов (см. ниже формулы (21) и (22)).

Единицей ёмкости служит *фарад* (Ф) — 1 фарад равен ёмкости конденсатора<sup>4</sup>, для которого заряд 1 кулон создаёт между его обкладками напряжение 1 вольт. 1 фарад — единица очень большая. Так, например, ёмкость Земли, если считать её уединённым шаром (что практически соответствует действительности), всего  $C \approx 0,7 \cdot 10^{-3}$  Ф — меньше одного миллифарада. Ёмкости порядка пикофарада используются как корректирующие в высокочастотных цепях, а порядка миллифарада — в сглаживающих фильтрах выпрямителей.

В рассмотренном примере (рис. 9) заряды обоих проводников были одинаковыми по величине. Это возможно только в том случае, когда все силовые линии, возникшие на зарядах проводника А, замыкаются на проводнике Б. Однако, если, кроме указанных проводников, в их ближайшем окружении находятся другие тела, такого равенства может и не быть — часть линий замкнётся на этих телах, и задача определения ёмкости существенно усложнится. Более простой задачей является вычисление ёмкости уединённых или близко расположенных проводников — простейших конденсаторов удачной геометрии: плоских, цилиндрических и шаровых.

**Поле и ёмкость плоского конденсатора.** Алгоритм решения задачи, состоящей в определении ёмкости конденсатора «хорошей» формы, можно представить следующим образом: по заданной геометрии зарядов, применяя теорему Гаусса, находим напряжённость поля  $E$ , затем, интегрируя уравнение (11), получаем разность потенциалов между обкладками конденсатора как функцию заряда. И, наконец, вычисляем ёмкость конденсатора по формуле (18).

---

<sup>4</sup> Два близко расположенных изолированных проводника.



Как это делается, покажем на примере плоского конденсатора, исследованию поля в котором и посвящена

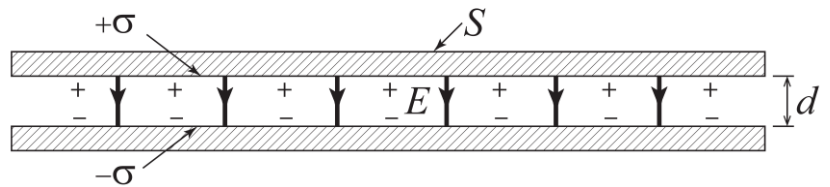


Рис. 10. Поле плоского конденсатора

лабораторная работа. Конденсатор состоит из двух параллельно расположенных пластин, площадь каждой из которых  $S$ , а расстояние между ними  $d$  (рис. 10). На каждую его обкладку помещены заряды, одинаковые по величине, но разных знаков, с поверхностной плотностью  $\sigma = \pm q/S$ . Заряд каждой пластины плоского конденсатора создаёт свое собственное поле  $E_1$ . Внутри конденсатора эти поля, складываясь, усиливают, а вне — уничтожают друг друга. Удобно поэтому рассмотреть поле одной его обкладки, а затем удвоить его:  $E = 2E_1$ .

В идеализированном варианте рассматривается бесконечная равномерно заряженная плоскость, часть которой изображена на рис. 11. Силовые линии, как уже было отмечено, всегда перпендикулярны заряженной поверхности.

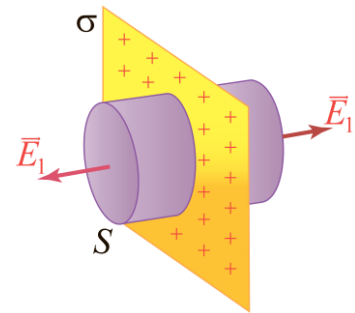


Рис. 11. К вычислению поля заряженной плоскости

Поэтому в данном случае выбор замкнутой поверхности для теоремы Гаусса прост — подойдёт любая фигура, боковая поверхность которой параллельна силовым линиям, а основание — перпендикулярно. В частности, такой фигурой может быть цилиндр (рис. 11).

Найдём напряжённость поля, используя теорему Гаусса (16),

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E}_1 d\vec{S} = 2 \int_{S_{\text{осн}}} \vec{E}_1 d\vec{S} + \int_{S_{\text{бок}}} \vec{E}_1 d\vec{S} = 2E_1 S_{\text{осн}} = \frac{q}{\epsilon_0} = \frac{\sigma S_{\text{осн}}}{\epsilon_0} \Rightarrow E_1 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}. \quad (19)$$

Интеграл по замкнутой поверхности распадается на две части. Поскольку силовые линии боковую поверхность не пересекают, поток через неё равен нулю:

$$\int_{S_{\text{бок}}} \vec{E}_1 d\vec{S} = 0. \text{ И окончательно напряжённость поля плоского конденсатора:}$$

$E = 2E_1 = \sigma/\epsilon_0$ . Теперь, интегрируя уравнение (11), можно рассчитать разность

потенциалов между пластинами конденсатора. С учётом однородности поля в конденсаторе (рис. 10), получим:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \int_0^d \vec{E} d\vec{l} = \int_0^d E dl = E \int_0^d dl = Ed = \sigma d / \varepsilon_0 = qd / (S\varepsilon_0). \quad (20)$$

После чего, применив (18), получим формулу ёмкости плоского конденсатора:

$$C = q/U = \varepsilon_0 S / d. \quad (21)$$

В случае полного заполнения конденсатора однородной средой с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ , его ёмкость пропорционально увеличивается

$$C = q/U = \varepsilon_0 \varepsilon S / d. \quad (22)$$

Заметим, что при получении формулы для ёмкости плоского конденсатора размеры его плоскостей предполагались бесконечными. Чтобы формулы (21) и (22) можно было применить к реальным конденсаторам, следует исключить т.н. *краевые эффекты* (рис. 12). Это можно сделать с помощью приспособления, известного под названием *защитного кольца* [1].

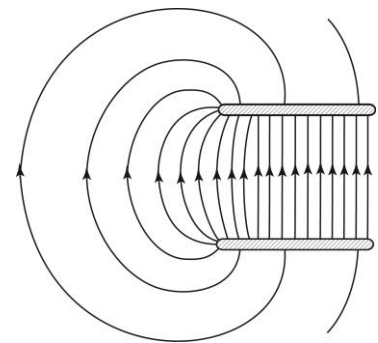


Рис. 12. Краевые эффекты поля плоского конденсатора

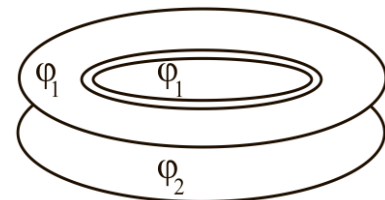


Рис. 13. Защитное кольцо

В поверхности одной из пластин плоского конденсатора прорезается узкая щель, отделяющая, как показано на рис. 13, центральную часть пластины от её краёв, причём по обе стороны от щели поддерживается один и тот же потенциал. Поле между центральными участками, если не учитывать незначительного влияния узкой щели, будет однородным, и ёмкость можно будет определять по формуле (21) [1]. В случае, если  $d \ll l$ , где  $l$  — минимальный линейный размер пластин конденсатора, краевыми эффектами можно пренебречь.

## 2. Методика проведения эксперимента

### 2.1. Описание экспериментальной установки

В лабораторной работе исследуется электростатическое поле плоского конденсатора. Экспериментальная установка представлена на рис. 14. Конденсатор (1) с раздвижными пластинами подключён к высоковольтному источнику питания (2), выходное напряжение которого доступно в трёх вариантах: от 0 до  $-5\text{ кВ}$ , от 0 до  $+5\text{ кВ}$  и от 0 до  $10\text{ кВ}$ . В работе используется последний

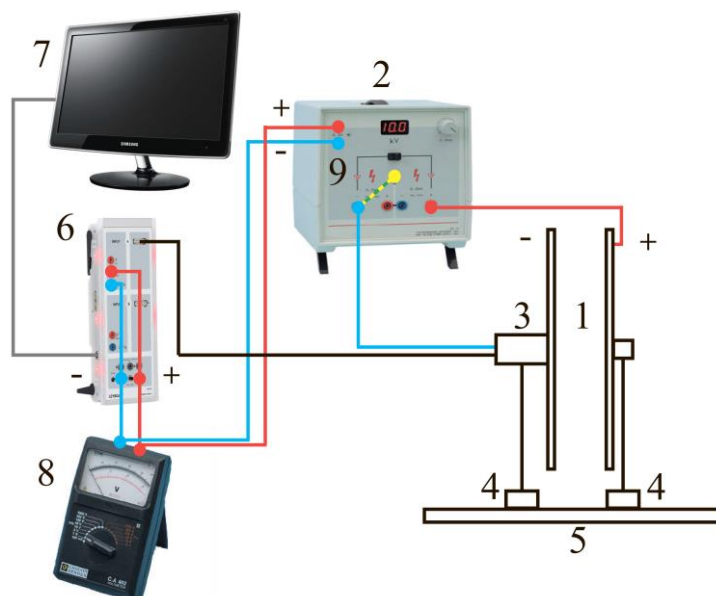


Рис. 14. Схема установки. 1 — конденсатор; 2 — высоковольтный источник питания; 3 — измеритель напряжённости электрического поля; 4 — держатель пластин; 5 — оптическая скамья; 6 — интерфейс CASSY 2; 7 — монитор; 8 — вольтметр.

вариант. Одна из пластин конденсатора жёстко соединена с измерителем напряжённости электрического поля<sup>5</sup> (3). Обе пластины укреплены в держателях (4), с помощью которых они могут быть зафиксированы на желаемом расстоянии  $d$  друг от друга на оптической скамье (5). Экспериментальные данные от измерителя напряжённости поля (3) через интерфейс CASSY 2 (6) поступают в компьютер и отображаются на экране его монитора (7). От интерфейса CASSY 2 (6) на источник питания (2) подаётся управляющее напряжение, величина которого контролируется вольтметром (8). Интерфейс CASSY 2 (6) осуществляет процесс синхронизации всех измерений (подробнее см. п. 4).

Конкретные задания состоят в исследовании зависимости напряжённости электростатического поля плоского конденсатора от напряжения, поданного на его пластины, и от расстояния между ними:  $E = f_1(U)$  и  $E = f_2(d)$ .

---

<sup>5</sup> Принцип действия измерителя напряжённости электрического поля изложен в Приложении 2

## 2.2. Постановка эксперимента. Методика и техника измерений

В лабораторной работе необходимо экспериментально проверить справедливость соотношения  $E = U/d$  (см. (20)), которое связывает напряжённость поля в конденсаторе с напряжением, поданным на его пластины ( $U$ ), и расстоянием между ними ( $d$ ). Отметим, кстати, что именно эта формула проясняет появление единицы измерения напряжённости поля  $[E] = 1\text{В/м}$ , введённой в п. 1.2. без объяснений. Связь между обеими единицами оказывается очень простой:  $[E] = 1\text{В/м} = 1\text{Дж}/(\text{Кл}\cdot\text{м}) = 1\text{Н/Кл}$ .

Измерения проводят в два этапа:

- при неизменном расстоянии  $d$  между пластинами плоского конденсатора подают на них напряжение  $U$  от высоковольтного источника питания и регистрируют значения напряжённости электрического поля  $E$ . Расстояние  $d$  в этой части эксперимента выбирается произвольно при условии, что  $d \ll l$ . Выбранное расстояние следует записать для сравнения его с результатами эксперимента (см. п. 5);
- при неизменной разности потенциалов  $U$  на пластинах конденсатора изменяют расстояние  $d$  между ними и регистрируют значения напряжённости электрического поля  $E$  при этих условиях.

При расстояниях  $d \ll l$ , где  $l$  — минимальный линейный размер пластин конденсатора, когда краевыми эффектами можно пренебречь, должна выполняться зависимость  $U \sim d^{-1}$ . Увеличивая это расстояние до  $d \leq 30$  см, следует определить, при каком соотношении между этими двумя размерами поле перестанет быть однородным и начнут проявляться краевые эффекты.

**NB:** При проведении эксперимента следует учитывать, что из конструктивных соображений измеритель напряжённости поля (3, рис. 14) углублён относительно плоскости пластины конденсатора (1, рис. 14) на 1 мм. Поэтому для определения истинного расстояния между пластинами к расстоянию, измеренному по линейке (5, рис. 14), нужно добавлять 1 мм.

### 3. Техника безопасности по работе с приборами

В этой лабораторной работе используется высокое напряжение до 10 кВ. Поэтому:

1. очень важно постоянно помнить, что здесь Вы имеете дело с высоким напряжением!
2. абсолютно необходимо убедиться, что обеспечено надёжное заземление измерителя напряжённости электрического поля и высоковольтного источника питания. Ни тот, ни другой прибор **никогда** не должны включаться без того, чтобы соответствующие их клеммы не были подключены к шине заземления;
3. электрическая прочность сухого воздуха не превосходит  $2 \text{ кВ} / \text{мм}^6$ , а влажного — снижается более, чем на порядок, поэтому высокое напряжение при определённых условиях может привести к пробое воздушного промежутка между пластинами конденсатора. Для самого конденсатора пробой особой опасности не несёт, **но он может повредить измеритель напряжённости электрического поля**;
4. именно надлежащее заземление, обеспечивая при случайном пробое обходной (проходящий вне измерителя напряжённости электрического поля) путь, для проскакивающей искры, решает проблему его безопасности.

---

<sup>6</sup> Это — минимальная величина поля. Разные справочники дают значения от 2 до 4 кВ/мм.

## 4. Порядок выполнения лабораторной работы

Основным организационно-управляющим элементом установки (рис. 14) является интерфейс CASSY 2 (6). Это устройство:

- генерирует управляющий электрический сигнал для источника питания (2), который под действием этого сигнала автоматически увеличивает напряжение, подаваемое на пластины конденсатора (1);
- принимает в цифровом виде от измерителя значения напряжённости электрического поля (3), вычисляемые синхронно с увеличением напряжения;
- позволяет установить величину управляющего сигнала и измеряет её;
- передаёт всю собранную информацию программе Cassy Lab 2, которая её обрабатывает и выдаёт в графическом и цифровом виде.

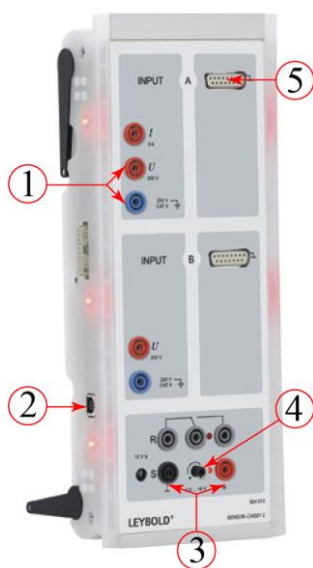


Рис. 15. Расположение элементов интерфейса CASSY 2: 1 — разъемы для измерения управляющего напряжения; 2 — разъем для подключения кабеля USB; 3 — управляющее напряжение; 0–5 В; 4 — ручка регулировки управляющего напряжения; 5 — разъем для подключения датчика напряжённости.



Рис. 16. Органы управления источника высокого напряжения: 1 — управляющее напряжение: 0–5 В; 2 — клеммы вывода высокого напряжения: 0–10 кВ; 3 — регулятор напряжения: 0–10 кВ; 4 — дисплей.

Перед началом выполнения работы необходимо: отрегулировать управляющее напряжение, подаваемое на источник высокого напряжения (2). Для этого ручкой регулировки управляющего напряжения (см. рис. 15) с помощью вольтметра (8, рис. 14), подключённого к разъёмам для измерения управляющего напряжения, следует установить напряжение 5 В.

Напряжение на пластины конденсатора (1, рис. 14) подаётся от источника высокого напряжения (2, рис. 14). Регулятором напряжения следует вручную установить на дисплее прибора (см. рис. 16) напряжение 10,0 кВ.

## Выполнение работы

### 1. Исследование зависимости $E = f(U)$ .

Запускаем программу, два раза щелкнув мышкой файл под названием: «Работа №25\_Зависимость напряжённости от напряжения». На экране появится основное окно программы, внутри которого мы увидим

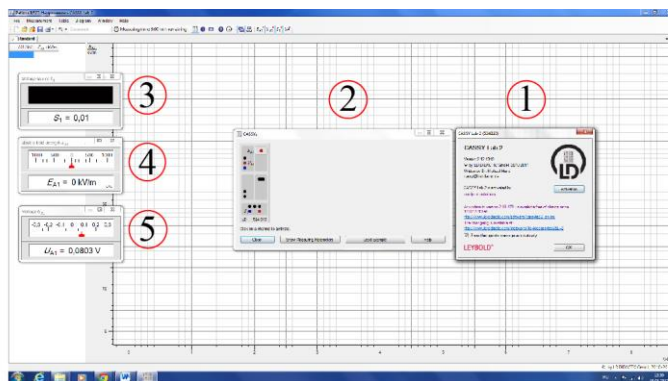


Рис. 17. Окно программы Cassy Lab 2.

еще несколько окон (см. рис. 17). Так как для работы окна 1 и 2 не понадобятся, то их следует закрыть. В окне 4 «Electric field strength  $E_{A1}$ » отображаются показания датчика напряжённости поля. При необходимости их можно сбросить на ноль: нажмите правой клавишей мыши на окно с показаниями, после чего в правой половине основного окна появятся настройки для данной величины.

В окне 3 «Voltage Source  $S_1$ » будет отображаться величина управляющего сигнала от 0 до 1 с шагом в 0,01 от величины  $S_1$  (изменение в 0,01 от величины  $S_1$  соответствует 0,05 В, подаваемым устройством (6) на источник высокого напряжения (2), что, в свою очередь, соответствует 0,1 кВ, подаваемых источником высокого напряжения на пластины конденсатора (1). В окне 5 «Voltage  $U_{A1}$ » отображается величина управляющего сигнала в вольтах.

Для запуска эксперимента необходимо нажать на клавиатуре клавишу F9. В результате программой в реальном времени автоматически будет строиться график и будут записаны численные значения измеряемых величин (см. рис. 18).

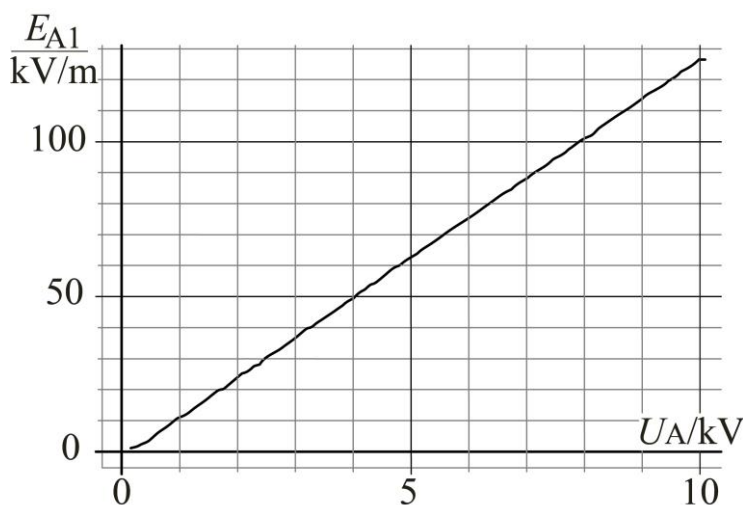


Рис. 18. График зависимости  $E = f(U)$ , построенный программой Cassy Lab 2.



**NB:** Если во время проведения эксперимента график покинул отведённую ему программой область (т.е. измеренные значения оказались больше значений по оси абсцисс или ординат) необходимо нажать правой клавишей ниже оси абсцисс или левее оси ординат, и в появившемся окне нажать клавишу «Find Minimum and Maximum». После этого масштаб графика будет автоматически подстроен под имеющиеся значения.

## 2. Исследование зависимости $E = f(d)$ .

*Перед началом работы необходимо:* придвинуть пластины конденсатора (1, рис. 14) вплотную друг к другу. Надетые на пластины пластмассовые уголки обеспечат при этом расстояние между ними в 6 мм. Затем включаем источник питания (2, рис. 14) и с помощью регулятора выставляем напряжение 5 кВ.

Запускаем программу, два раза щёлкнув мышкой файл под названием: «Работа №25\_Зависимость напряжённости от расстояния».

Закрываем лишние окна (1 и 2), после чего останется одно окно «Electric field strength  $E_{A1}$ » в котором отображаются показания датчика напряжённости электрического поля. При необходимости их можно сбросить на ноль. Для этого нужно нажать правой клавишей мыши на окно с показаниями, после чего в правой половине основного окна появятся настройки для данной величины.

Далее в правой части окна находим строку Path (Calculator → Parameter → Path  $P_1$ ) и в графе Value вписываем расстояние между пластинам в миллиметрах (см. рис. 19, где это расстояние 296 мм), не забыв добавить 1 мм для учёта углубления датчика измерителя напряжённости поля.

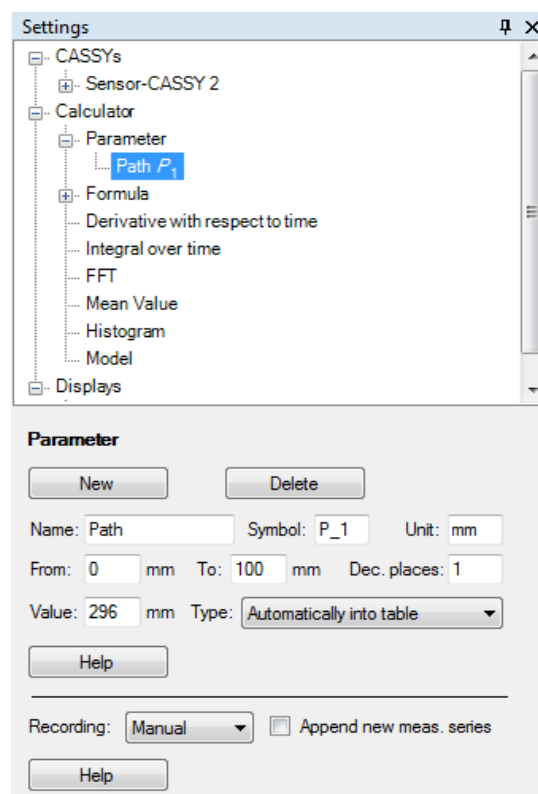


Рис. 19. Меню настройки расстояния между пластинами.



После того, как установленное расстояние между пластинами + 1 мм будет вписано в строку «Value», нажатием клавиши F9 на клавиатуре значения расстояния и напряжённости будут переданы программе Cassy Lab 2, которая запишет численное значение и построит точку на графике.

Затем, отодвигая одну из пластин на определённое расстояние<sup>7</sup>, повторяем измерение нажатием клавиши F9, предварительно в строке «Value» вписав изменившееся значение расстояния. По окончании эксперимента должен получиться следующий график (см. рис. 20).

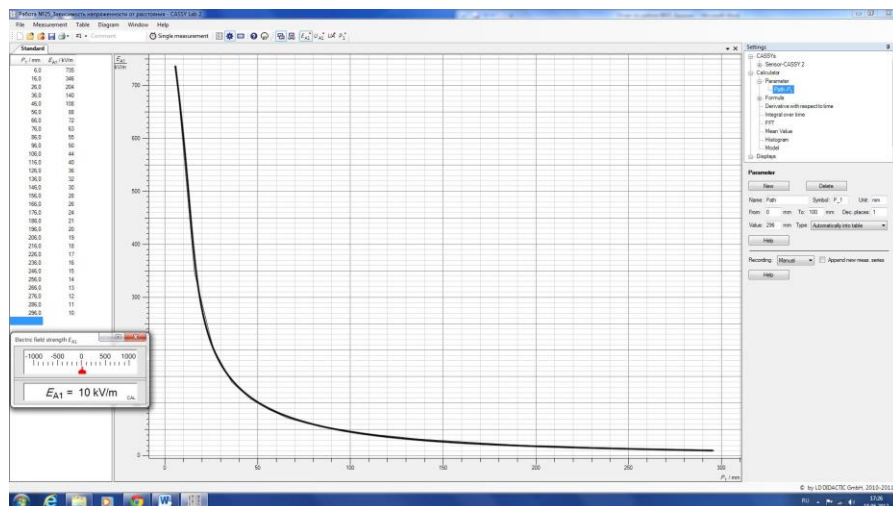


Рис. 20. График зависимости напряжённости электрического поля от расстояния.

По окончании работы не забудьте сохранить полученные результаты и отключить питание установки.

**Примечание.** При желании можно все изменяемые параметры ( $U$  и  $d$ ) устанавливать вручную и отказаться от построения графиков исследуемых зависимостей на экране монитора. При этом в установке (рис. 14) используются все её элементы с 1 по 7, но теперь управляющее напряжение от интерфейса CASSY 2 (6) на источник питания (2), величина которого ранее контролировалась вольтметром (8), подавать не нужно. Также не нужно вводить значения изменяемого расстояния  $d$ . Измеритель напряжённости электрического поля (3, рис. 14) и в этом случае выводит значения напряжённости в окно 4 (рис. 17). Все полученные результаты заносятся в соответствующие таблицы, форму которых несложно предложить самостоятельно.

<sup>7</sup> В области резкой зависимости напряжённости поля от расстояния (при малых  $d$ ) измерения следует проводить через каждый миллиметр. При увеличении  $d$  и «шаг» изменения расстояния между пластинами конденсатора можно постепенно увеличивать. Для исследования вопроса о краевых эффектах расстояние  $d$  следует довести до  $\approx 30$  см.

## 5. Обработка результатов эксперимента

1. Программа Cassy Lab 2 строит линии графиков, захватывая все имеющиеся точки. При этом из-за погрешности измерений вместо плавной прямой линии может получиться линия, состоящая из отдельных отрезков. Программа позволяет провести линию, усреднённую по методу наименьших квадратов. Для этого вызываем правой кнопкой мыши контекстное меню и выбираем в нём *Fit function* → *Best fit straight line*. Набор последовательных точек экспериментальной зависимости, которые мы хотели бы вовлечь в этот анализ, выбирается проведением по ним курсором при нажатой левой кнопке мыши.
2. Во второй части работы зависимость  $E = f(d)$  имеет вид гиперболы. Однако по графику этой зависимости (рис. 20) невозможно определённо судить о той степени, в которой расстояние ( $d$ ) в неё входит. Если строить график не от  $d$ , а от  $1/d$  — он будет прямой линией и неопределённость будет снята. Для этого, перед тем как начать измерения, выбираем из меню установок (см. рис. 19) *Displays* → *Standard* →  $E_{A1} (P_1)$  и в открывшемся окне *x-axis* выбираем  $1/x$ . Далее обрабатываем экспериментальные точки получившейся прямой так же, как и в первой части работы.
3. Тангенс угла наклона графика к оси абсцисс в первом случае даёт  $1/d$ , а во втором — приложенное к пластинам конденсатора напряжение. Оба числа следует сравнить с соответствующими величинами, выбранными в начале каждого эксперимента.
4. Если работа выполнялась в «ручном» режиме, то графики строятся самостоятельно на миллиметровой бумаге или с использованием программы ORIGIN с обязательным указанием погрешностей на графике.

Кроме приведенных выше результатов, отчет должен содержать цель работы, расчетные формулы с указанием единиц измерения и всех используемых обозначений, если работа выполнялась в «ручном» режиме — таблицы первичных результатов измерений (можно совместно с результатами расчетов), а также выводы по работе. По желанию, может быть приведена схема установки.

## 6. Контрольные вопросы

1. Какие положения составляют основу электростатики?
2. В чём состоит принцип суперпозиции?
3. Что такое точечный заряд? Как для таких зарядов формулируется закон Кулона?
4. Каким критериям должен отвечать пробный заряд?
5. Что такое напряжённость поля? В чём состоит смысл концепции *дальнодействия*?
6. На чём основано утверждение: «кулоновская сила — сила консервативная»?
7. Дайте определение понятия «потенциал электростатического поля».
8. Как связаны между собой напряжённость и потенциал электростатического поля?
9. Перечислите свойства силовых линий электростатического поля.
10. Применяя модель силовых линий, докажите теорему Гаусса.
11. В чём состоит сложность применения теоремы Гаусса для вычисления напряжённости поля, созданного конфигурацией зарядов неопределённой формы?
12. Дайте определение понятиям поток и циркуляция вектора.
13. Что такое электроёмкость проводников, конденсатора? От чего она зависит?
14. Каковы единицы измерения заряда, напряжённости и потенциала электрического поля, электроёмкости в СИ?
15. В чём состоит цель лабораторной работы и как она достигается?

## Список рекомендованной литературы и справочные данные

1. Смайт В. *Электростатика и электродинамика*. М.: ИЛ. 1954. 604 с.
2. Эпинус Ф. Т. У. *Теория электричества и магнетизма*. — АН СССР. сер. Классики науки. 1951. — 564 с.
3. Филонович С.Р. *Судьба классического закона*. М.: Наука. 1990. 240 с. (Б-чка «Квант»; вып. 79) [http://ilib.mccme.ru/djvu/bib-kvant/kvant\\_79.htm](http://ilib.mccme.ru/djvu/bib-kvant/kvant_79.htm)
4. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. *Фейнмановские лекции по физике*. вып. 5, Электричество и магнетизм. М.: Мир, 1966, 296 с.
5. Тэнэсеску Ф., Крамарюк Р. *Электростатика в технике*. / Пер. с рум. — М.: Энергия. 1980. 296 с.
6. *Элементарный учебник физики: учебное пособие* под. Ред. Г.С. Ландсберга; т. 2. Электричество и магнетизм. — М.; ФИЗМАТЛИТ, 2008, 480 с.
7. Кингсеп А.С, Локшин Г.Р., Ольхов О.А. *Основы физики. Курс общей физики: Учебн.* В 2 т. Т. 1. Механика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика / Под ред. А.С. Кингсепа. — М.: Физматлит, 2001, 560 с.
8. *Plimpton S.J., Lawton W.E.* A very accurate test of Coulomb's law of force between charges // *Phys.Rev.* 1936. V. 50. P. 1066–1072.
9. *Williams E.R., Faller J.E. and Hill H.A.* New experimental test of Coulomb's law: a laboratory upper limit on the photon rest mass // *Phys.Rev. Lett.* 1971. V. 26. P. 721–724.
10. *Tant P., Bolsens B., Sels T., van Dommelen D., Driesen J., and Belmans R.* Design and Application of a Field Mill as a High-Voltage DC Meter // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 2007. V. 56. P. 1459–1464.

## Приложение 1. Теорема Гаусса и показатель степени в законе Кулона

Следствием теоремы Гаусса является отсутствие поля внутри металлической оболочки независимо от величины заряда, расположенного на её поверхности (рис. П1). Экспериментально это проверил Майкл Фарадей ещё в 1836 г. Это изобретение теперь известно как *клетка Фарадея* (рис. П2). На этом свойстве металлических оболочек основано действие электростатической защиты.

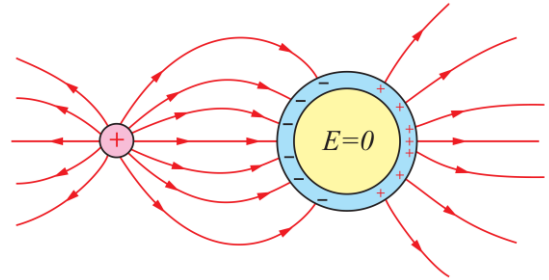


Рис. П1. Отсутствие поля внутри заряженной металлической поверхности

Это же свойство позволяет оценить, с какой точностью показатель степени в законе Кулона близок к 2. При этом не проводят абсолютных количественных измерений, как это делал сам Кулон, а в ходе соответствующего эксперимента лишь выясняют, с какой неточностью можно установить отличие от нуля напряжённости поля внутри замкнутой заземлённой металлической оболочки. В экспериментах такого рода важна не точность абсолютных измерений, а чувствительность применяемых приборов. Вся история экспериментальной физики показывает, что повышение чувствительности приборов много проще увеличения их точности.



Рис. П2. Клетка Фарадея

Кавендиш первым определил, что показатель степени в законе Кулона не отличается от двойки в пределах 2%. Максвелл, став в 1874 г. первым директором знаменитой Кавендишской лаборатории, инициировал новую проверку закона Кулона. В результате было установлено (1876), что возможная поправка не превосходит  $1/21600$ . Ещё через 60 лет американские физики Плимптон и Лоутон, применяя, в принципе, тот же метод, что и их предшественники, установили, что поправка меньше, чем  $2 \cdot 10^{-9}$  [8].

Одна из последних проверок состоялась сравнительно недавно и уже другим, совершенно не электростатическим методом — по отличию массы покоя фотона от нуля, неточность была уменьшена до  $(2,7 \pm 3,1) \cdot 10^{-16}$  [9].

## Приложение 2. Принцип действия измерителя напряжённости электрического поля

Устройство, изображённое на рис. ПЗ, представляет собой измеритель напряжённости поля с вращающимися лопастями [10], обычно называемый в англоязычной литературе: «*field mill* <sup>8</sup>». Конденсатор, состоящий из подвижной (ротор) и неподвижной (статор) пластин, помещён в однородное электростатическое поле  $E$ . Ротор и части (В) площади статора соединены между собой и заземлены. Под действием поля на

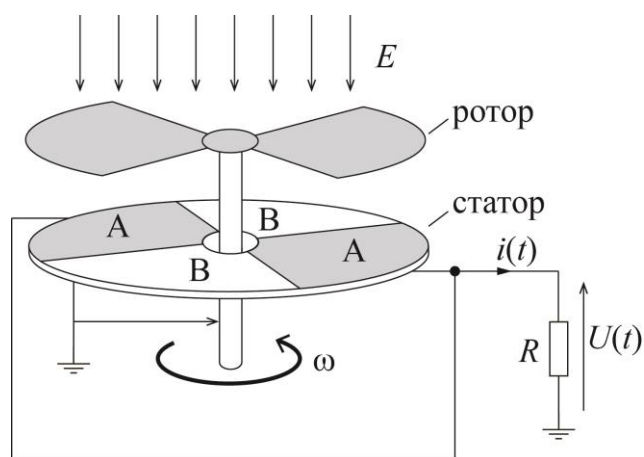


Рис. ПЗ. Измеритель напряжённости электрического поля

секторах (А) статора, площадь которых  $S$ , индуцируется заряд  $Q$ , который может быть найден по теореме Гаусса  $Q = \varepsilon_0 E S$ . В принципе, можно было бы измерить напряжение на пластинах конденсатора, пропорциональное этому заряду, и, тем самым, измерить  $E$ . Однако более точные измерения можно осуществить путём преобразования постоянного заряда в ток путём модуляции поля за счёт вращения одной из пластин конденсатора.

В результате:  $i = \frac{dQ}{dt} = \varepsilon_0 E \frac{dS}{dt}$ . Опуская некоторые детали вычислений, запишем окончательные выражения для амплитуды тока ( $I$ ) и напряжения ( $U_R$ ) на резисторе ( $R$ ):  $I = \frac{\omega}{\pi} \varepsilon_0 E S$ ;  $U_R = R \frac{\omega}{\pi} \varepsilon_0 E S$  [10]. Нестабильность вращения ротора может вносить ошибку в величину измеряемого поля. Подключение параллельно резистору конденсатора постоянной ёмкости ( $C$ ), такой что  $RC \gg 1$ , делает амплитуду напряжения ( $U_{RC}$ ) независимой от частоты:  $U_{RC} \cong \varepsilon_0 E S / 2C$  [10].

<sup>8</sup> *field* — поле, *mill* — мельница. Вращающиеся лопасти ротора похожи на крылья мельницы, что и объясняет название.