

Работа №

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЗАКОНА КУЛОНА

Согласно закону Кулона сила взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов пропорциональна величине каждого из зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Направление силы совпадает с соединяющей заряды прямой (см. рис. 1). Математически это выражается, как

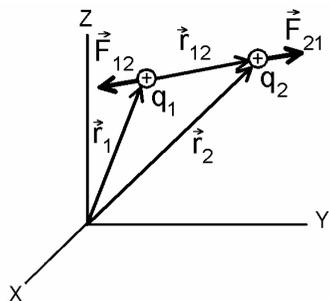


Рис. 1

$$\vec{F}_{12} = -k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \cdot \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}}; \quad (1)$$

$$\vec{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \cdot \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}}. \quad (2)$$

Здесь k – множитель, зависящий от выбранной системы единиц. В системе СИ его принято записывать как,

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \quad (3)$$

где $\epsilon_0 = 0.885 \cdot 10^{-11}$ Ф/м.

Как показывает опыт, сила взаимодействия двух зарядов не изменяется при наличии третьего заряда. Поэтому, независимо от числа зарядов выражения (1)-(2) можно использовать для вычисления силы взаимодействия каждой пары.

Закон Кулона установлен экспериментально, но его справедливость подтверждается и тем, что с опытом согласуются все выводы теории, в основе которой лежит этот закон.

В лабораторной работе измеряется зависимость силы взаимодействия двух заряженных сфер небольшого диаметра от заряда каждой из сфер и от расстояния между ними. При расстоянии между центрами сфер значительно большем их диаметра сферы могут приближенно рассматриваться, как точечные заряды. Тогда зависимость силы от расстояния между центрами сфер и от их зарядов должна подчиняться закону Кулона.

Приборы и оборудование

Для зарядки сфер в работе используется высоковольтный источник (рис. 2). Одна из выходных клемм источника (+ или –) соединяется с общей точкой (центральной клеммой), и тогда на высоковольтный электрод, которым заканчивается присоединенный к другой клемме кабель, подается высокое напряжение противоположной полярности. Если прикоснуться к высоковольтному электроду проводником, то проводник приобретет заряд, пропорциональный потенциалу электрода. Выходное напряжение источника может быть установлено от 0 до 25 кВ. Несмотря на то, что источник является высоковольтным, опасности для жизни и здоровья он не представляет. Дело в том, что емкость выходных цепей источника чрезвычайно мала, т.е. он не может обеспечить ток, вызывающий серьезное физиологическое воздействие на организм человека. Однако прикосновение к высоковольтному электроду вызывает неприятные ощущения и потому его следует избегать.



Рис. 2

При работе с высоковольтным источником необходимо соблюдать следующие правила. Устанавливать высокое напряжение на выходе источника только на время зарядки сфер, после чего немедленно уменьшать его до нуля. Переключение полярности производить при нулевом напряжении на выходе источника. При поданном на электрод высоком напряжении не приближать к нему части тела ближе, чем на 10 см. Также следует отметить, что наличие неподалеку от взаимодействующих тел и измерительных приборов электрода с высоким

потенциалом создает в пространстве электрическое поле, искажающее результаты опыта. Поэтому, все измерения следует проводить только после установки выходного напряжения высоковольтного источника на ноль.

Для зарядки взаимодействующих сфер в работе используется вспомогательная сфера, закрепленная на диэлектрической рукоятке. Порядок выполнения зарядки следующий:

- 1) установить требуемое напряжение на высоковольтном источнике;
- 2) кратковременно прикоснуться вспомогательной сферой к высоковольтному электроду;
- 3) уменьшить выходное напряжение высоковольтного источника до нуля;
- 4) прикоснуться вспомогательной сферой к заряжаемой сфере (при этом, поскольку сферы имеют одинаковую геометрию и, следовательно, одинаковую емкость, на заряжаемую сферу переместится половина заряда вспомогательной сферы);
- 5) разрядить вспомогательную сферу, прикоснувшись к ней заземленным электродом разрядника.

Для определения величины переносимого таким образом заряда необходимо установить соответствие между потенциалом высоковольтного электрода и зарядом, который приобретает вспомогательная сфера при прикосновении к электроду. Это можно сделать теоретически и экспериментально. Величина заряда Q при заданном потенциале U проводника определяется его емкостью C :

$$Q = C \cdot U. \quad (4)$$

Емкость проводящей сферы радиуса R равна

$$C = 4\pi\epsilon_0 R. \quad (5)$$

При соприкосновении сфера и высоковольтный электрод становятся эквипотенциальными. Следовательно, приобретаемый сферой заряд равен

$$Q = 4\pi\epsilon_0 R \cdot U. \quad (6)$$

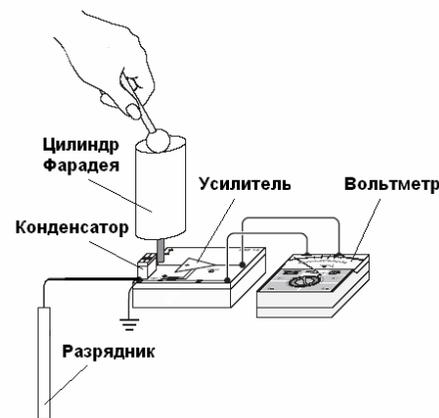


Рис. 3

Для экспериментального определения величины заряда используется установка с цилиндром Фарадея¹⁾, показанная на рис. 3. Цилиндр Фарадея присоединен к одной из обкладок конденсатора емкостью $C_k = 10$ нФ, тогда как другая обкладка конденсатора заземлена. Заряд Q с вспомогательной сферы переносится на цилиндр Фарадея при прикосновении сферы к внутренней

поверхности цилиндра. Емкость цилиндра пренебрежимо мала по сравнению с емкостью конденсатора. Поэтому, разность потенциалов U_k между пластинами заряженного конденсатора оказывается равной

$$U_k = \frac{Q}{C_k}. \quad (7)$$

Измерить эту разность потенциалов непосредственным присоединением к конденсатору вольтметра невозможно, потому что конденсатор мгновенно разрядится через цепь вольтметра. Проблема разрешается при помощи специального усилителя. При коэффициенте усиления равном единице этот усилитель имеет колоссальное входное сопротивление и невысокое сопротивление выхода. Поэтому, ток через входную цепь усилителя практически отсутствует, т.е. конденсатор не разряжается, а напряжение на выходе усилителя $U_{\text{вых}}$ равно напряжению на входе $U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} = U_k$. Таким образом, заряд Q вспомогательной сферы, перенесенный в цилиндр Фарадея, определяется по измеренному вольтметром значению $U_{\text{вых}}$:

$$Q = C_k \cdot U_{\text{вых}}. \quad (8)$$

¹⁾ Цилиндр Фарадея – это обычный металлический цилиндр, длина которого много больше его диаметра. При прикосновении заряженного тела к внутренней стороне цилиндра весь заряд тела передается цилиндру.

При проведении измерений конденсатор следует разряжать после каждого измерения, прикасаясь к цилиндру Фарадея заземленным разрядником.

Общий вид установки для проведения опытов показан на рис. 4. Взаимодействующие сферы радиусом 20 мм укреплены на диэлектрических стержнях. Одна из сфер устанавливается на подвижной каретке, другая – закрепляется в датчике силы. Показания измерителя силы даются в мН. Приборная погрешность измерителя силы составляет 1%. Расстояние между сферами определяется по делениям на направляющем рельсе.

Измеряемая сила весьма мала, и потому при ее измерении следует избегать сотрясений стола и прикосновений к частям установки. Перед началом измерений измеритель силы должен быть прогрет в течение не менее 30 мин. Для предотвращения утечки зарядов диэлектрические стержни должны поддерживаться в чистоте. Самопроизвольное изменение показаний измерителя силы в процессе измерений указывает на необходимость очистки диэлектрических стержней, которая выполняется при помощи смоченного спиртом тампона. Для поддержания стержней и сфер в чистоте к ним нельзя прикасаться руками.

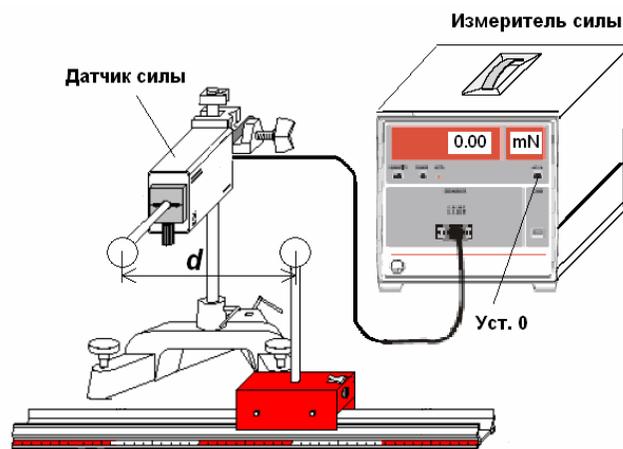


Рис.4

Выполнение работы

Упражнение 1. Измерение заряда сферы.

- 1) Собрать/проверить схему согласно рис. 3 и включить усилитель в сеть через адаптер.
- 2) На передней панели высоковольтного блока соединить центральную клемму с клеммой « - » а к клемме « + » присоединить кабель высоковольтного электрода.
- 3) Укрепить высоковольтный электрод в диэлектрической подставке, как показано на рис. 2.
- 4) Установить регулятор высокого напряжения в крайнее положение против часовой стрелки и включить питание высоковольтного блока.
- 5) Установить выходное напряжение высоковольтного блока равным 5 кВ и кратковременно прикоснуться к высоковольтному электроду сферой на диэлектрической рукоятке.
- 6) Уменьшить выходное напряжение до нуля.
- 7) Прикоснуться заряженной сферой к внутренней стороне цилиндра Фарадея (см. рис. 3).
- 8) Сделать отсчет по шкале вольтметра и занести данные в таблицу в лабораторном журнале.
- 9) Повторить последовательность действий п.п. 5-8, увеличивая выходное напряжение с шагом 5 кВ до достижения 25 кВ.
- 10) Выполнить всю процедуру измерений, начиная с напряжения 5 кВ еще два раза.
- 11) Рассчитать заряд сферы для каждого случая по формуле (8) и занести результаты в таблицу.
- 12) Найти средние значения и погрешности измеренных величин заряда.
- 13) Построить график найденной зависимости заряда сферы от потенциала высоковольтного электрода. На этом же графике построить прямую (6).

Упражнение 2. Измерение зависимости силы взаимодействия зарядов от расстояния между ними.

- 1) Включить в сеть блок измерителя силы и прогреть его в течение 30 мин (рекомендуется сделать это заблаговременно).

- 2) Установить измеритель силы на 0, нажатием соответствующей кнопки (см. рис. 4).
- 3) Установить сферы на одном уровне по высоте.
- 4) Привести сферы в легкое соприкосновение и записать координату положения подвижной каретки относительно направляющего рельса. Момент соприкосновения зафиксировать по изменению показаний измерителя силы. При соприкосновении сфер знак силы соответствует, очевидно, силе отталкивания. Записать знак силы отталкивания в журнал.
- 5) Установить сферу на подвижной каретке на таком расстоянии от начального положения, чтобы расстояние между центрами сфер d (см. рис. 4) составляло 6 см.
- 6) Установить на высоковольтном блоке выходное напряжение 25 кВ.
- 7) При помощи вспомогательной сферы зарядить поочередно взаимодействующие сферы (см. описание методики зарядки в предыдущем разделе).
- 8) Уменьшить выходное напряжение высоковольтного блока до нуля.
- 9) При помощи разрядного электрода разрядить вспомогательную сферу.
- 10) Произвести отсчет величины силы по индикатору измерителя силы и записать результат в таблицу в лабораторном журнале.
- 11) Прикасаясь только к каретке с подвижной сферой переместить ее на 2 см дальше от неподвижной сферы и записать показания измерителя силы в журнал.
- 12) Повторить п. 11 до достижения кареткой края направляющего рельса.
- 13) Повторить п.п. 5-11 еще два раза.
- 14) Разрядить сферы при помощи разрядника.
- 15) Повторить всю процедуру измерений, зарядив одну из сфер положительным зарядом, а другую – отрицательным. Перед переключением полярности на высоковольтном блоке вывести высокое напряжение в 0 и отключить блок от сети.
- 16) Построить зависимость силы Кулона от расстояния для случая зарядов одного знака и разных знаков на одном и том же графике. На этом же графике построить теоретические зависимости для обоих случаев. Значение зарядов сфер, соответствующих напряжению

источника 25 кВ, взять из упражнения 1 с учетом того, что при переносе заряда вспомогательной сферой заряд делится пополам.

Упражнение 3. Измерение зависимости силы взаимодействия зарядов от их величины и знака.

- 1) Установить сферы так чтобы расстояние между их центрами было равно 6 см.
- 2) Зарядить сферу, закрепленную в датчике силы, перенеся на нее заряд при помощи вспомогательной сферы при напряжении высоковольтного источника 25 кВ.
- 3) Таким же образом зарядить сферу, закрепленную на каретке при напряжении источника 5 кВ, после чего установить выходное напряжение высоковольтного блока на 0.
- 4) Записать величину силы взаимодействия.
- 5) Разрядить сферу на каретке при помощи разрядника, после чего зарядить ее при напряжении источника 10 кВ и записать силу взаимодействия.
- 6) Повторить п. 5 для напряжений источника 15, 20 и 25 кВ, устанавливая всякий раз после зарядки сферы выходное напряжение на 0.
- 7) Разрядить обе сферы и повторить п.п. 2-6 еще два раза.
- 8) Разрядить обе сферы и три раза провести измерения согласно п.п. 2-7, зарядив сферу, закрепленную в датчике силы положительным зарядом, а сферу в подвижной каретке – отрицательным.
- 9) Найти средние значения силы и их погрешности для каждого из измерений и построить график зависимости силы взаимодействия от величины заряда сферы, укрепленной на каретке. Все экспериментальные точки, как для зарядов одного знака, так и разных знаков должны быть представлены на одном графике. Зависимость заряда сфер от потенциала высоковольтного электрода берется из упражнения 1 с учетом того, что при переносе заряда вспомогательной сферой заряд делится пополам. На этом же графике построить соответствующую теоретическую зависимость.

Литература

1. И.В.Савельев. Курс общей физики, т.2. Наука, М. 1988.

Контрольные вопросы

1. Что такое емкость?
2. Выведите формулу (5) для емкости уединенной сферы.
3. Докажите, что напряженность поля внутри цилиндра Фарадея вдали от его концов равна нулю.
4. Что такое потенциал? Потенциал – это вектор или скаляр?
5. В каких единицах измеряется заряд в системе СИ? Как выразить эту единицу через основные единицы системы СИ?
6. Заряд – это физический объект, существующий сам по себе, или это свойство материального объекта? Что именно переносится вспомогательной сферой?