

3. Устройство и принцип действия абсолютного электрометра, используемого в работе.
4. Каково назначение охранного кольца, которым окружена верхняя пластина конденсатора абсолютного электрометра?
5. Принцип действия электростатического вольтметра.
6. Можно ли измерять данным электростатическим вольтметром переменные напряжения?
7. В каких единицах измеряется разность потенциалов в системах СГСЕ и СИ?
8. Какие существуют системы электроизмерительных приборов?
9. Повлияет ли на градуировочный график заполнение пространства между пластинами конденсатора диэлектриком?
10. Какие причины приводят к отличию зависимости между отклонением вольтметра и подаваемым на него напряжением от квадратичной?
11. Оцените точность выполненных измерений.

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество и магнетизм. М.: Наука, 1985.
3. Фриш С. Э., Тиморева А. В. Курс общей физики. Т. II. М.: Физматгиз, 1962.

Лабораторная работа 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНОГО ЗАРЯДА

Методика эксперимента. Определение элементарного заряда может быть выполнено при помощи ряда методов:

- а) измерением заряда сосчитанных непосредственно частиц;
- б) статистической обработкой результатов наблюдений шротт-эффекта (дробовой шум в электронных лампах);
- в) из равенства $e_0 N = F$, где F — число Фарадея, N — число Авогадро (число Фарадея определяется непосредственно; число Авогадро может быть очень точно определено, например, из наблюдений дифракции на кристалле рентгеновских лучей известной длины волны);

г) из измерения скорости перемещения заряженных микроскопических частиц в однородном электрическом поле.

В настоящей работе используется метод измерения скорости заряженных частиц в электрическом поле, так как он является одновременно наиболее прямым и убедительным доказательством прерывного строения электрических зарядов.

В основу метода положено изучение движения заряженных капелек жидкости (масла) в однородном электрическом поле известной напряженности.

Измеряя скорости капелек, падающих в поле силы тяжести (при отсутствии электрического поля), и скорости капелек, поднимающихся в поле сил тяжести при наличии электрического

поля, можно вычислить действующую на капельку силу электрического поля. Затем, зная величину напряженности электрического поля, уже нетрудно определить заряд капельки.

Измерение элементарного заряда по этому способу и доказательство дискретности электрического заряда были проведены в классических опытах Р. Милликена в 1914—1916 гг.

Получение значения e_0 с точностью, достигнутой Миллиkenом, невозможно в условиях учебной лаборатории. При выполнении настоящей задачи необходимо лишь обратить внимание на изучение метода и на доказательство дискретности зарядов, удовлетворяясь значением e_0 , полученным с невысокой точностью.

К микроскопическим капелькам жидкости, движущимся в воздухе, применим закон Стокса, в соответствии с которым сила сопротивления воздуха

$$F = 6\pi\eta v_g a, \quad (1)$$

где η — коэффициент внутреннего трения воздуха, v_g — скорость падения капли, a — радиус капли. При установившемся (равномерном) падении капельки в поле только силы тяжести сумма сил, действующих на капельку, равна нулю:

$$\frac{4}{3} \pi a^3 \rho g - \frac{4}{3} \pi a^3 \sigma g - 6\pi\eta a v_g = 0. \quad (2)$$

Здесь σ — плотность вещества капли (масла), ρ — плотность воздуха, g — ускорение силы тяжести.

Установившаяся скорость движения заряженной капли, если она поднимается в электрическом поле, определяется уравнением

$$Ee + \frac{4}{3} \pi a^3 \rho g - \frac{4}{3} \pi a^3 \sigma g - 6\pi\eta a v_E = 0, \quad (3)$$

где E — напряженность электрического поля, e — заряд капли, v_E — скорость подъема капли.

В этих уравнениях все величины, за исключением заряда капельки e и ее радиуса a , доступны непосредственному измерению. Непосредственное измерение радиуса капельки сопряжено со значительными трудностями ввиду ее микроскопических размеров. Исключая из уравнений (2) и (3) радиус капельки a , находим выражение для величины заряда:

$$e = \frac{9\sqrt{2}\pi\eta^{3/2}}{E(\sigma - \rho)^{1/2}g^{1/2}} v_g^{1/2} (v_g + v_E). \quad (4)$$

Множественно повторяя измерение заряда одной и той же капли, можно заметить, что этот заряд время от времени меняется. Причиной изменения заряда капли может быть ионизация воздуха космическими лучами. Изменение заряда капли может происходить также в результате фотоэффекта при взаимодействии фотонов с веществом капли.

Сравнивая величины заряда одной и той же капли, получен-

ные из различных опытов, можно убедиться, что величина изменения заряда и сам заряд капли являются целыми кратными одной и той же величины. Эту величину e_0 естественно считать элементарным зарядом.

Наиболее точное значение этой величины по последним данным следующее: $e_0 = 4,80298 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЕ = 1,6021892 Кл.

При проведении эксперимента следует использовать капли микроскопических размеров, так как в этом случае заряд капли, а также его приращения равны достаточно малому числу элементарных зарядов. Поэтому кратность заряда капельки элементарному заряду e_0 устанавливается легко.

Точность измерения заряда капельки существенно зависит от точности измерения скорости ее движения (см. формулу (4)). При этом скорость v_n падения капли в отсутствие электрического поля, которая остается постоянной для одной и той же капли при изменении ее заряда, может быть измерена достаточно точно путем многократного повторения измерений. Для получения достаточной точности измерения скорости движения капельки в электрическом поле используют малую напряженность поля. Однако при этом на движении капле сказывается влияние воздушных конвекционных потоков, которое становится особенно заметным при малых скоростях перемещения капельки. Поэтому при осуществлении эксперимента существенное внимание уделяется уменьшению воздушных потоков.

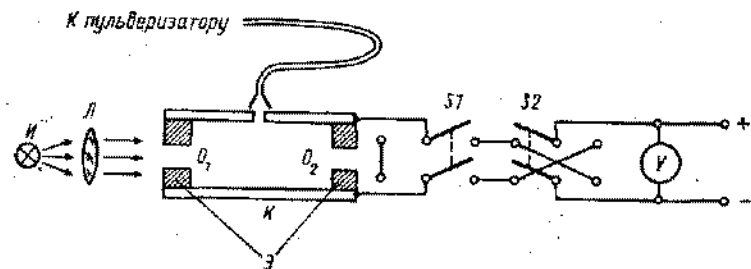


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Описание экспериментальной установки. Схема установки представлена на рис. 1.

В пространство между пластинами конденсатора K через отверстие в центре верхней пластины при помощи пульверизатора вводятся капли масла микроскопических размеров. За их движением наблюдают в оптическую трубу. Частицы освещаются пучком света, падающим перпендикулярно трубе от источника I , и видны в затемненном поле как светящиеся точки. Для уменьшения движения воздуха внутри конденсатора, которое могло бы исказить движение капельки, пространство между пластинами конденсатора ограничено с боков эбонитовым кольцом \mathcal{E} , имеющим три окошка. Два из них (O_1 и O_2) служат для прохождения

через конденсатор светового пучка, третье, перпендикулярное к первым двум, используется для наблюдения движения капель.

Разность потенциалов подается на пластины конденсатора от выпрямителя.

Выполнение эксперимента. Ознакомьтесь с элементами экспериментальной установки. При помощи пульверизатора в пространство между пластинами конденсатора вводятся микроскопические капельки масла. При распылении большинство капель электризуется, приобретая больший или меньший положительный или отрицательный заряд. Перемещением трубы, а также вращением конденсатора K , закрепленного несколько эксцентрично в оправе, добиваются отчетливой видимости капелек в виде звездочек на темном фоне.

Чтобы убрать капельки, несущие слишком большой заряд, пластинам конденсатора на некоторое время сообщают разность потенциалов около 300 В. При этом капельки с большим зарядом быстро двигаются к пластинам, капли же с малым зарядом двигаются медленно и не успевают за это время достигнуть электродов.

Все последующие измерения производят при разности потенциалов 200—250 В, которую поддерживают неизменной в течение всего эксперимента и периодически контролируют при помощи вольтметра V .

Выбрав ясно видимую обособленную капельку, которая под действием поля медленно движется вверх, выключают поле, при помощи ключа S_1 замыкая конденсатор K накоротко. В отсутствие поля капля падает вниз.

Следует иметь в виду, что труба дает перевернутое изображение, поэтому наблюдатель будет видеть, что при наличии поля капля движется вниз, при отсутствии поля — вверх.

Определяют скорость падения капли, измеряя секундомером время прохождения капель несколько (не менее трех) делений окулярного микрометра. Затем снова накладывают электрическое поле и измеряют уже скорость подъема той же капельки, отсчитывая время, затрачиваемое капелькой на прохождение того же числа делений окулярного микрометра. Перемещения данной капельки вверх и вниз повторяют много раз (не менее 15 в каждую сторону) своевременным включением и выключением поля.

Необходимо провести измерение не менее чем для восьми различных капелек, из которых некоторые должны обладать зарядом противоположного знака. При наблюдении за каплей, несущей противоположный заряд, надлежит соответственно изменить полярность пластин конденсатора, чтобы обеспечить движение капли вверх при наложении поля. Для этого служит переключатель S_2 .

В процессе измерения возможна перезарядка капельки, что резко меняет скорость ее подъема.

Пластины конденсатора K при измерениях должны находиться в строго горизонтальном положении. Правильность установки

может быть проверена с помощью уровня или по отсутствию систематического движения капелек вправо или влево в поле зрения трубы. Строго горизонтальное положение пластин конденсатора может быть придано с помощью установочных винтов.

Обработка результатов измерений. Считая поле в центре конденсатора однородным, формулу (4) можно переписать в виде

$$e = \frac{9\sqrt{2} \pi d \eta^{3/2} p^{3/2} S^{3/2}}{U(\sigma - \rho)^{1/2} g^{1/2}} \frac{1}{t^{1/2}} \left(\frac{1}{t_g} + \frac{1}{t_E} \right) = Ke^* \quad (5)$$

где U — разность потенциалов на пластинах конденсатора, d — расстояние между пластинами, S — цена деления окулярного микрометра, t_g — время прохождения капель P делений окулярного микрометра в отсутствие электрического поля, t_E — то же при наличии электрического поля.

В формуле (5) выражение

$$e^* = \frac{1}{t^{1/2}} \left(\frac{1}{t_g} + \frac{1}{t_E} \right) \quad (6)$$

можно рассматривать, как численное значение заряда капли, выраженное в некоторых относительных единицах. Величина K остается постоянной для всех капель при неизменном напряжении на конденсаторе и одном и том же числе делений окулярного микрометра, проходимых каждой каплей.

Результаты измерений рекомендуется представить в виде таблицы

t_g	t_E	$e^* = \frac{1}{t^{1/2}} \left(\frac{1}{t_g} + \frac{1}{t_E} \right)$	Δe^*	Δn	$e_0^* = \frac{\Delta e^*}{\Delta n}$	n	$e_0^* = \frac{e^*}{n}$	a

В первой и второй графах записываются соответственно время опускания и время подъема капли, усредненные для ряда наблюдений за движением капли с одним и тем же зарядом. Изменение заряда капли, сопровождающееся резким изменением скорости, происходит довольно редко, вследствие чего мы получаем ряд значений скорости для одного и того же заряда. Разброс скоростей в этом случае относится к погрешностям эксперимента. В третьей графе записывается заряд капли в относительных единицах. В четвертой графе помещаются разности между двумя последующими числами третьей графы. Эти разности являются численными значениями изменения заряда капель, выраженного в относительных единицах. Если эксперимент был проведен достаточно тщательно, то при рассмотрении чисел четвертой графы

можно заметить, что они являются приблизительно целыми кратными некоторого числа e_0^* .

Числа кратности Δn , округленные до целого, выписываются в пятой графе.

Разделив величину изменения заряда на соответствующую ему кратность, получим ряд численных значений для элементарного заряда e_0^* в относительных единицах (шестая графа).

Если рассмотреть числа третьей графы, можно убедиться, что они также являются приблизительно целыми кратными некоторых чисел, совпадающих с числами шестой графы. Числа кратности n , округленные до целого, выписываются в седьмой графе.

Численные значения элементарного заряда e_0^* (в относительных единицах), полученные путем деления величин заряда (третья графа) на соответствующие кратности (седьмая графа), записываются в восьмой графе. Как указано выше, числа, помещенные в шестой и восьмой графах, должны примерно совпадать.

Представленные в таблице результаты должны явиться доказательством того, что изменение заряда капельки происходит конечными порциями и что заряд капельки состоит из целого числа элементарных зарядов, равных по величине наименьшей порции изменения заряда.

Абсолютное значение элементарного заряда e_0 вычисляется из соотношения (5):

$$e_0 = Ke_0^*$$

За величину e_0^* следует взять среднее из всех экспериментально определенных относительных значений элементарного заряда.

Для каждой наблюдаемой капельки по формуле (2) следует вычислить радиус капельки a (девятая графа).

В применяемом приборе среднее расстояние между пластинами конденсатора $d=0,72$ см; цена деления окулярного микрометра $S=0,036$ см; плотность масла $\sigma=0,91$ г/см³; плотность воздуха $\rho=1,29 \cdot 10^{-3}$ г/см³; коэффициент внутреннего трения воздуха $\eta=1,81 \cdot 10^{-5}$ кг/м·с.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой метод используется в данной работе для определения элементарного заряда?
2. Написать уравнение движения капельки жидкости в поле силы тяжести при отсутствии электрического поля и при наличии электрического поля.
3. Какие явления могут послужить причиной изменения заряда капли?
4. Какие ограничения накладываются на размеры капелек, исследуемых в эксперименте, и почему?
5. Какие причины влияют на точность измерения заряда капелек?

6. Почему нежелательно наличие в пространстве между пластинами конденсатора капелек с большим зарядом?
7. Каков элементарный заряд в системах СИ и СГСЕ?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985.

Лабораторная работа 4

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОМПЕНСАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Цель настоящей лабораторной работы заключается в изучении компенсационных методов измерения электродвижущих сил, токов и сопротивлений и в применении этих методов к некоторым конкретным случаям.

Метод компенсации является в настоящее время одним из основных приемов точных лабораторных электрических измерений.

Метод компенсации

Сущность метода можно понять, анализируя принципиальную схему измерений, изображенную на рис. 1. В этой схеме \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 — источники ЭДС с внутренними сопротивлениями r_1 и r_2 , R_1 и R_2 — соответственно сопротивления участков цепи AB и BC . Обратим внимание на то, что источники электродвижущих сил соединены друг с другом одноименными полюсами. Обозначим через r_3 сопротивление подводящих проводов от элемента \mathcal{E}_1 и через r_4 — сопротивление подводящих проводов от элемента \mathcal{E}_2 . Токи, идущие в отдельных участках схемы, обозначим I , I_1 и I_4 .

Рассмотрим условия, в которых сила тока I_2 в цепи элемента \mathcal{E}_2 и гальванометра G будет равна нулю. Для этого напишем уравнения первого и второго законов Кирхгофа. Для разветвления токов в точке A имеем

$$I_1 = I + I_2.$$

Для контуров $\mathcal{E}_1 ABC \mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2 AB \mathcal{E}_2$ можем написать

$$I_1 R_1 + I(R_2 + r_1 + r_3) = \mathcal{E}_1, \quad I_1 R_1 + I_2(r_2 + r_4) = \mathcal{E}_2.$$

Решая совместно написанные уравнения при условии, что сила тока в цепи элемента \mathcal{E}_2 равна нулю ($I_2 = 0$), находим, что это будет иметь место, когда

$$\mathcal{E}_2 = I_1 R_1 = \frac{\mathcal{E}_1 R_1}{r_1 + r_3 + R_1 + R_2}. \quad (1)$$

Полученное условие означает, что сила тока в цепи элемента \mathcal{E}_2 равна нулю в том случае, когда падение напряжения на участке цепи AB , параллельно которому присоединен элемент \mathcal{E}_2 , равно электродвижущей силе этого элемента, т. е. компенсирует его.

От слова «компенсация» и получил свое название метод измерений, называемый *компенсационным*. Сущность его будет разъясняться ниже.

Если вместо элемента \mathcal{E}_2 ввести другой элемент \mathcal{E}_3 и вновь добиться отсутствия тока в цепи гальванометра и этого элемента (сохраняя неизменным значение общего сопротивления контура $\mathcal{E}_1 ABC \mathcal{E}_1$), то сопротивление участка цепи AB будет равно некоторому значению R_1' . Теперь будет иметь силу равенство

$$\mathcal{E}_3 = \frac{\mathcal{E}_1 R_1'}{r_1 + r_3 + R_1}. \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) легко находим

$$\frac{\mathcal{E}_3}{\mathcal{E}_2} = \frac{R_1'}{R_1}.$$

Если электродвижущая сила элемента \mathcal{E}_2 известна, например, если это нормальный элемент, имеющий электродвижущую силу \mathcal{E}_N , то, зная R_1 и R_1' , мы можем из последнего равенства определить электродвижущую силу элемента \mathcal{E}_3 . Таким образом, сравнение электродвижущих сил двух элементов может быть практически сведено к сравнению двух сопротивлений, использованных при компенсационных измерениях.

Метод компенсации для измерений электродвижущих сил обладает рядом существенных достоинств. Во-первых, сила тока через элементы, электродвижущие силы которых сравниваются между собой, близка к нулю. Поэтому падения напряжения внутри элемента, снижающего значение измеренной на полюсах элемента разности потенциалов, практически нет. В этом методе ток через элемент при использовании чувствительного зеркального гальванометра может быть уменьшен до значения 10^{-9} – 10^{-10} А. Соответственно не играет также роли и падение напряжения в проводах, соединяющих элемент с измерительной схемой. Во-вторых, при компенсационном методе измерений гальванометр работает как нулевой прибор, и градуировка его шкалы в результате измерений не входит. Сопротивления, входящие в окончательное выражение, могут быть в настоящее время измерены с точностью до сотых долей процента. Наконец, величина электродвижущей силы вспомогательной батареи \mathcal{E}_1 также не входит в окончательный результат. Необходимо лишь, чтобы значение ее электродвижущей силы во время измерений было постоянным, кроме того, электродвижущая сила должна превышать электродвижущие силы сравниваемых элементов. Такую роль может с успехом выполнять батарея аккумуляторов.

Компенсационный метод измерения электродвижущих сил используется, в частности, для измерения электродвижущих сил термоземелетов, применяемых для измерения температуры. Метод компенсации позволяет достигать точности до 0,03% от измеряемой величины.