



**7-2**

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Иркутский государственный университет»  
(ФГБОУ ВПО «ИГУ»)

# **Движение заряженных частиц в электрическом поле конденсатора**

*Методические рекомендации*

Иркутск 2012

## Движение заряженных частиц в электрическом поле конденсатора

Цель работы:

1. Изучить особенности движения заряженных частиц в электрических полях.
2. Определить заряд и массу некоторых частиц. Идентифицировать эти частицы.

### Краткая теория

Уравнения движения материальной точки в общем виде записываются следующим образом:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}; \quad \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{a}; \quad \vec{F} = m\vec{a} = m\frac{d\vec{v}}{dt}; \quad (1)$$
$$d\vec{r} = \vec{v} dt; \quad d\vec{v} = \vec{a} dt; \quad \vec{v} = \vec{a} t; \quad \vec{r} = \int \vec{a} t dt = \frac{\vec{a} t^2}{2};$$

где  $\vec{r}$  - радиус-вектор с компонентами  $r_x, r_y, r_z$ , определяющий положение точки в пространстве,  $\vec{F}$  - сила, действующая на материальную точку,  $m, \vec{v}, \vec{a}$  - её масса, скорость и ускорение,  $t$  - время.

В проекциях на оси координат можно записать (рис. 1)

$$\frac{dx}{dt} = v_x; \quad dx = v_x dt; \quad F_x = m \frac{dv_x}{dt};$$
$$\frac{dy}{dt} = v_y; \quad dy = v_y dt; \quad F_y = m \frac{dv_y}{dt}; \quad (2)$$
$$\frac{dz}{dt} = v_z; \quad dz = v_z dt; \quad F_z = m \frac{dv_z}{dt};$$

Движение заряженных частиц в электрическом поле обусловлено действием на них силы, равной

$$\vec{F} = q\vec{E},$$

где  $\vec{E}$  - вектор напряженности электрического поля. Если эта напряженность постоянна во времени и в пространстве, то поле называется однородным (рис. 2). Например, поле одной заряженной плоскости или поле внутри заряженного конденсатора.

Рассмотрим несколько частных случаев движения заряженных частиц в однородном электрическом поле.

1. Пусть в электрическом поле находится заряд, начальная скорость которого равна нулю  $\vec{v}_0 = 0$ . На этот заряд будет действовать сила  $\vec{F}$ , и он получит ускорение  $\vec{a}$  в соответствии со вторым законом Ньютона

$$\vec{F} = m\vec{a} = m\frac{d\vec{v}}{dt} = q\vec{E}; \quad \vec{a} = \frac{q}{m}\vec{E}. \quad (4)$$

Заряженные частицы движутся в электрическом поле равноускоренно. При этом вектора  $\vec{F}$  и  $\vec{a}$  совпадают по направлению с вектором  $\vec{E}$ , если  $q > 0$ , или имеют противоположное направление, если  $q < 0$  (рис. 2), т. е. движение осуществляется вдоль силовой линии электрического поля. В этом случае уравнение движения имеет вид:

$$\begin{aligned} dv_x &= a \cdot dt = \frac{qE}{m} dt; & v_x &= \int_0^t a \cdot dt = a \cdot t; & v_x &= \frac{qE}{m} t; \\ a &= \frac{qE}{m} = const; & x &= \int_0^t v_x dt = \int_0^t at dt = \frac{at^2}{2}; & x &= \frac{qE}{m} \frac{t^2}{2}. \end{aligned} \quad (5)$$

2. Пусть заряд влетает в электрическое поле вдоль силовой линии с некоторой начальной скоростью  $\vec{v}_0$  и запасом кинетической энергии  $\frac{mv_0^2}{2}$ . Его движение будет равноускоренным при совпадении векторов  $\vec{v}_0$  и  $\vec{E}$ . При этом кинетическая энергия возрастает на величину  $q\Delta\varphi$ , где  $\Delta\varphi$  - ускоряющая разность потенциалов электрического поля:

$$W = \frac{mv^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2} + q\Delta\varphi. \quad (6)$$

Это положено в основу принципа действия ускорителей заряженных частиц любого типа.

При движении частицы против сил поля ( $\vec{v}$  и  $\vec{E}$  антипараллельны) ее скорость уменьшается и становится равной нулю, когда  $\frac{mv_0^2}{2} = q\Delta\varphi$ . Затем частица будет двигаться равноускоренно в противоположную сторону вдоль силовых линий электрического поля в соответствии с уравнением (5).

В общем случае уравнения движения могут быть записаны следующим образом:

$$v_x = v_0 \pm \frac{qE}{m} t; \quad x = v_0 t \pm \frac{qE}{m} \frac{t^2}{2}. \quad (7)$$

3. Пусть заряд движется в плоскости  $XOY$ ,  $v_z = 0$  и влетает в электрическое поле конденсатора вдоль оси  $X$  перпендикулярно его силовым линиям. Вектор  $\vec{E}$  направлен вдоль оси  $Y$  (рис. 3). Тогда уравнения движения будут иметь вид:

$$\begin{cases} v_x = v_0 = const; & x = v_x \cdot t; \\ v_y = a_y t = \frac{qE}{m} t; & y = \frac{qE}{m} \frac{t^2}{2}; \end{cases} \quad (8)$$

Движение частицы в этом случае будет определяться равномерным движением вдоль оси  $X$  со скоростью  $v_0$ , которая сохраняется постоянной в течение всего движения, и равноускоренным – вдоль оси  $Y$  с ускорением  $a = \frac{qE}{m}$ . Время нахождения заряда в электрическом поле

конденсатора  $t = \frac{x}{v_0}$  определяет величину отклонения заряда  $y$  от прямолинейного движения.

Исключив  $t$  в уравнениях (8), получим уравнение параболы

$$y = \frac{q E}{2 m v_0^2} x^2. \quad (9)$$

Итак, если частица влетает в электрическое поле перпендикулярно силовым линиям, она движется по параболе со скоростью  $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}_y$ , которая является касательной к траектории движения, и отклоняется на величину  $y$ . За пределами электрического поля частица движется равномерно и прямолинейно вдоль вектора конечной скорости  $\vec{v}$ , приобретенной на выходе из конденсатора.

Учитывая, что  $E = \frac{U}{d}$ , где  $U$  – разность потенциалов на пластинах конденсатора,  $d$  – расстояние между ними, перепишем формулу (9) при условии  $x = l$ , где  $l$  – длина пластин конденсатора:

$$y = \frac{q}{m} \frac{U l^2}{2 v_0^2 d} \quad \text{или} \quad \frac{q}{m} = \frac{v_0^2 2 d}{U l^2} y. \quad (10)$$

Эта формула позволяет определить величину удельного заряда  $\frac{q}{m}$  частицы, изучая ее движение в однородном электрическом поле заряженного конденсатора.

В лабораторной работе предлагается определить удельный заряд  $\frac{q}{m}$ , заряд  $q$  и массу  $m$  произвольно выбранных трех частиц из шести заложенных в программу, а затем определить, что это за частицы.

Следует отметить, что в программе массы частиц выражены в атомных единицах массы ( $1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ ) и соответствуют атомной массе элемента, которая определяется общим числом протонов и нейтронов в ядре, т. е.

$$m = A = N_p + N_n. \quad (11)$$

Числа протонов и нейтронов для выбранных частиц приняты одинаковыми. Заряды частиц выражены в единицах заряда электрона ( $1e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ ) и содержат произвольное значение  $q = \pm N e$  по знаку и величине.

Для определения величины заряда частиц студент может ионизовать исследуемую частицу (т. е. удалить один электрон) или позволить частице захватить один или несколько электронов (рекомбинация).

## Порядок выполнения работы

Задача: меняя скорость частицы, напряжение на пластинах и надбавку к заряду частицы, определить, что это за частица влетает в конденсатор.

1. По указанию преподавателя выбрать 3 частицы из 6 возможных вариантов. Провести исследование для каждой частицы по определению ее заряда и массы.

2. На экране компьютера должен быть изображен конденсатор. Запрашивается номер варианта. Нажмите цифровую клавишу от 1 до 6, соответствующую выбранному варианту. Запуск программы на всех этапах работы осуществляется нажатием клавиши “Enter”.

3. На экране запрашиваются значения напряжения на обкладках конденсатора  $U$  и начальной скорости  $v_x$  частиц, влетающих в конденсатор вдоль оси  $X$ . Задайте произвольно значения  $U$  и  $v_x$ . Пронаблюдайте за движением заряженной частицы в электрическом поле.

4. Вопрос “repeat  $k=1$ ” подразумевает положительный ответ “1”, что позволяет повторить движение частицы с другими значениями  $U$  и  $v_x$ . Следует подобрать  $U$  и  $v_x$  так, чтобы частица вылетала за пределы конденсатора, а затем взять отсчет величины  $y$  по шкале справа на экране, приняв одно большое деление равным  $\pm 0,10$ , а максимальное отклонение частицы  $y = \pm 0,50$ . Полученные значения  $U$ ,  $v_x$ ,  $y$  и знак заряда занести в таблицу.

№ варианта	$U$	$v_x$	$y$	Знак заряда	$\frac{q}{m}$	$dQ$	$q = Ne$	$m$ , а.е.м.	$N_p$	$N_n$	Частица

5. Величину удельного заряда частицы  $\frac{q}{m}$  можно определить по формуле (10). Следует учесть, что размер конденсатора, изображенного на экране, выбран из условия  $l = 2d$  (где  $d$  – расстояние между пластинами в делениях, можно определить по экрану), тогда формула (10) принимает вид

$$\frac{q}{m} = \frac{v_x^2}{U} \cdot \frac{y}{2d}. \quad (12)$$

По этой формуле вычислите значение удельного заряда и занесите его в таблицу.

Примечание: при вычислении удельного заряда его величину необходимо представить в виде обыкновенной дроби, сделав округление знаменателя до целых величин. Это легко осуществить, если изначально искать обратную величину, т. е.  $\frac{m}{q}$ .

Определение  $\frac{q}{m}$  необходимо проделать 5-6 раз для различных значений  $U$  и  $v_x$ , чтобы

повысить точность вычисления массы частицы.

Примечание к варианту № 6. Значения напряжения  $U$  необходимо задавать порядка 0,01 В и менее при скорости частицы  $v_x = 1 \frac{M}{c}$ .

6. Следующий этап работы состоит в определении истинной величины заряда путем использования метода ионизации или рекомбинации. Для этого на вопрос “change k=2” следует нажать клавишу “2” и перейти в часть программы по определению заряда частицы путем его изменения на величину, кратную заряду электрона  $dQ = \pm 1, \pm 2$  и т. д. (т.е. добавляя к истинному заряду частицы некоторую надбавку). Последующее изучение движения этой новой частицы с измененным зарядом в электрическом поле конденсатора позволяет определить истинный заряд исследуемой частицы: *если частица при некотором  $dQ$  полетит прямолинейно (по центру), то истинный заряд частицы равен  $q = -dQ$ .*

7. Вычислите массу, число протонов и нейтронов по формуле (11), определите саму частицу и запишите ее в виде  ${}^A_z X^{\pm q}$ , например,  ${}^6_3 Li^{+1}$ .

8. При завершении работы по определению типа частицы одного варианта переходите к другому варианту. Для этого на вопрос “k = ?” нажмите клавишу “3”, а затем - клавишу “Enter”. Повторите пункты 2-6 и определите новую частицу.

### Контрольные вопросы

1. Расскажите о строении атома и иона. В чем их различие? Какие частицы называются изотопами?
2. Что представляют собой процессы ионизации и рекомбинации? Они протекают с поглощением или выделением энергии?
3. Расскажите об электрическом поле и его характеристиках. Дайте определение  $E$  и  $\varphi$ .
4. Опишите электрическое поле конденсатора. Укажите связь  $E$  и  $\varphi$ .
5. Как движется частица в электрических полях? Запишите уравнение движения.
6. В каком случае осуществляется движение частицы по параболе? Запишите уравнение движения.