

УДК 538.3.322

И. Н. Алиев, П. П. Полуэктов,
А. Ф. Наумов

СПОНТАННОЕ ВРАЩЕНИЕ АЭРОЗОЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ В СЛАБОИОНИЗИРОВАННОМ ГАЗЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Представлены расчеты, описывающие формирование дипольного момента аэрозольной частицы в ионизированном газе и возникающее при этом вращательное движение частиц относительно оси, перпендикулярной внешнему электрическому полю. На основе полученных уравнений определена зависимость угловой скорости вращения частиц от размеров частиц и интенсивности внешнего электрического поля.

Во внешнем электрическом поле возникает дрейф ионов, вследствие чего изменяются условия накопления зарядов на аэрозолях; например, в постоянном электрическом поле происходит существенное увеличение зарядов радиоактивных аэрозольных частиц [1]. Как показано ниже, формирование дипольного момента за счет осаждения на частице ионов, дрейфующих в электрическом поле, имеет свои особенности. Действительно, представим неподвижную частицу, которая не может совершать повороты в пространстве. Тогда за счет осаждения ионов, дрейфующих в электрическом поле, на частице формируется дипольный момент, направленный противоположно электрическому полю. Положение такой частицы неустойчиво. Поскольку в действительности частица в пространстве не фиксирована, при малейшем ее повороте возникает опрокидывающий момент, отличный от нуля, приводящий к вращению частицы. Возможность непрерывных вращений частицы рассмотрена в работе [2]. В результате наблюдается следующая картина: во внешнем электрическом поле частица приходит во вращение относительно какой-либо оси, перпендикулярной электрическому полю, причем направление этой оси произвольно и определяется начальным дипольным моментом частицы; переход от хаотических вращательных движений, связанных с флуктуирующим дипольным моментом частицы, к динамическому вращению происходит при превышении определенных значений поля.

Выпишем уравнения, описывающие формирование дипольного момента при вращении частицы. В плоскости, перпендикулярной оси

вращения, от направления вектора электрического поля будем отсчитывать угол φ , тогда угловая скорость вращения частицы будет $\omega = \dot{\varphi}$. Для плотности заряда на поверхности, соответствующей углу φ , введем обозначение $q(\varphi)$, в этом случае полный заряд определяется интегралом $\int_0^{2\pi} q(\varphi) d\varphi$, аналогично находится дипольный момент.

Если предположить, что можно пренебречь искажениями, создаваемыми зарядом частицы, поскольку ионы движутся по силовым линиям внешнего поля, то удельная (отнесенная к единичной площади) плотность потока заряда на поверхность (которая получается с использованием выражений для j_{\pm}) в однородном электрическом поле равна $-en_+\mu_+E \cos \varphi$. Здесь E — напряженность внешнего поля, $n_+ + = n_-$, а также $\mu_+ = \mu_-$, n, μ — концентрация и подвижность ионов соответственно. Тогда для кинетики накопления заряда имеем уравнение

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -en_+\mu_+E \cos \varphi - \omega \frac{\partial q}{\partial \varphi}.$$

Последний член учитывает перенос заряда за счет вращения частицы. Для стационарного состояния, когда $\frac{\partial q}{\partial t} = 0$, из этого уравнения имеем $q = q_0 \sin \varphi$, где $q_0 = en_+\mu_+E/\omega$. В результате частица приобретает дипольный момент, перпендикулярный вектору электрического поля и оси вращения:

$$d_{\perp} = \frac{3}{2}Vq_0,$$

где V — объем частицы. В электрическом поле на этот диполь действует момент сил, направленный по оси вектора $\vec{\omega}$. Уравнение вращательного движения имеет вид

$$I \frac{\partial \omega}{\partial t} = d_{\perp}E - \beta \omega,$$

где последний член связан с трением при вращении частицы. Если размер частицы больше длины пробега молекулы газа ($\approx 0,05$ мкм для воздуха при нормальных условиях), то $\beta = \sigma \eta V$. В стационарных условиях, когда левая часть уравнения движения равна нулю, имеем

$$\omega = \frac{d_{\perp}E}{\beta}.$$

Комбинируя выражения для d_{\perp} и ω , найдем

$$\omega = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{n_+ D_+}{kT \eta}} eE, \quad d_{\perp} = 3eV \sqrt{\frac{n_+ D_+ \eta}{kT}}.$$

Можно отметить особенности полученных формул:

1) частицы различного размера вращаются с одинаковой скоростью (хотя, конечно, оси вращения их различны в плоскости, перпендикулярной направлению поля);

2) скорости вращения частиц прямо пропорциональны внешнему электрическому полю;

3) дипольные моменты не зависят от величины поля и так же, как флуктуирующие диполи, пропорциональны.

Последнее означает, что, например, для сред различной вязкости поведение частиц в поле будет определяться флуктуирующими дипольными моментами, или моментами, возникающими за счет осаждения дрейфующих в поле ионов.

Приведем оценку скорости вращения. Для $n_+ \simeq 10^7 \text{ см}^{-3}$ в полях $E \simeq 10^3 \text{ В/см}$ для нормальных условий ($kT \simeq 4 \cdot 10^{-14} \text{ эрг}$, $D \simeq 0,03 \text{ см}^2/\text{с}$) имеем $\omega = 3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Таким образом, формирование дипольного момента аэрозольной частицы в ионизированном газе при постоянном электрическом поле сопровождается возникновением вращательного движения частиц относительно произвольной оси, перпендикулярной внешнему полю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириченко В. Н., Иванов В. Д. Кинетика униполярной зарядки бета-активных “горячих” частиц в электрическом поле // ДАН СССР. – 1969. – Т. 188, № 2. – С. 315–317.
2. Верещагин И. П., Левитов В. И., Мирзабекян Г. З., Пашин М. М. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. – М.: Энергия, 1974. – 480 с.

Статья поступила в редакцию 01.06.2005

Исмаил Новрузович Алиев родился в 1945 г., окончил в 1969 г. Московский инженерно-физический институт (МИФИ). Д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 научных работ в различных областях физики.

I.N. Aliev (b. 1945) graduated from the Moscow Engineer and Physical Institute in 1969. D. Sc. (Phys.-Math.), professor of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 60 publications in the various fields physics.