

03;12

## Электрическое поле, сопровождающее движение тел в воздухе

© Ю.К. Бивин

Институт проблем механики РАН,  
119526 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 3 февраля 2011 г.)

Приведены экспериментальные исследования электризации воздушного потока, возникающей при движении тел из различных материалов. Опыты проведены путем регистрации потенциала, возникающего на кольцевой антенне при пролете сквозь нее тела. Установлено, что движение тела сопровождается движением двух зарядов разного знака. Определено расположение зарядов относительно летящего тела в зависимости от его длины. Рассмотрены некоторые параметры процесса, влияющие на величину заряда. Показана возможность определения кинематики тела путем регистрации электрического поля, сопровождающего движение тела.

Известно, что при ударном сжатии различных материалов (диэлектрики, полупроводники, проводящие материалы) в окрестности интенсивных динамических деформаций, приводящих к разрушению, возникает электрическое поле. Обзор ранних работ на эту тему опубликован в 1976 г. [1]. Регистрируя это поле, можно определить начало и конец процесса удара. Электреты (диэлектрики, которые длительное время сохраняют электрический заряд) могут быть использованы в качестве датчиков перемещений и деформаций в изучении не только динамических механических процессов [2]. Электрическое поле, возникающее при динамическом проникании в грунтовые среды твердых тел, как показано в [3], сопровождает не только ударные процессы. В [4] приведены результаты исследования электрического поля, возникающего при упругих колебаниях балок или при прохождении упругого импульса деформаций вдоль стержня. В работе использовались различные материалы, первоначально электрически нейтральные. Это позволило установить связь между характеристиками поля и механическим напряженным состоянием твердых тел, поскольку параметры этого состояния были известны.

В настоящей работе в более сложном механическом процессе — движение различных тел в атмосфере — изучаются сопутствующие механическому процессу обтекания различных тел характеристики электризации, устанавливается их взаимосвязь. Это позволило определить некоторые параметры механического процесса.

Опыты проводились по схеме, представленной на рис. 1. Здесь 1 — пневматическая пушка, калибр ствола которой 10 мм, 2 — выстреливаемое тело, 3 — кольцевые антенны, 4 — антенна в виде металлической трубки, 5 — осциллограф. В качестве рабочей среды в пневмопушке использовался воздух. Выстрел производился телом диаметром  $D = 10$  мм различной длины и из различных диэлектрических материалов, а также из стали и алюминиевого сплава. Одна из кольцевых антенн в каждом эксперименте представляла бронзовое кольцо диаметром 47 мм, шириной 2.5 мм

и толщиной 1 мм. Вторая антенна чаще всего была таким же кольцом, но иногда использовались антенны диаметром 30 мм, 80 мм или 110 мм из медной проволоки диаметром 1 мм. Трубчатая антенна представляла алюминиевую трубу длиной 420 мм, диаметром 40 мм, с толщиной стенки 1.5 мм. Точка присоединения кабеля осциллографа делила длину трубки пополам.

Выстрел производился по нормали к плоскости кольцевых антенн, а их центры и ось трубы располагались на линии стрельбы. Скорость полета метаемого тела, как показали параллельные измерения с помощью фотодатчиков, можно определять по осциллограммам кольцевых антенн. Испытания проводились в диапазоне скоростей 20–200 м/с. Для регистрации сигналов с антенн использовался четырехканальный осциллограф LeCroy типа WaveSurfer 24Xs с полосой пропускания 200 МГц.

Вид осциллограмм, записанных с помощью антенн диаметром 47, показан на рис. 2. Здесь 1 — сигнал с ближней к стволу антенны, 2 — сигнал с антенны, расположенной на расстоянии 20 см от первой. Выстрел производился капронитовым цилиндром длиной 32 мм. Скорость полета можно определять как по разности времени перехода осциллограмм через нуль, так и по разности достижения соответствующих максимумов.

Проанализируем полученные осциллограммы. Изменение полярности сигнала, регистрируемого кольцевой антенной, может быть связано с прохождением сквозь нее двух зарядов противоположного знака, как показано

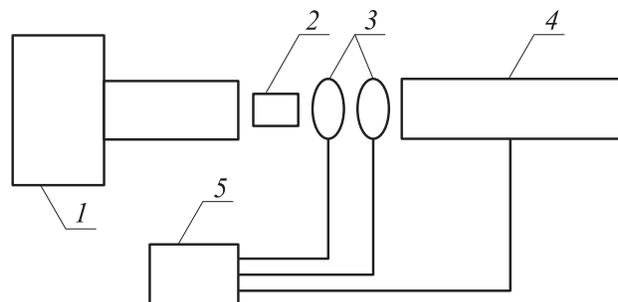
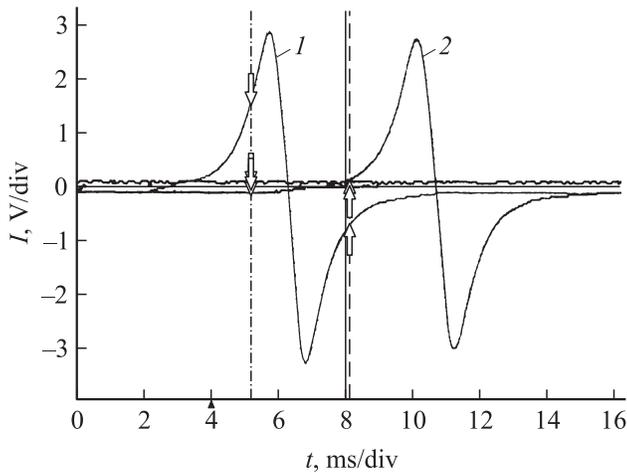
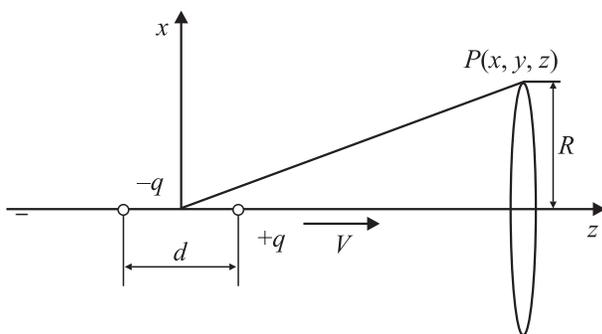


Рис. 1. Схема эксперимента.



**Рис. 2.** Оциллограмма пролета капронитового цилиндра сквозь кольцевые антенны.



**Рис. 3.** Расчетная схема.

на рис. 3. Буквой  $q$  обозначены заряды указанных знаков,  $d$  — расстояние между ними,  $R$  — радиус кольца. Начало координат делит расстояние между зарядами пополам. Потенциал  $\varphi(x, y, z)$  в точке  $P(x, y, z)$  запишется

$$\varphi(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{q}{\sqrt{\left(z - \frac{d}{2}\right)^2 + x^2 + y^2}} + \frac{-q}{\sqrt{\left(z + \frac{d}{2}\right)^2 + x^2 + y^2}} \right].$$

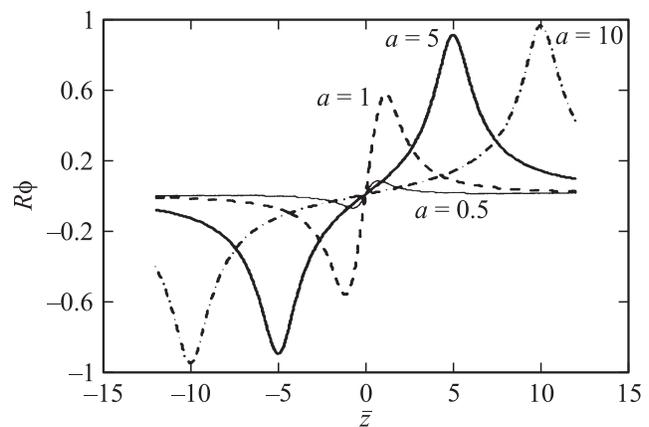
В нашем случае  $x^2 + y^2 = R^2$ . Вынося  $R^2$  за скобку, опуская множитель  $4\pi\epsilon_0 q$  и обозначая  $d/2R = a$ , а отношение  $z/R$  — символом  $\bar{z}$ , получим при равных по абсолютной величине зарядах:

$$R\varphi(x, y, z) = \left[ \frac{1}{\sqrt{(\bar{z} - a)^2 + 1}} - \frac{1}{\sqrt{(\bar{z} + a)^2 + 1}} \right].$$

На рис. 4 показан результат вычисления зависимости  $R\varphi$  (ось ординат) от расстояния  $\bar{z}$  зарядов до кольца (ось абсцисс). Очевидно, такой же характер изменения имеет и потенциал  $\varphi$ . Из сравнения рис. 2

и 4 можно установить, что при постоянной скорости движения тела  $V$ , когда  $z = Vt$ , по оси абсцисс в обоих случаях изменяется только масштаб. Вид оциллограмм, регистрирующих потенциал  $\varphi$ , соответствует результату его вычислений. Некоторое изменение вида графиков с изменением значения величины  $a$  позволяет более тесно связать вычисления и оциллограммы. Видно, что расчетная кривая при  $a = 1$  на участке прохождения через нуль соответствует ходу оциллограмм, а при  $a = 5$  и  $10$  их кривизна другая. На рис. 4 максимумы и минимумы кривых соответствуют значению  $\bar{z} \approx \pm a$  при  $a \geq 1$ . С учетом введенных обозначений это приводит к тому, что расстояние между максимумом и минимумом на кривой равно расстоянию между зарядами  $d$ . Зная скорость полета пули  $V$  и время  $T$  между максимумом и минимумом на оциллограмме рис. 2, можно вычислить реальное значение  $d = VT$ . При известном значении  $R$  получим ответ, какому значению  $a$  соответствует расчетная кривая. На приведенной оциллограмме  $T = 1$  ms. При скорости  $V = 46.5$  m/s получаем  $d = 4.65$  cm. В этом случае  $a = 0.989$ . Именно при этом значении  $a$  вид расчетной кривой совпадает с видом оциллограммы.

Чтобы выяснить, с чем связано образование двух разнесенных зарядов при движении твердого тела в воздухе, были проведены следующие опыты. В экспериментах с различными диэлектрическими материалами выстрелы всегда производились то одним концом тела вперед, то другим. Результат был одним и тем же для конкретного тела при равной скорости движения: форма сигнала, порядок смены его знака и величина. Кроме того, вычисленное расстояние между зарядами всегда превосходило длину тела, а выстрелы производились телами длиной  $D \leq L \leq 14D$ . И чем короче тело, тем различие было больше. Это позволяет предположить отсутствие предварительной поляризации диэлектрика. Еще один результат в оправдание этого предположения:



**Рис. 4.** Результат вычисления потенциала на кольцевой антенне при прохождении через нее двух зарядов разного знака для различных отношений расстояния между зарядами к диаметру кольца.

чем выше скорость движения, тем выше уровень сигнала в диапазоне скоростей 20–200 м/с.

Для того чтобы установить положение зарядов относительно движущегося тела, были проведены эксперименты по такой схеме. Пневматическая пушка на конце ствола имела устройство для измерения скорости вылета тела, основанное на использовании двух фотодиодов, расположенных на расстоянии 100 мм друг от друга по оси пушки. Они были подключены к двум первым каналам осциллографа. Два следующих канала были подключены к кольцевым антеннам, как показано на рис. 1. Скорости полета пули, определенные по показаниям фотодиодов и по показаниям кольцевых антенн на соответствующих базах, совпадали. А скорость, вычисленная на основании показаний фотодиода, на конце ствола и антенны на определенном расстоянии от него была другой. Запись показаний с фотодиодов позволяет установить момент прохождения места их установки серединой длины тела, а осциллограммы кольцевых антенн — момент, когда заряды окажутся на одинаковом расстоянии от их плоскости. Скорость, вычисленная по показаниям, снятым с фотодиода и с одной из антенн, оказывается меньшей. Это значит, что точка, делящая расстояние между зарядами пополам, движется позади точки, определяющей середину длины тела. Вычисляя относительное расстояние между этими точками на основании осциллограмм, которые также позволяют определить расстояние между зарядами, можно построить картину движения тела и зарядов. Два примера показаны на рис. 5. Вверху — движение фторопластового цилиндра *1* длиной 9,7 мм со скоростью  $V = 200$  м/с (направление показано стрелкой), внизу — цилиндра *1* из того же материала длиной 62 мм со скоростью 80 м/с. Расстояние  $d$  между зарядами в первом случае равно 50 мм, а во втором — 78 мм. В исследованном диапазоне скоростей величина  $d$  слабо зависит от скорости. Нет сильного влияния и типа материала метаемого тела. Но уже на рисунке видна сильная зависимость  $d$  от длины тела. Например, при длине тел из оргстекла 120 мм величина  $d = 113$  мм. Такая же картина получается при проведении опытов

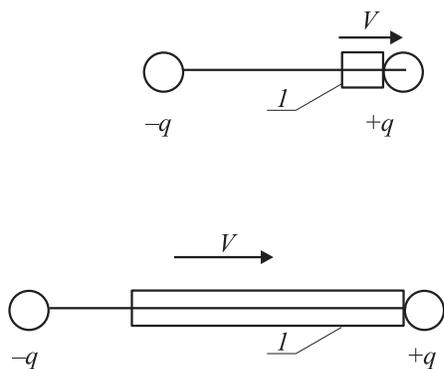


Рис. 5. Положения зарядов относительно движущихся тел разной длины.

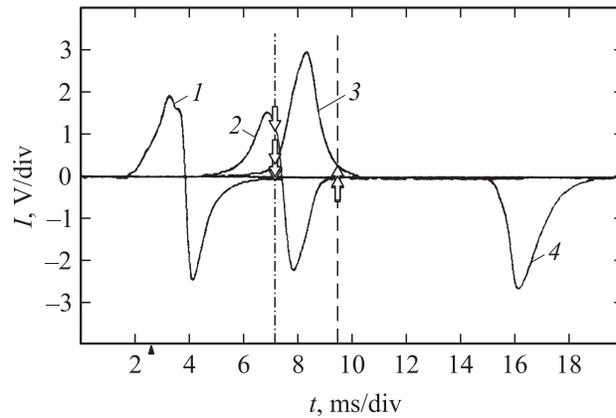


Рис. 6. Сравнение осциллограмм пролета капронитового цилиндра через кольцевые антенны и антенну-трубу.

с цилиндрами из алюминиевого сплава. Как видно, при длине тела  $L \geq 6D$  получается, что  $d \approx L + D$ .

На рис. 6 показана типичная осциллограмма прохождения тел сквозь показанную на рис. 1 трубу. Цифрами 1 и 2 отмечены записи с кольцевых антенн, а 3 и 4 — запись канала, подключенного к трубе (при входе тела в трубу и при выходе). Так как на входе и выходе из трубы сигналы имеют разную полярность, а между ними сигнал нулевой, то, очевидно, в трубу влетают два равных заряда разного знака.

Максимальные напряжения, возникающие на кольцевой антенне диаметром 47 мм при пролете сквозь нее тел из пластиковых материалов, измеряются в вольтах, а из алюминиевого сплава — в милливольтках. В обоих случаях они пропорциональны длине.

При изменении диаметра антенны они соответственно пропорционально изменяются, но так, что в эксперименте произведение  $R\phi(x, y, z)$  остается неизменным. А это, однако, противоречит расчету, так как при изменении радиуса антенны изменяется величина  $a = d/2R$ . Оценка величины  $a$ , данная выше, близка к единице при  $R = 23.5$  мм. При испытаниях иногда использовались одновременно с антенной радиуса 23.5 мм и антенны диаметром 30 мм, 80 мм, 110 мм. А это в области значений  $a \approx 1$  должно приводить к существенному изменению указанного произведения. Это обусловлено тем, что вблизи этого значения величины  $a$  расчетные максимумы произведения  $R\phi(x, y, z)$  сильно зависят от величины  $a$ . Такое несоответствие результатов теории и эксперимента, очевидно, связано с несоответствием предположения о точечном заряде при записи выражения для потенциала. Это подтверждается и тем, что вычисление по экспериментальным данным величины  $d$  в одном и том же эксперименте по осциллограммам антенн различных диаметров дает разные значения: чем больше радиус антенны, тем больше  $d$ . Обнаружено, что в рамках используемых антенн имеет место следующее соотношение:  $d_1/d_2 = \sqrt{R_1/R_2}$ .

Знак первого регистрируемого сигнала зависит от материала метаемого тела. При стрельбе телами из дюрала, оргстекла и капронита вначале идет положительный сигнал, как, например, на рис. 2. У фторопласта, винипласта и эбонита — отрицательный. Значит, вид электризации воздуха определяется природой обтекаемого тела.

## Заключение

1. При движении твердых тел в воздухе возникает его электризация в виде двух зарядов противоположного знака, движущихся вместе с телом.

2. Положения возникающих зарядов таковы, что один располагается непосредственно перед телом, а другой сзади на некотором расстоянии от него.

3. Величина зарядов зависит от природы и длины обтекаемых тел и скорости их движения.

4. Знак заряда, движущегося перед телом, зависит от природы обтекаемого тела.

5. Электризация воздуха, сопровождающая движение в нем тела и неразрывно с ним связанная, позволяет с помощью антенн регистрировать параметры движения тела.

## Список литературы

- [1] *Минеев В.М., Иванов А.Г.* // УФН. 1976. Т. 119. Вып. 1. С. 75–109.
- [2] *Луцкейкин Г.А.* Полимерные электреты. М.: Химия. 1984. 183 с.
- [3] *Бивин Ю.К., Викторов В.В., Чурсин А.С.* // Сб. докл. Пятого всесоюзного съезда по теоретической и прикладной механике. Алма-Ата: Наука, 1981. С. 60–61.
- [4] *Бивин Ю.К.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 6. С. 58–63.