

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

03; 04; 12

Журнал технической физики, т. 59, в. 6, 1989.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ НА ТЕЛАХ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ДВИЖЕНИИ В ВОЗДУХЕ

В. В. Арсеньев, Г. И. Мишин, Ю. Л. Серов, И. П. Явор

Исследование электрических зарядов на телах при их сверхзвуковом движении в воздухе представляет значительный научный и практический интерес, однако в настоящее время этот вопрос изучен мало. Известны работы [1, 2], в которых исследовалось образование зарядов

на трассирующих телах, а также работа [3], в которой обнаружено появление зарядов на телах при их ускорении в стволе.

В настоящей работе приводятся результаты исследования зарядов на сферах, выстреливаемых со скоростями $v > 2000$ м/с в барокамеру, наполненную воздухом. Электрический заряд измерялся с помощью кольцевых электростатических датчиков, расположенных на трассе полета. Схема измерений приведена на рис. 1. Летящее тело, заряд которого, например $-Q$, наводит на датчике заряд $+q$. Разность потенциалов между пластинами конденсатора, измеряемая осциллографом $u_c(t) = q(t)/c$, оказывается пропорциональна заряду тела Q .

На рис. 2 приведены осциллограммы сигналов от полиэтиленовой сферической модели диаметром 20 мм, движущейся со скоростью 2200 м/с в воздухе при нормальном давлении. Отклонение луча вверх соответствует положительному заряду движущегося объекта. Осциллограмма на рис. 2, а соответствует первому датчику, расположенному в начале измерительной трассы. Датчик регистрирует положительный заряд на модели и положительно заряженный след за моделью. Осциллограмма на рис. 2, б соответствует датчику, расположенному в средней части трассы длиной ~ 10 м. На модели регистрируется отрицательный заряд, след за моделью имеет положительный заряд, меньший по сравнению с сигналом, регистрируемым первым датчиком. Датчики, расположенные далее по трассе, регистрируют аналогичные сигналы. Полученные осциллограммы позволяют сделать вывод, что в процессе ускорения в стволе на полиэтиленовой модели и в следе за ней образовался положительный заряд, который релаксировал при взаимодействии с набегающим потоком, и к середине трассы установилось стационарное распределение зарядов с отрицательно заряженной моделью и положительно заряженным следом. На рис. 3 приведены осциллограммы сигналов, полученных в аналогичных условиях с моделями из дюралюминия: а — отрицательный заряд, образующийся при ускорении на таких моделях, след же заряжен положительно; б — стационарное положение. Таким образом, эксперименты показали, что при скоростях 2—2.2 км/с независимо от материала тела за счет взаимодействия с набегающим потоком воздуха ускоренные тела приобретают отрицательный заряд. Наблюдается также длинный сигнал, противоположный полярности в следе.

Заряд, наводимый на электрическом датчике заряженным следом, определяется суммарным действием участков следа в пределах отрезка, определяемого пространственным раз-

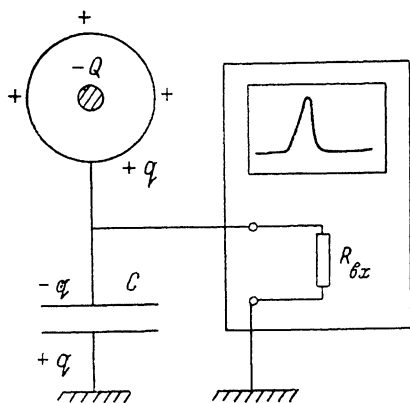


Рис. 1.

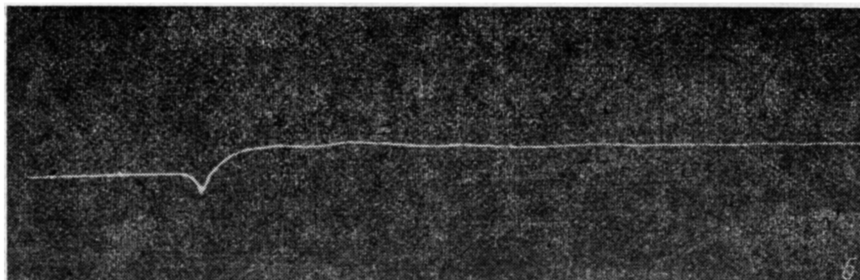
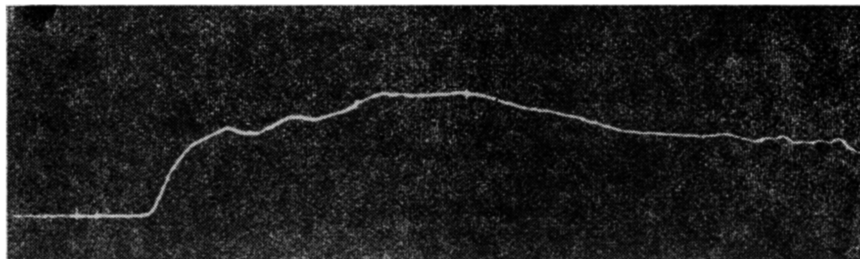


Рис. 2. Сигнал от полиэтиленовой модели.

$R_{вх}=500$ кОм, $C=7100$ пФ; чувствительность 0.01 В/дел, развертка 500 μ S/дел.

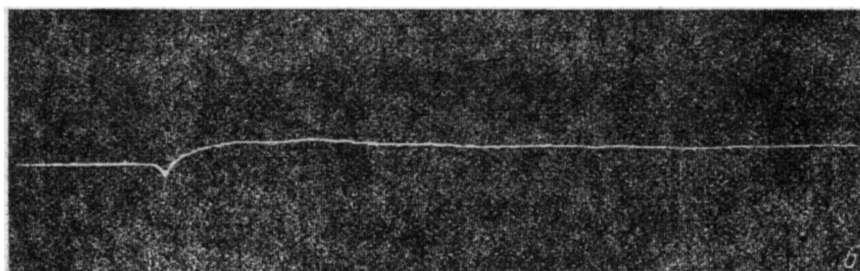
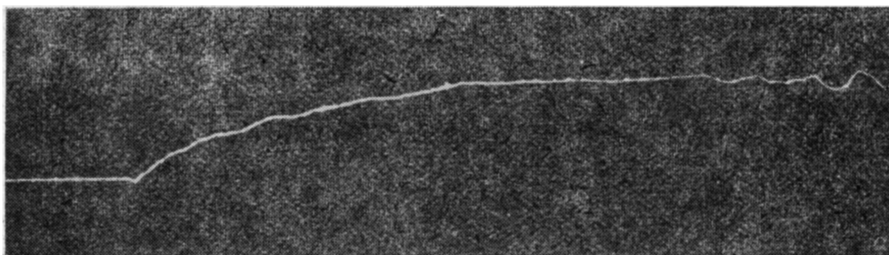


Рис. 3. Сигнал от дюралюминиевой модели.

$R_{вх}$, C ; чувствительность и развертка такие же, как и на рис. 2.

решением датчика. На рис. 4 представлена осциллограмма, полученная с моделью, летящей со скоростью 680 м/с. Положительный заряд приобретен моделью, вероятно, в стволе при выстреле. Приведенная осциллограмма позволяет оценить пространственное разрешение электростатического датчика.

На рис. 5 показано относительное изменение величин сигналов на датчике для различных расстояний от оси датчика. В условиях наших экспериментов датчик чувствует сигнал от модели, находящейся на расстоянии до 10 калибров. В этом случае суммарный сигнал от следа модели протяженностью 20 калибров можно представить в виде

$$u = 2 \sum_{i=0}^{10} g_i u_0, \quad (1)$$

где g_i — статистический вес, определяющий вклад соответствующего участка следа в суммарный сигнал; u_0 — сигнал от центрального участка следа, равного диаметру модели.

В наших экспериментах $u \approx 15u_0$. Отсюда можно определить погонную концентрацию заряда в следе, поскольку $c = cu_0/d$ (d — диаметр модели).

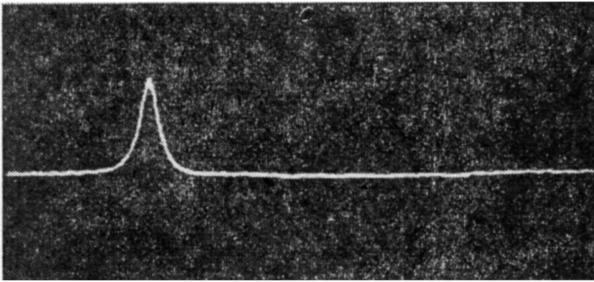


Рис. 4. Сигнал от модели, заряженной при движении в стволе.

$R_{\text{эл}}$, C такие же, как и на рис. 2. Чувствительность 0.05 В/дел, развертка 250 μS /дел.

Сигнал на датчике при прохождении модели складывается из сигнала, создаваемого собственно моделью, а также сигнала, создаваемого ближним следом за моделью. Рассмотрим случай, когда модель находится в среднем сечении датчика. Тогда потенциал на обкладке конденсатора принимает значение

$$u_{\Sigma} = u_M + \sum_{i=1}^{10} g_i u_0. \quad (2)$$

Учитывая (1), получим величину наводимого за счет модели заряда. В случае, когда все силовые линии замыкаются на датчике, этот заряд соответствует заряду модели. Таким образом, в наших экспериментах

$$Q_M = c \left(u_{\Sigma} - u \sum_{i=1}^{10} g_i \middle/ \sum_{i=0}^{10} g_i \right). \quad (3)$$

В эксперименте (рис. 3) заряд на модели составляет величину $Q_M = 3.2 \cdot 10^{-11}$ Кл, т. е. модель заряжена до потенциала ~ 32 В.

Рассмотрим, как меняется погонная концентрация положительного заряда в вязком следе. Уравнение неразрывности для заряда имеет вид

$$\frac{\partial q_0}{\partial t} + \text{div} (q_0 v') = 0, \quad (4)$$

где q_0 — заряд единицы объема вязкого следа, v' — скорость следа относительно модели.

При отсутствии рекомбинации и ближнем следе $\partial q_0 / \partial t = 0$ и, следовательно, $q_0 v' S = \text{const}$, где S — площадь поперечного сечения следа. Площадь поперечного сечения по следу [4], а также скорость следа относительно модели [6] растут. На рис. 6 приведено распределение величины $(v_{\Sigma} - v) / v_{\Sigma}$, где v — скорость следа, v_{Σ} — скорость тела. Данные о ско-

рости следа взяты из работы [4]. На участке следа $x/d=150-500$ скорость следа меняется очень слабо, следовательно, $q_0 \sim 1/S$. На осциллограммах регистрируется погонная концентрация $\sigma = q_0 dV/dx$. Учитывая закон расширения следа [5]

$$W = 0.9x^{1/2}d^{2/3}, \quad (5)$$

где W — ширина следа, для конусообразного расширения при $dV=1/3Sdx$ получим

$$\sigma = 0.22q_0d^2(x/d)^{2/3} \approx \text{const}. \quad (6)$$

Таким образом, оказывается, что погонная концентрация положительного заряда не зависит от величины x/d , что соответствует постоянству сигнала от следа на рис. 2, б, 3, б. Рост сигнала от ближнего следа на рис. 2, а, 3, а связан, вероятно, с попаданием на начальном участке в след продуктов неполного сгорания порохового заряда. Полный заряд, прошедший через датчик,

$$Q_{\Sigma} = \int_l \sigma dl = \int_{\tau} \sigma v d\tau, \quad (7)$$

где l — длина следа, τ — время прохождения следа через датчик.

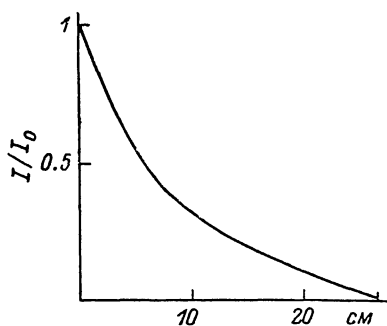


Рис. 5.

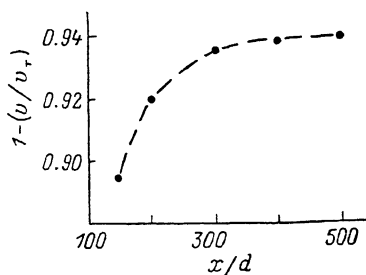


Рис. 6.

Площадь под кривой $u(\tau)$ на рис. 2, 3 определяется соотношением

$$S = \int_{\tau_1}^{\tau_2} u d\tau = \beta \int_{\tau_1}^{\tau_2} \sigma d\tau, \quad (8)$$

где $\beta \equiv kd/c$, $k = 2 \sum_{i=0}^{10} g_i$.

Положительный заряд в следе определяется выражением

$$Q_{сх} = v_{сх} \int_{\tau} \sigma_+ d\tau = v_{сх} \beta^{-1} S_+, \quad (9)$$

где σ_+ — погонная концентрация положительного заряда в вязком следе.

Если ограничиться участком следа до $x/d=300$, то на этом участке $v_{сх}/v_* \approx 0.1$. Из рис. 2, 3 следует, что противоположный по знаку заряд $Q_{сх}$ даже на ограниченном участке следа до $x/d=300$ оказывается в 2—3 раза больше, чем Q_M . Чтобы объяснить наблюдаемое отличие, необходимо предположить, что часть отрицательного заряда с модели стекает в невязкий след. Этот заряд $Q_- \sim v S_-$, где $S_- = \beta \int_{\tau} \sigma_- d\tau$. При малых значениях величины v , характерных для невязкого следа, величина S_- может оказаться заметной и значительно уменьшить суммарную наблюдаемую величину $S_{\Sigma} = S_+ - S_-$. Таким образом, даже незначительный заряд, но движущийся с малой скоростью, может дать существенный вклад в суммарный сигнал от следа, чем и объясняется кажущееся различие зарядов.

Полученные осциллограммы позволяют представить динамику установления стационарного распределения зарядов при пролете тела следующим образом. Первоначально при взаимодействии тела с набегающим потоком отрицательный заряд на теле начинает возрастать. Часть его может сноситься в вязкую часть следа, поскольку за головной ударной волной при скорости $v \sim 2000$ м/с температура составляет величину $T > 2500$ К и среда частично

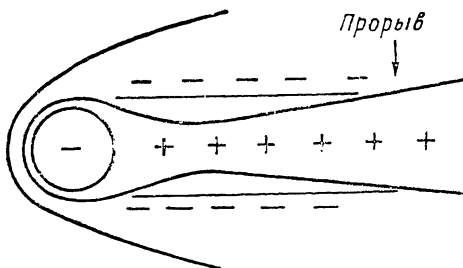


Рис. 7.

ионизована. Таким образом, отрицательный заряд через погранслои попадает в вязкий след и далее сносится. Положительный заряд сосредоточен в вязкой части (рис. 7), движущейся с большой скоростью. На первоначальной фазе процесса суммарный заряд в следе не скомпенсирован вследствие его накопления на модели. Во второй фазе после установления равновесного значения заряда на модели заряд в следе оказывается скомпенсированным, однако он разделен пространственно: положительный заряд находится в вязком следе, отри-

цательный — в невязком. По мере того как заряд на летящем теле принимает равновесное значение, увеличивается утечка отрицательного заряда через невязкую область. При этом положительный сигнал от следа уменьшается, поскольку положительный заряд вязкого следа компенсируется отрицательным зарядом, стекающим с тела в невязкую часть. В точке прорыва вязкого следа в невязкий происходит нейтрализация заряда путем рекомбинации электронов и отрицательных ионов с положительными ионами вязкого следа.

Таким образом, полет сверхзвукового тела в воздухе при скоростях $v \sim 2000$ м/с сопровождается появлением на теле и в следе за ним электрических зарядов. Динамика изменения этих зарядов, их влияние на физические процессы при гиперзвуковом движении, а также механизмы появления зарядов нуждаются в дальнейшем детальном исследовании.

Литература

- [1] Haseborg T. L., Trinks H. // IEEE. 1980. AES-16. P. 227—231.
- [2] Haseborg T. L., Trinks H. // IEEE. 1980. AES-16. P. 750—753.
- [3] Кронберг Е. Р., Мишин Г. И., Серов Ю. Л., Явор И. П. // ЖТФ. 1982. Т. 52. № 5. С. 942—944.
- [4] Heckman P., Cantin A., Emond A., Kirkpatrick F. // AIAA J. 1968. Vol. 6. N 4. P. 750—752.
- [5] Slattery R. E., Clay W. G. // Phys. of Fluids. Vol. 5. P. 849—855.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
4 февраля 1988 г.

О МЕХАНИЗМЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ И ПЬЕЗОАКТИВНОСТИ ФТОРПОЛИМЕРНЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

Б. А. Тагнков, Л. Ф. Куренная

Пьезо- и пироактивность элементов на основе ПВДФ находится в прямой зависимости от содержания полярной кристаллической фазы. Наилучшей активностью обладают одноосноориентированные пленочные элементы, содержащие мелкодисперсную β -фазу (45 мол. %), взвешенную в эластичной аморфной фазе. Одним из эффективных методов получения таких элементов является применение пленок сополимеров, в том числе сополимеры ВДФ—ТФЭ (содержание ТФЭ 10—20 мол. %) с коэффициентом вытяжки $K=4-5$, поляризованных в коронном разряде [1, 2]. В пленочных элементах на основе ПВДФ наблюдаются характерные для сегнетоэлектриков петли гистерезиса, в том числе гистерезисная зависимость электри-