

03

© 1991 г.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ТЕЛ С ГИПЕРЗВУКОВЫМИ СКОРОСТЯМИ

Ю. Л. Серов, И. П. Явор

Приведены результаты экспериментального изучения образования электрических зарядов на телах и в следах за ними при больших скоростях в ксеноне, когда в поле течения около тела и в следе образуется плазма. Эксперименты выполнены на лабораторной баллистической трассе. Рассматривается механизм разделения зарядов, связанный с их диффузией и газодинамическим разделением в потоках. Установлено, что разные области следа в зависимости от скорости тела и давления газа могут нести заряды разной величины и полярности. Обнаружен зарядовый предвестник, движущийся перед головной ударной волной.

Образование электрических зарядов при движении тел с большими скоростями исследовалось в работах [1-4]. Однако физика такого явления не ясна, а экспериментальных данных недостаточно.

В настоящей работе проводились исследования электрических зарядов, возникающих при движении сферических моделей, выстреливаемых со скоро-

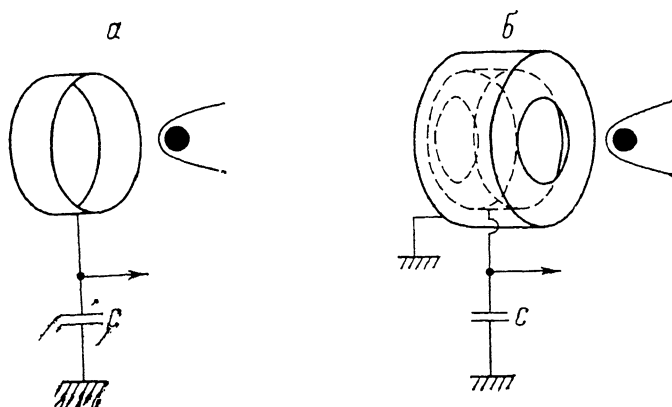


Рис. 1. Схема измерения величины заряда.

а — открытый датчик, б — экранированный датчик.

стями до  $V=2300$  м/с ( $M \cong 13$ ) на баллистической установке в барокамеру, заполненную ксеноном. Материал модели дюралюминий.

Схема измерений приведена на рис. 1. Методика измерений описана в работе [3]. Для измерения зарядов использовались кольцевые электростатические датчики диаметром 10 см с различным пространственным разрешением. Открытые датчики имели пространственное разрешение  $\sim 10$  см, экранированные датчики —  $\sim 5$  см ( $I/I_{\max}=0.5$ ).

На рис. 2 приведены калибровочные кривые для открытого и экранированного датчиков. На оси ординат отложен потенциал датчика, в который по его оси вводится сфера, на которую подается потенциал 25 В. На оси абсцисс дано расстояние от датчика, на котором расположена сфера. Герметизация барокамеры со стороны влета модели осуществлялась при помощи диафрагмы из целлофана толщиной 50 мкм. На рис. 3, а-в приведены осциллограммы сигналов

с электростатических датчиков при движении модели со скоростью  $V=2300$  м/с в ксеноне при давлении  $P=40$  Тор. Диаметр модели  $d=20$  мм. Осциллограммы показывают, что вблизи модели сосредоточен отрицательный заряд. Заряд противоположной полярности находится далее в следе. Схема обтекания модели и следа при сверхзвуковой скорости показана на рис. 4. Осциллограммы с датчиков, расположенных по ходу движения модели, отличаются формой сигналов. Амплитуда сигнала уменьшается по мере движения модели в барокамере, вблизи начального пика отрицательной полярности появляется «полочка», которая расширяется к концу баротрассы.

На рис. 3, б за сигналом от пролетающей через датчик модели наблюдается второй пик, обусловленный электрической связью по сильноионизованному

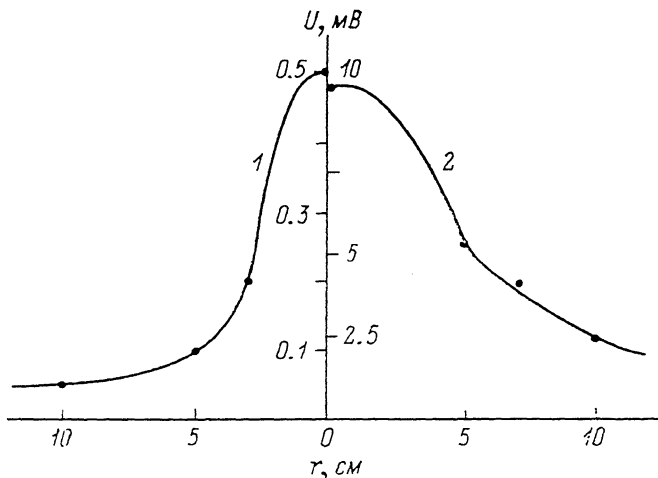


Рис. 2. Зависимость потенциала датчика от расстояния между датчиком и сферой.

Потенциал сферы 25 В; 1 — экранированное кольцо, 2 — открытое кольцо.

следу с соседним датчиком. Эксперименты показали, что появление электрических зарядов не связано со взаимодействием модели с входной диафрагмой барокамеры. С этой целью в ствол были заложены одна за другой две модели в поддонах и произведен выстрел. При пролете регистрировались одинаковые сигналы при движении моделей, хотя расстояние между ними составляло 50 см и с диафрагмой взаимодействовала только первая модель. Проводились также эксперименты с полностью откачанной барокамерой, которые подтвердили отсутствие заметного заряжения модели при прорыве диафрагмы. Вероятно, разделение электрических зарядов происходит в начальный момент взаимодействия модели с набегающим потоком при влете последней в барокамеру. В дальнейшем при установлении стационарного обтекания и формирования вблизи тела стационарной плазменной оболочки происходят стекание и нейтрализация электрических зарядов.

Движущееся тело окружено плазмой, вследствие этого в стационарных условиях вблизи модели не может существовать заметного разделения зарядов. Для изучения локализации электрических зарядов были проведены эксперименты с экранированным датчиком с более высоким пространственным разрешением. Одновременно для более точной синхронизации пролета модели регистрировалась интенсивность излучения от модели с помощью фотоумножителя, сфокусированного в точку, расположенную на траектории полета на расстоянии 4 см перед кольцевым электростатическим датчиком (рис. 5). На рис. 6 приведены осциллограммы сигналов с экранированного датчика заряда и с фотоумножителя. Сигнал с фотоумножителя имеет сложную форму. В частности, из области перед моделью 4 см регистрируется излучение, связанное, вероятно, с существованием предвестника, обусловленного поглощением ультрафиолетового излучения из зоны торможения, которой соответствует основной пик излучения. Далее всплеск излучения регистрируется из области схлопывания потока в горле следа за моделью. Если сравнивать сигналы с электростатического

датчика и с фотоумножителя, то оказывается, что моменту прохождения модели через датчик соответствует начало сигнала на последнем ( $t=t_0$ ). Таким образом, отрицательный электрический заряд, регистрируемый при прохождении модели, сосредоточен в основном в следе за ней. Осциллограмма, приведенная на рис. 6, показывает, что в данном эксперименте небольшой отрицательный заряд сосредоточен в следе за моделью на расстоянии  $\sim 6$  см до горла следа. Далее происходит значительное нарастание заряда, который наблюдается на расстоянии 30—40 калибров модели, а затем заряд изменяет знак и становится положительным.

Распределение электрических зарядов в следе за телом зависит от скорости движения тела. На рис. 7 приведены осциллограммы сигналов с открытого

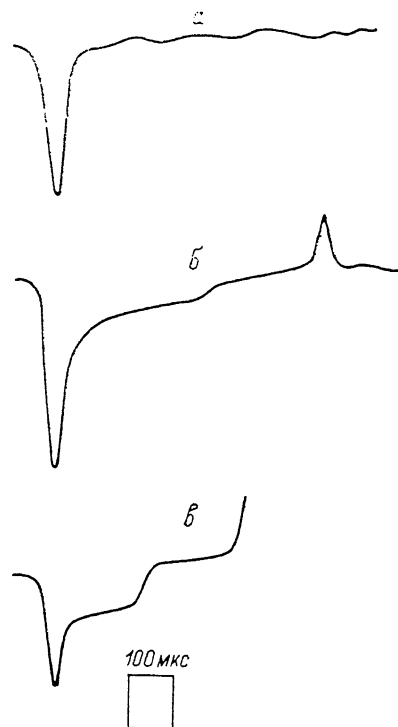


Рис. 3. Осциллограммы сигналов с открытых датчиков.

$P=40$  Тор,  $V=2300$  м/с, ксенон, чувствительность 0.5 В/дел; а — начало трассы ( $L=75$  см), б — середина ( $L=425$  см), в — конец ( $L=580$  см) ( $L$  — расстояние от входной диафрагмы до датчика).



Рис. 4. Схема обтекания сферической модели.

1 — модель, 2 — головная ударная волна, 3 — внешний след, 4 — донная область, 5 — горло следа, 6 — внутренний след.

электростатического датчика при скорости модели  $\sim 1630$  (а), 1800 (б) и 2110 м/с (в). При увеличении скорости движения до  $V=1800$  м/с на осциллограмме наблюдается дополнительный максимум на расстоянии  $\sim 35$  см от модели. Дальнейшее увеличение скорости приводит к перемещению основного максимума к модели. На рис. 8 приведены осциллограммы сигналов с экранированных датчиков при скорости модели  $V=2180$  м/с при давлении  $P=40$  мм рт. ст. Первый датчик (а) расположен на расстоянии 1.30 м от входной диафрагмы барокамеры. Второй датчик (б) расположен на расстоянии 4.5 м от первого. Амплитуда сигнала на втором датчике уменьшилась в 15 раз. Характерной особенностью осциллограммы с первого датчика является наличие зарядового предвестника перед моделью, простирающегося на расстояние  $\sim 12$  см. Первый максимум наблюдается на расстоянии  $\sim 9$  см за моделью. На рис. 8 приведены также величины зарядов, регистрируемых датчиками при движении тела  $Q=KCu$ , где  $K$  — калибровочный коэффициент, учитывающий часть силовых линий, попадающих на заземленные экраны;  $C$  — емкость конденсатора в цепи датчика,  $u$  — потенциал кольца.

Вероятно, что указанный предвестник связан с фотоионизацией перед фронтом головной ударной волны. В поле электрического заряда, расположенного за моделью, происходит разделение зарядов в плазме перед фронтом ударной волны. В результате воздействия электростатического поля перед моделью появляется пучок электронов, движущийся со скоростью тела. На расстоянии

15.5 см за моделью наблюдается минимум. Вероятно, в этой области локализуется положительный заряд, но датчик не имеет достаточного пространственного разрешения. Однако на следующем датчике этот положительный заряд регистрируется вследствие расширения данной области следа. Через 28 см за моделью вновь наблюдается максимум отрицательного заряда.

На втором датчике в области модели существуют небольшой отрицательный заряд, через 2 см за ним небольшой положительный. На расстоянии 6.5 см от

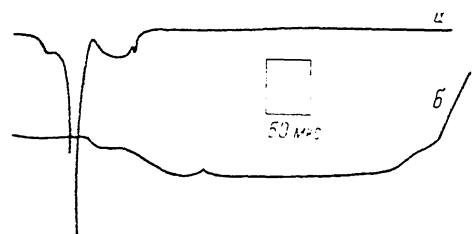
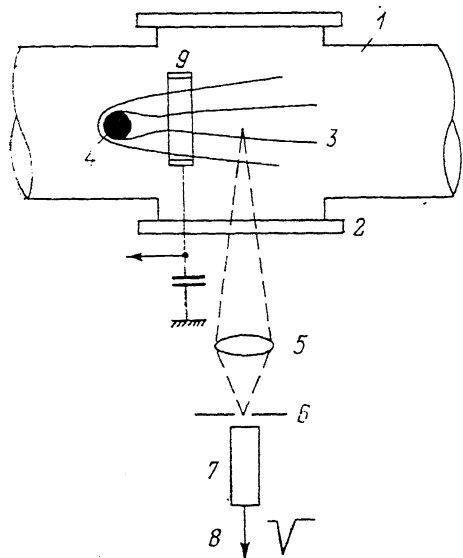


Рис. 5. Схема регистрации излучения от следа.

1 — барокамера, 2 — окно, 3 — след, 4 — модель, 5 — объектив, 6 — вертикальная щель, 7 — ФЭУ, 8 — сигнал, 9 — электростатический датчик.

Рис. 6. Осциллограммы сигналов с фотоэлектронного умножителя (а) и экранированного датчика (б).

$P=23$  Тор,  $V=2100$  м/с, ксенон; а — 2, б — 0.1 В/дел.

тела наблюдается пик отрицательного, а на расстоянии 26 см — положительного заряда. Далес, через 30 см от области положительного заряда существует вновь пик, связанный с отрицательным зарядом. Вероятно, что заряд в данной области модели вызывает поляризацию плазмы вблизи модели, что и приводит к появлению первых двух пиков на осциллограмме рис. 8, б. Что касается меха-

низма разделения зарядов, то вероятно, что оно происходит за счет диффузии электронов поперек следа. Решающую роль здесь имеет поперечный градиент скоростей [5]. Динамику образования зарядов при больших числах Маха можно представить следующим образом. При входе модели в атмосферу ксенона за моделью появляется полость, окруженная плазмой, образованной при взаимодействии тела с набегающим потоком ксенона. В результате диффузии электронов, имеющих большие скорости, чем ионы, в полости появляется избыточный

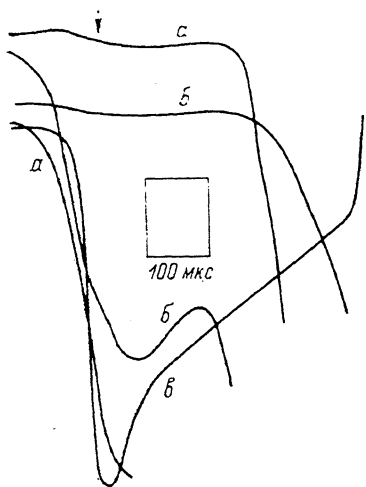


Рис. 7. Осциллограммы сигналов с открытого датчика.

$P=40$  Тор, ксенон; а — верхний луч — 0.02 В/дел, б — нижний луч — 0.001 В/дел; а — чувствительность 0.2 В/дел. Стрелкой отмечен момент пролета через датчик.

отрицательный заряд, положительный заряд ионов сносится в след потоком. После схлопывания потока в горле следа и установления стационарного обтекания избыточные электроны выходят из донной полости, что и объясняет уменьшение амплитуды сигнала на рис. 3 при движении тела по трассе. Подобным механизмом, вероятно, можно объяснить первый пик отрицательного заряда за моделью. Далее происходит разделение зарядов при диффузии электронов из плазмы за горлом следа. Здесь в свою очередь наблюдаются положительный заряд и за ним снесенный набегающим потоком отрицательный. Если

оценить время диффузии электрона [6]  $\tau = D^{-1} (n_0/2.4)^2$  на расстоянии  $r_0 = 0.5$  м при давлении  $P = 40$  мм рт. ст., то при коэффициенте диффузии электронов  $D \approx 10^3$  см<sup>2</sup>/с оно составляет  $\tau \approx 4 \cdot 10^{-5}$  с. За это время при скорости  $V = 2000$  м/с модель пройдет 8 см.

Баланс зарядов, образующихся при взаимодействии тела с набегающим потоком, можно записать в виде

$$Q_{\bar{d}} + Q_c^- + Q_c^+ = 0, \quad (1)$$

где  $Q_{\bar{d}}$  — отрицательный заряд в донной области следа,  $Q_c^-$  и  $Q_c^+$  — отрицательный и положительный заряды в следе.

Учитывая, что

$$Q = \bar{v}^* \int \sigma d\tau, \quad (2)$$

где  $\bar{v}^*$  — средняя скорость потока,  $\sigma$  — погонная концентрация заряда в следе, из уравнения (1) имеем баланс зарядов

$$Q_{\bar{d}} + \bar{v}' \int \sigma_- d\tau + \bar{v}'' \int \sigma_+ d\tau = 0, \quad (3)$$

$\bar{v}'$ ,  $\bar{v}''$  — средняя скорость движения среды в зоне концентрации отрицательного и положительного зарядов соответственно.

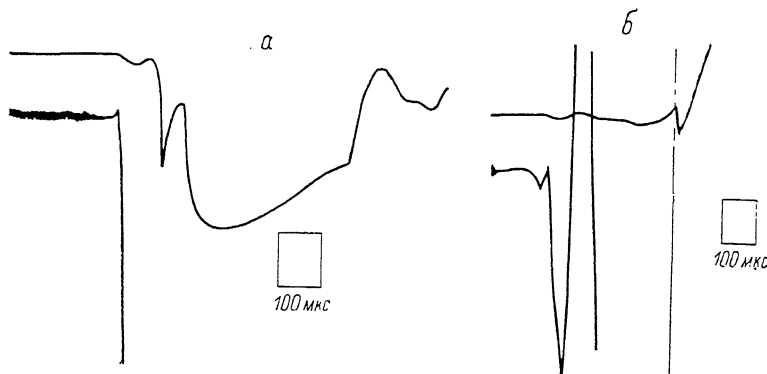


Рис. 8. Осциллограммы сигналов с экранированных датчиков.

*a* — начало полигона, *b* — конец; верхний луч — 0.1 В/дел, нижний луч — 0.001 В/дел. Стрелкой отмечен момент пролета модели через датчик.

Такое разделение зарядов приводит к появлению областей следа, заряженных зарядами противоположных знаков. Обнаруженный эффект позволяет понять причину существования так называемых электрофонных болидов, полет которых сопровождается различными электрическими эффектами [7]. В реальных условиях при полете тел с гиперзвуковыми скоростями возможно осуществление пробоев между различными областями следа. Вероятно, что при приближении таких объектов к поверхности Земли возможен пробой между следом и поверхностью Земли. Вследствие интенсивного вдува при абляции поверхности тела в невязкую часть следа поступает большое количество частиц, которые кластеризуются и приобретают электрический заряд. Это обстоятельство приводит к замедлению процесса рекомбинации при распаде следа. Таким образом, образование заряженных областей после пролета тела может привести к появлению в атмосфере крупномасштабных заряженных образований. Первоначально они должны иметь аксиальную симметрию и вследствие различия в скоростях среды в следе в поперечном направлении противоположно заряженные образования должны быть пространственно разделены. После торможения следа в атмосфере электростатическое взаимодействие должно привести к их взаимному притяжению и нейтрализации, которая может сопровождаться излучением света из областей соприкосновения.

В заключение сформулируем основные выводы: 1) электрический заряд локализуется в основном в следе за телом; 2) перед ударной волной от движущегося с большим числом Маха тела существует заряженный предвестник в виде пучка электронов; 3) след за телом состоит из областей, обладающих зарядами противоположного знака; 4) в процессе движения происходит перераспределение зарядов в следе.

### Список литературы

- [1] *Ter Haseborg T. L., Trinks H.* // IEEE. 1980. Vol. AES-16. P. 227.
- [2] *Кронберг Е. Р., Мишин Г. И., Серов Ю. Л., Явор И. П.* // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 5. С. 942—944.
- [3] *Арсеньев В. В., Мишин Г. И., Серов Ю. Л., Явор И. П.* // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 6. С. 122—126.
- [4] *Баулин Н. Н., Пилюгин Н. Н., Тихомиров С. Г.* и др. Отчет № 3279. Институт механики МГУ. М., 1986.
- [5] *Demetriades A.* // AIAAJ. 1968. Vol. 6. N 3. P. 432—439.
- [6] *Мак-Даниель И.* Процессы столкновений в ионизованных газах. М.: Мир, 1967. 559 с.
- [7] *Овчинников В. М., Полочник И. П.* // ДАН. 1988. Т. 299. № 3. С. 595—598.

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

Поступило в Редакцию  
6 сентября 1990 г.