

Ю. К. Бивин

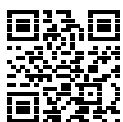
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ВОЗДУХА, СОПРОВОЖДАЮЩЕЙ ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований электрически заряженных зон, возникающих и сопровождающих движение твердого тела в воздухе. Определено расположение зон относительно тела в зависимости от формы тела и скорости его движения. Определено влияние на напряженность электрического поля вокруг тела его физической природы.

Ключевые слова: заряженные зоны, электрический заряд, обтекание, разрежение, сжатие.

Бивин Юрий Карлович, канд. тех. наук, ведущий инженер лаб. механики и оптимизации конструкций; e-mail: bivin@ipmnet.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6672-0615>; AuthorID: 7200



для цитирования: Бивин Ю. К. Экспериментальное исследование электризации воздуха, сопровождающей движение твердых тел // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2025. № 1(63). С. 134–146. DOI: 10.37972/chgpu.2025.63.1.002. EDN: UMGSHZ

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Yu. K. Bivin

EXPERIMENTAL STUDY OF AIR ELECTRICITY ACCOMPANING THE MOVEMENT OF SOLID BODIES

¹*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia*

Abstract. The results of experimental studies of electrically charged zones arising and accompanying the movement of a solid body in the air are presented. The location of zones relative to the body is determined depending on the shape of the body and the speed of its movement. The influence of the physical nature of the electric field around the body on the intensity of the field is determined.

Keywords: charged zones, electric charge, flow, rarefaction, compression.

Yury K. Bivin, Ph. D. of Eng. Sci., Leading Engineer, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS;

<https://orcid.org/0000-0001-6672-0615>; AuthorID: 7200



to cite this article: Bivin Yu. K. Experimental study of air electricity accompanying the movement of solid bodies // Vestn. Chuvash. Gos. Ped. Univ. im. I.Ya. Yakovleva Ser.: Mekh. Pred. Sost. 2025. No 1(63). p. 134–146. DOI: 10.37972/chgpu.2025.63.1.002

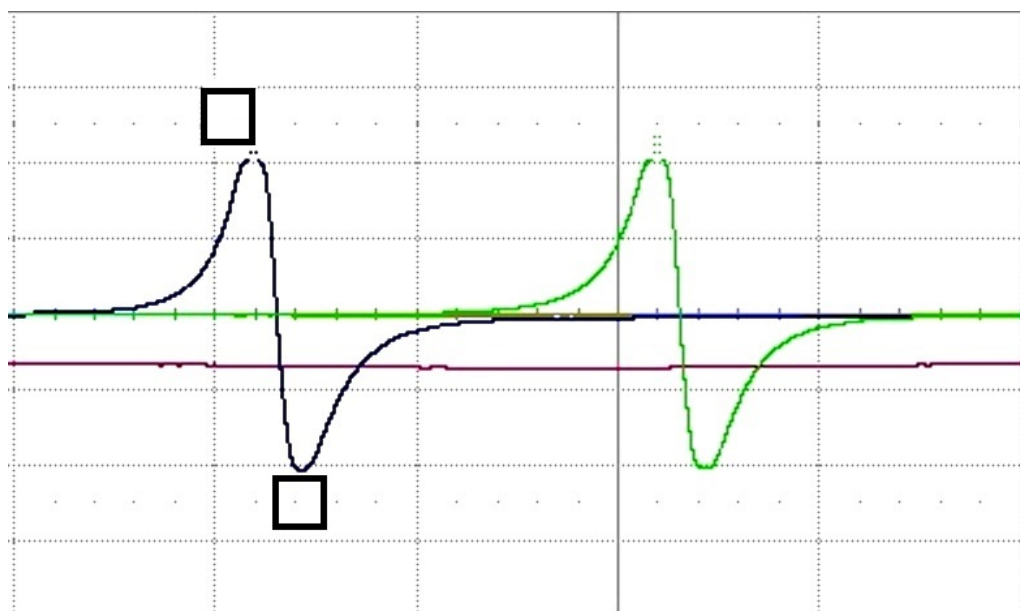
This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение. Исследования электрических полей, возникающих при динамическом деформировании без разрушения твердых материалов, результаты которых приведены в [1], показали, что электрическое поле сопровождает не только разрушение твердых тел, но и упругие динамические деформации. Но, в отличие от активных диэлектриков-пьезоэлектриков, электрическое поле может сопровождать динамические деформации и первоначально электрически нейтральные движущиеся твердые тела, не относящиеся к этому классу. Еще одна особенность проявляется в этом случае в том, что разделение зарядов в телах, исчезает вместе с динамической деформацией и они остаются электрически нейтральными. Описание взаимодействия физики и механики при распространении волны деформации в кристаллическом проводнике дано в [2]. Определение характеристик электретов и способы их получения из первоначально электрически нейтральных диэлектриков, как отмечают специалисты, работающие в этой области, составили самостоятельный раздел физики, в котором отдельно рассматриваются различные виды электретов, отличающиеся по способу получения и области применения [5]. В воздушной среде в динамике так же нарушается ее электрическая нейтральность, но проявления этого более разнообразны и зависят от большего количества параметров. Первоначальные результаты экспериментов в данном направлении были представлены в [3] и [4].

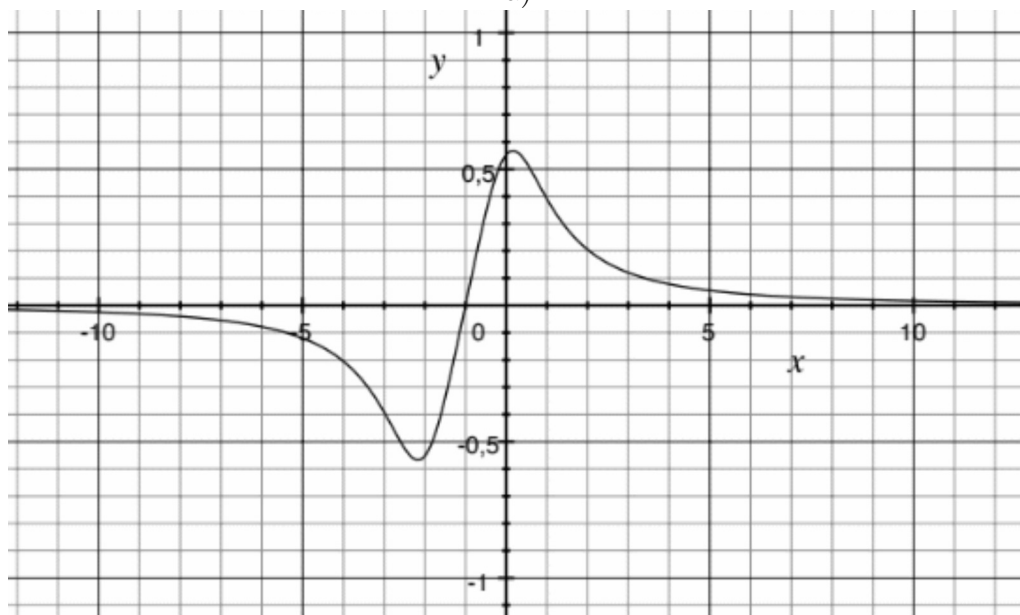
Целью данной работы было экспериментально изучить зависимость появления заряженных зон, сопровождающих движущееся в воздушной среде твердое тело, от наличия зон разрежения и сжатия воздуха. Также в задачу исследования входило определение зависимости вида зарядов и их взаимного расположения от таких параметров, как форма тела, его физическая природа и скорость движения.

1. Эксперименты с цилиндрическими телами из оргстекла при различных геометрических и скоростных параметрах. Опыты проводились на пневматической пушке калибром 10 мм. Скорость полета тела определялась на выходе из ствола оптическими датчиками, сигнал с которых поступал в осциллограф LeCroy WaveSurfer 24Xs7. На определенном расстоянии от среза ствола, где не проявлялось влияние выхлопных газов, устанавливались антенны в виде колец в плоскости, нормальной к траектории, проходящей через центр кольца. Сигнал с антенн записывался на тот же осциллограф. Это позволяло, зная момент вылета тела из ствола и его скорость, определять по осциллограммам взаимное положение тела и показания с антенн, а также моделировать распределения зарядов относительно тела и вдоль линии движения. По виду осциллограммы определялась возможность представления заряда в виде точечного, расположенного на оси, или равномерно распределенного. Если в зону распределенного заряда попадало тело, то заряд считался равномерно распределенным по его поверхности. Во всех экспериментах калибр тела был 10 мм.

На рис. 1(а) представлена осциллограмма, полученная при выстреле пулькой из оргстекла в виде цилиндра длиной 10 мм. На ней показано положение



a)



b)

Рис. 1. (a) напряжения на антеннах при пролете цилиндра из оргстекла длиной 10 мм со скоростью 102 м/с; (b) результат расчета.

пули в момент максимальных значений напряженности поля, регистрируемого антенной. Когда передний торец цилиндра пролетает кольцо-антенну, напряжение на антенне достигает максимума. Когда сквозь антенну проходит примерно

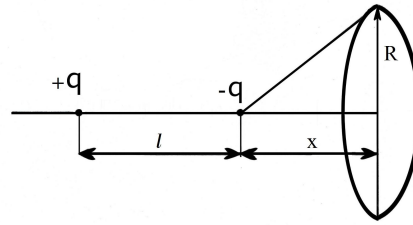


Рис. 2. Расчетная схема вычисления напряжений для точечного заряда и равномерно распределенного вдоль оси.

середина тела, возникает максимум другого знака. Это значит, что зоны воздуха, несущие заряды разного знака, находятся рядом и довольно узкие, так что их можно представить в виде точечных, расположенных на расстоянии между максимумами показания антенн.

Расчетная схема представлена на рис. 2. R – радиус антенны, q – заряды, l – расстояние между ними или длина зоны, несущей заряд.

Потенциал на антенне для точечных зарядов определяется из следующего соотношения:

$$4\pi\varphi\varepsilon = \frac{-q}{\sqrt{x^2 + R^2}} + \frac{q}{\sqrt{(x+l)^2 + R^2}}. \quad (1)$$

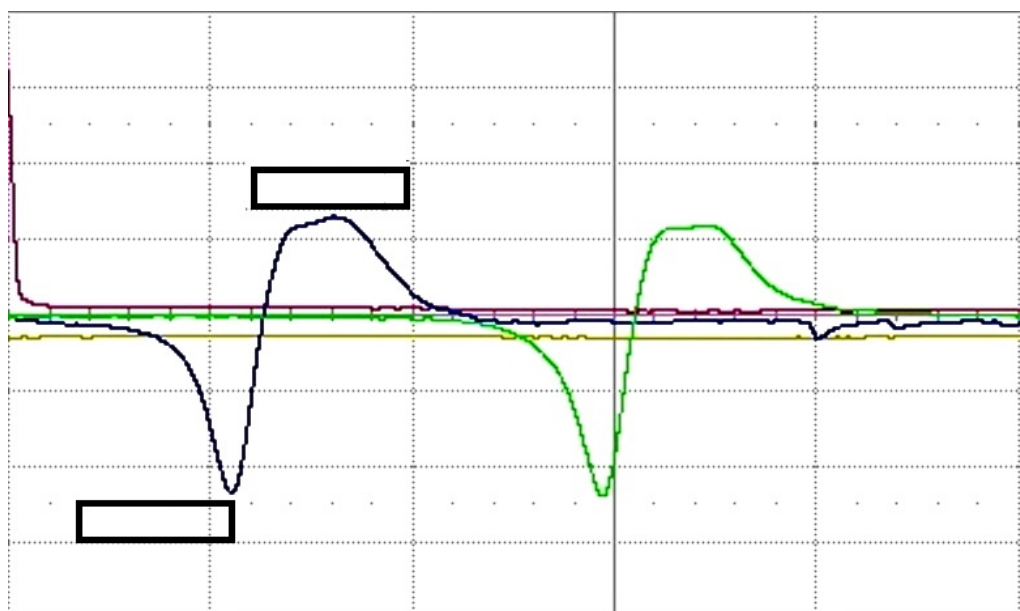
При постоянной скорости движения вид изменения потенциала во времени, представлен на рис. 1(b). Видно, что такое описание возможно.

На рис. 3(a) представлена осциллограмма, полученная при выстреле со скоростью 105 м/с цилиндрической пулей длиной 120 мм из оргстекла. На ней показано положение тела при экстремальных показаниях осциллограммы. Видно, что перед телом наблюдается узкая зона, несущая отрицательный заряд, а за ней следует зона, заряженная положительно. Если предположить, что в этом случае имеет место равномерно распределенный заряд, то тогда его центр должен находиться от нулевой точки осциллограммы на таком же расстоянии, как и максимум отрицательного заряда. В таком случае длина положительного заряда должна быть 8 см.

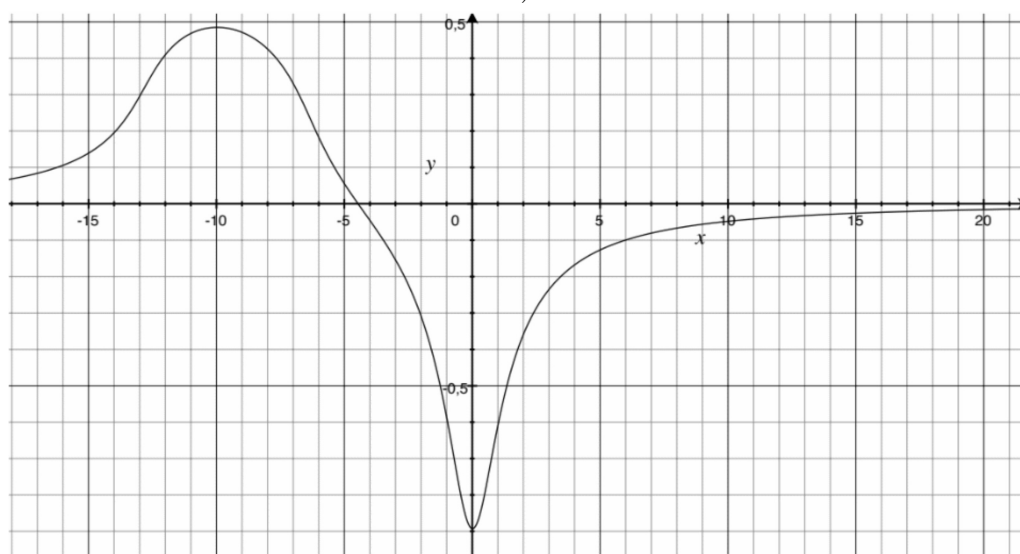
Математическое описание изменения во времени потенциала на антенне представлено соотношением

$$y = \frac{1}{\sqrt{x^2 + 1}} - 0.25 \ln \left(\frac{x + 6.4 + \sqrt{(x + 6.4)^2 + 1}}{x + 3.2 + \sqrt{(x + 3.2)^2 + 1}} \right). \quad (2)$$

Размеры отнесены к радиусу кольца антенны $R = 25$ мм. Результат вычислений показан на рис. 3(b). Вид изменения потенциала по мере пролета пули сквозь антенну соответствует виду осциллограммы.



a)



b)

Рис. 3. (а) напряжение на антеннах при пролете цилиндра из оргстекла удлинением 12 со скоростью 105 м/с; (б) результат расчета.

У тела с удлинением 12, как в рассмотренном выше случае, осциллограммы распределения зарядов могут иметь и другой вид. На рис. 4(а) показана осциллограмма, полученная при выстреле со скоростью 136 м/с цилиндром из оргстекла удлинением 12.

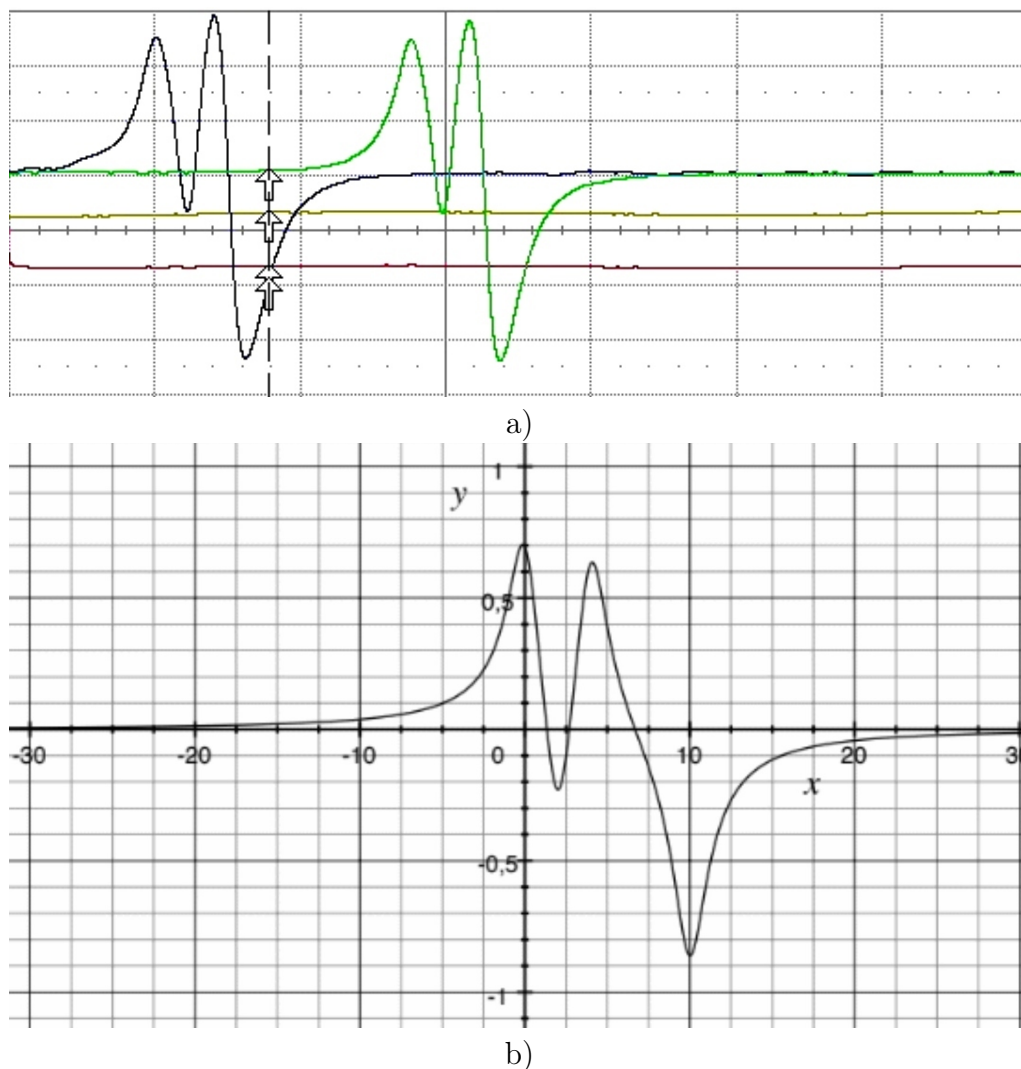


Рис. 4. (а) напряжение на антеннах при пролете цилиндра из оргстекла удлинением 12 со скоростью 136 м/с; (б) результат расчета.

Расчет положения центров зарядов по максимальным показаниям антенн позволяет представить изменения потенциала на антенне в виде

$$y = \frac{1}{\sqrt{x^2 + 1}} - \frac{1}{\sqrt{(x-2)^2 + 1}} + \frac{1}{\sqrt{(x-4)^2 + 1}} - \frac{1}{\sqrt{(x-10)^2 + 1}}. \quad (3)$$

Предполагается, что все заряды точечные и равны. Результат расчета показан на рис. 4(б). Снова можно отметить схожесть показаний антенны и вычисление значений потенциала при сделанных допущениях.



Рис. 5. (а) напряжение на антеннах при пролете цилиндра из оргстекла удлинением 12 со скоростью 229 м/с.; (б) результат расчета.

Иногда возникал другой порядок расположения зарядов. Если в предыдущем случае перед телом возникала зона, заряженная положительно, то у такого же тела при выстреле со скоростью 230 м/с осциллограмма приобретала

вид, приведенный на рис. 5(а). Здесь опять на переднем торце образуется зона, заряженная отрицательно. Положительный максимум осциллограммы соответствует моменту, когда задний торец тела проходит через антенну. Но затем сигнал снова становится отрицательным. Его максимум соответствует положению тела, когда его хвостовая часть удалится от антенны на 6 калибров. Форма сигнала более плавная, вытянутая, что больше соответствует распределенному заряду. Если предположить, что он распределен равномерно, то его центр находится в точке максимума осциллограммы, т.е. на расстоянии 6 калибров от заряда на хвосте пули, а его полная длина не более 12 калибров. Из того, что сумма зарядов должна быть равна нулю и, оценивая площади под кривыми на осциллограмме, можно предположить, что отрицательные заряды равны, а положительный вдвое больше. В таких предположениях форма изменения потенциала во времени представлена в виде

$$y = -\frac{1}{\sqrt{x^2 + 1}} + \frac{1}{\sqrt{(x + 5)^2 + 1}} - 0.2 \ln \left(\frac{-x - 5 + \sqrt{(x + 5)^2 + 1}}{-x - 10 + \sqrt{(x + 10)^2 + 1}} \right). \quad (4)$$

На рис. 5(б) показан результат вычислений, который согласуется с осциллограммой.

Аналогичные эксперименты с телами из фторопласта не показали такого разнообразия вида осциллограмм. Во всех случаях и во всём диапазоне скоростей, тело сопровождало два заряда, и всегда перед ним был отрицательный заряд вплоть до сверхзвуковой скорости. У тел из эбонита, винипласта, капронита удлинением до 4 результаты были те же. В случае цилиндров с удлинением 1 из оргстекла при скоростях в диапазоне 300-400 м/с перед телом идет положительный заряд, а при скорости меньшей – отрицательный.

2. Влияние формы тела, его физической природы и скорости движения на образование заряженных зон. На металлических телах в виде цилиндра, конуса или шара из дюраля и магния всегда возникало два заряда. Но, в отличие от диэлектрических материалов, для металлов впереди наблюдался положительный заряд при скоростях до 400 м/с. В этом случае возникает еще одно отличие между проводниками и диэлектриками. Заряды, которые их сопровождают, при одинаковых скоростях движения и форме могут отличаться по величине на порядок или даже два. При движении дюралевых цилиндров длиной 1-12 калибров напряжение не превосходило одного вольта в диапазоне скоростей 200-400 м/с. При стрельбе дюралевым шаром со скоростью 390 м/с напряжение было 500 мВ. Такая большая разница в напряженности поля, сопровождающего совершенно одинаковые по форме тела, но из металла или диэлектрика, возможно, отражается на коэффициенте сопротивления.

При выстреле цилиндрическим телом с передней усеченной конической частью с углом раствора 10 градусов и отсеченной вершиной по диаметру 2 мм,

при скорости движения 290 м/с напряжение не превосходило 200 мВ. Максимум напряжения не соответствовал положению кончика конуса, а был смещен к его основанию, как показано на осциллограмме рис. 6(b). На антенне, ближе расположенной к стволу пушки, он возникал, когда кончик конуса проходил антенну и удалялся на 2 калибра, а на антенне, удаленной еще на 40 сантиметров, всего на 1 калибр. Второй максимум возникает на антенне, когда задний торец пульки удалится от антенны на полтора калибра. По виду осциллограммы можно заключить, что заряды более растянуты по сравнению с цилиндрическими телами. Особенно, в сравнении с передним, который образуется перед плоским торцом.

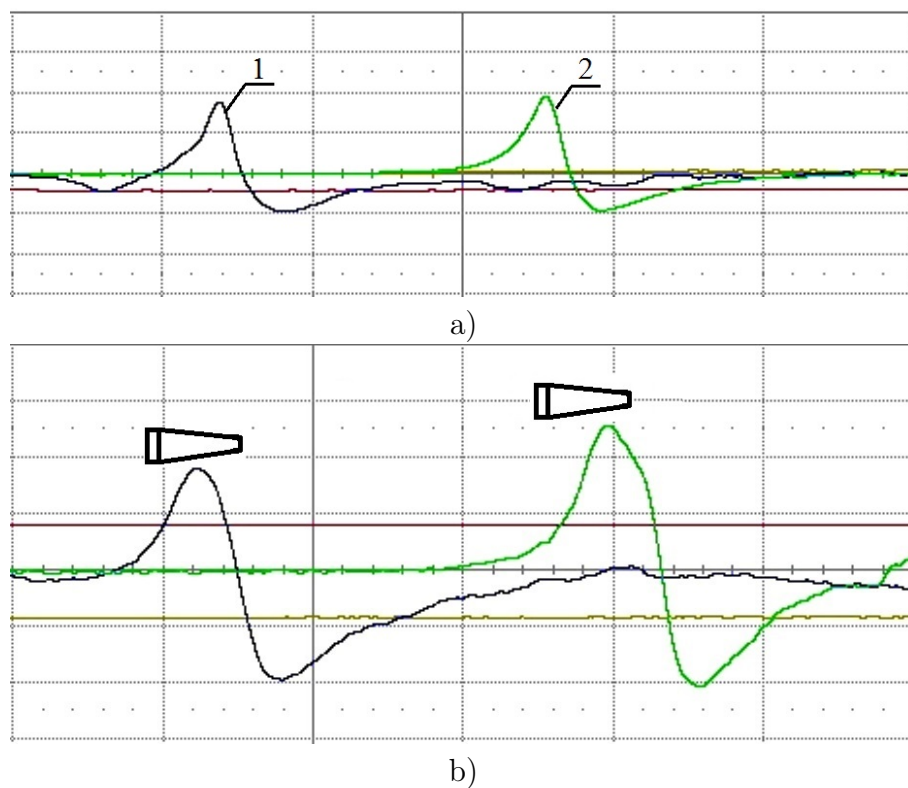


Рис. 6. (а) напряжение на антеннах при пролете дюралевого шарика со скоростью 390 м/с (на ближней к стволу пушки антенне наблюдаются помехи от выхлопа, на антенне, расположенной на расстоянии 80 см, помех не видно); (б) напряжение на антеннах при пролете конического тела со скоростью 290 м/с.

Движение цилиндров из оргстекла сопровождают заряды, дающие напряжения на антенне в пределах 4-10 В. Напряжение увеличивается с ростом скорости и длины тела. При стрельбе цилиндрами из фторопласта напряжения фиксировались в пределах 30-80 В. У всех тел напряжение заметно возрастает при увеличении скорости и длины тела. Закономерность трудно более точно определить, т.к. результаты измерений менялись, хотя и не сильно, не только ото

дня ко дню, но и при проведении подряд нескольких выстрелов одним и тем же телом с одной и той же скоростью. Менялась среда эксперимента – воздух, в котором возникали заряды, – и изменялась их величина.

В представленных результатах экспериментов в процессе электризации участвуют две среды – газообразная и твердая. Последняя – из нескольких диэлектриков и металлов, в разных геометрических формах. Твердые тела в нашем случае не подвергаются динамическим деформациям, способным повлиять на электризацию процесса обтекания твердого тела. Перемещение и истечение чистых газов и их смесей практически не приводит к появлению зарядов. Заряды в газе в этом случае могут появиться при наличии твердых или каплеобразных частиц или паров [6]. В таких процессах заряды называют статическими. Имеет место возникновение в среде заряда одного знака в результате соударения частичек и капель между собой и с твердым телом. В нашем случае перед летящим телом в первоначально электрически нейтральном газе в зоне сжатия возникает разделение зарядов. У коротких тел зоны зарядов разных знаков примыкают друг у другу и могут взаимодействовать особенно интенсивно при обтекании электропроводящего тела. Это подтверждается различием величин зарядов при обтекании тел из металлов и диэлектриков, а также длинных и коротких тел. Не ясно, с чем связано изменение знака заряда в зоне сжатия перед телами из проводника тока и диэлектрика. Изменение знака заряда перед цилиндром из оргстекла при сверхзвуковой скорости связано, возможно, с влиянием температуры в зоне сжатия. Появление более двух заряженных зон в случае с длинными телами из оргстекла связано, возможно, с электризацией, возникающей при трении газа о поверхность тела, и появлением значительного пограничного слоя газа на поверхности тела, приводящим к относительному смещению слоев газа, в которых он электризуется, а также к появлению вихрей.

При стрельбе со сверхзвуковыми скоростями приходилось бороться с влиянием на процесс обтекания выхлопного воздуха. Например, при стрельбе сферическим телом со скоростью 390 м/с на антеннах, расположенных на разных расстояниях от ствола, получались разные осциллограммы, как показано на рис. 6(а). Результат получен при использовании насадки на конце ствола для частичного отвода выхлопа в сторону от направления полета тела. И всё же, только на антенне, расположенной на расстоянии 80 калибров (вторая антенна), отсутствует влияние выхлопа. Но при этом, что особенно заметно в отсутствие глушителя, при динамическом взаимодействии выхлопных газов или с телом, или с окружающим воздухом заряды возникают не в процессе прохождения тела сквозь антенну, а раньше. При холостом выстреле не удалось выяснить, появляются ли заряды при взаимодействии выхлопных газов с окружающим воздухом при отсутствии твердых препятствий, так как осциллограф не запускался.

3. Заключение.

- Основную роль в электризации воздуха при обтекании твердого тела играет динамическое возникновение зон сжатия и разрежения.
- На формирование заряженных зон газа при обтекании твердого тела влияют форма тела, его физическая природа и скорость. Всегда возникающий перед и за телом заряд свидетельствует о том, что динамические деформации сжатия и расширения в воздухе приводят к его электризации.
- При обтекании диэлектриков возникают существенно большие заряды, чем у проводников, при прочих одинаковых параметрах.
- С ростом скорости обтекания и увеличением удлинения величина зарядов увеличивается. С увеличением скорости обтекания за телом образуется заряженная зона газа, протяженность которой с увеличением скорости растет.
- С увеличением скорости обтекания – за телом образуется заряженная зона газа, протяженность которой растет вместе с ростом разреженной зоны газа.
- Знак заряда перед телом меняется в зависимости от физической природы тела, его формы и скорости движения.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. 100%

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Работа выполнена по теме Госзадания (номер госрегистрации 124012500437-9).

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. 100%

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding. The work was carried out on the topic of the State Assignment (state registration number 124012500437-9).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бивин Ю. К. Исследование электрических полей при динамическом деформировании полимеров // Журнал технической физики. 2010. 80 (6). С. 58–63. EDN: PKNHJC.
- [2] Журавлев В. Ф. Об электромагнитном излучении при соударении твердых тел // Изв. АН СССР. МТТ. 1985. № 6. С. 101–103.
- [3] Бивин Ю. К. Электрическое поле, сопровождающее движение тел в воздухе // Журнал технической физики. 2011. 81 (10). С. 147–150. EDN: RCUGFJ.
- [4] Бивин Ю. К. Связь механических динамических процессов и сопровождающих электрических полей // Журнал технической физики. 2015. 85 (6). С. 69–73. EDN: UJMOOP.
- [5] Сесслер Г. Электреты. М. : Мир, 1983. 487 с.
- [6] Таубкин И. С. Общие сведения о статическом электричестве в некоторых производственных операциях с нефтепродуктами // Теория и практика судебной экспертизы. 2018. 13 (2). С. 54–64. EDN: XUMSUX.

REFERENCES

- [1] Bivin Y. K. Electric fields in polymers during dynamic deformation // *Technikal Physics*. 2010. 55 (6). P. 812–817. EDN: PKHJJC.
- [2] Zhuravlev V. F. On the electromagnetic emission of colliding solid bodies // *Izv. AN SSSR*. 1985. № 6. P. 101–103.
- [3] Bivin Y. K. Electric field accompanying the motion of a body in air // *Technikal Physics*. 2011. 56 (10). P. 1527–1530. EDN: RCUGFJ.
- [4] Bivin Y. K. Relation between mechanical dynamic processes and the accompanying electric fields // *Technikal Physics*. 2015. 60 (6). P. 855–859. EDN: UJMOOP.
- [5] Sessler G. *Electrety*. M. : Mir, 1983. 487 p. (in Russian)
- [6] Taubkin I. S. Overview of static electricity in some industrial operations with petroleum products // *Theory and practice in forensic science*. 2018. 13 (2). C. 54–64. EDN: XUMSUX. (in Russian)