

Релаксация электрического заряда диэлектрических материалов в плазме электроракетного двигателя

С. С. Бляхарский,^{*} Я. С. Бляхарский,[†] А. Б. Надирадзе[‡]

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ)
институт № 2 «Авиационные, ракетные двигатели и энергетические установки»,
кафедра 208 «Электроракетные двигатели, энергетические и энергофизические установки»
Россия, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

(Статья поступила 26.02.2020; подписана в печать 16.03.2020)

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования влияния низкотемпературной плазмы электроракетных двигателей на зарядовое состояние диэлектрических материалов. Получены данные о динамике процесса релаксации электрического заряда, накопленного в диэлектрике при облучении электронами средних энергий, под действием низкотемпературной плазмы, формируемой при работе электроракетного двигателя. Показано, что процесс релаксации является нелинейным и протекает в две стадии, что может быть связано с наличием в поверхностных слоях радиационно-заряженного диэлектрика двойного слоя положительных и отрицательных зарядов.

PACS: 52.75, 52.90.+z, 52.80.-s, 29.27.Ac.

533.924, 629.7.036.7, 537.533.9.

Ключевые слова: зарядка диэлектриков, электрический заряд, потенциал поверхности, электроракетный двигатель, низкотемпературная плазма, взаимодействие плазмы с поверхностью, релаксация заряда.

ВВЕДЕНИЕ

На высоких орбитах космический аппарат (КА) подвергается воздействию электронов высоких энергий, что приводит к его электризации [1]. Присутствие на поверхности КА разнородных материалов ведет к дифференциальной зарядке и, как следствие, к возникновению электростатических разрядов (ЭСР), создающих помехи для бортовой аппаратуры [2].

На КА с электроракетными двигателями (ЭРД) проблема электризации осложняется тем, что в момент включения двигателя вокруг КА возникает плотное плазменное облако, в котором происходит быстрая релаксация поверхностного заряда КА. В процессе релаксации заряда могут создаваться условия для возникновения мощных поверхностных ЭСР, способных приводить к сбоям в работе бортовой аппаратуры и деструкции материалов.

В связи с этим возникает вопрос о механизмах взаимодействия плазмы ЭРД с заряженной поверхностью КА и условиях возникновения ЭСР в моменты включения двигателя.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящее время принято считать, что при взаимодействии ионов с заряженной поверхностью диэлектрика релаксация заряда происходит в результате про-

цессов вторичной ион-электронной эмиссии [3, 4]. При этом интегральный коэффициент релаксации (отношение полного заряда ионов, попавших на поверхность, к величине накопленного заряда) близок к единице. Имеющиеся экспериментальные данные косвенно подтверждают это утверждение [4]. Однако динамика процессов взаимодействия низкотемпературной плазмы с радиационно-заряженной поверхностью диэлектрика до настоящего времени детально не исследовалась, поэтому вопрос о физических механизмах релаксации накопленного заряда пока остается открытым.

Сложность экспериментального исследования этих процессов обусловлена малыми временами релаксации заряда, которая (при типичных уровнях заряда и плотности плазмы в стендовых условиях) составляет $10^{-3} - 10^{-5}$ с. Исходя из этого основной задачей эксперимента являлось измерение динамики релаксации радиационно-накопленного заряда диэлектрической поверхности в момент появления низкотемпературной плазмы.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Образец 9 установлен на чашке 12, выполненной из алюминия. Зарядка образца производится потоком электронов, эмитируемым электронной пушкой (ЭП) 1. Плотность тока электронов регистрируется цилиндром Фарадея (ЦФ) 7. Потенциал образца измеряется датчиком напряженности электрического поля (ДЭП) вибрационного типа 4. После того, как потенциал достигает равновесного состояния, включается источник плазмы (ИП) 22, который расположен на некотором расстоянии от образца и отделен от него экраном 21 для снижения плотности ионного тока на образец. В качестве источника плазмы использован ускоритель холловского типа [5], работающий на ксеноне или аргоне. Контроль потока ионов на образец производится плоским зондом Ленгмюра 18. При включении источни-

^{*}E-mail: blahartss@yandex.ru

[†]E-mail: blahartys@yandex.ru

[‡]E-mail: nadiradze@mai.ru

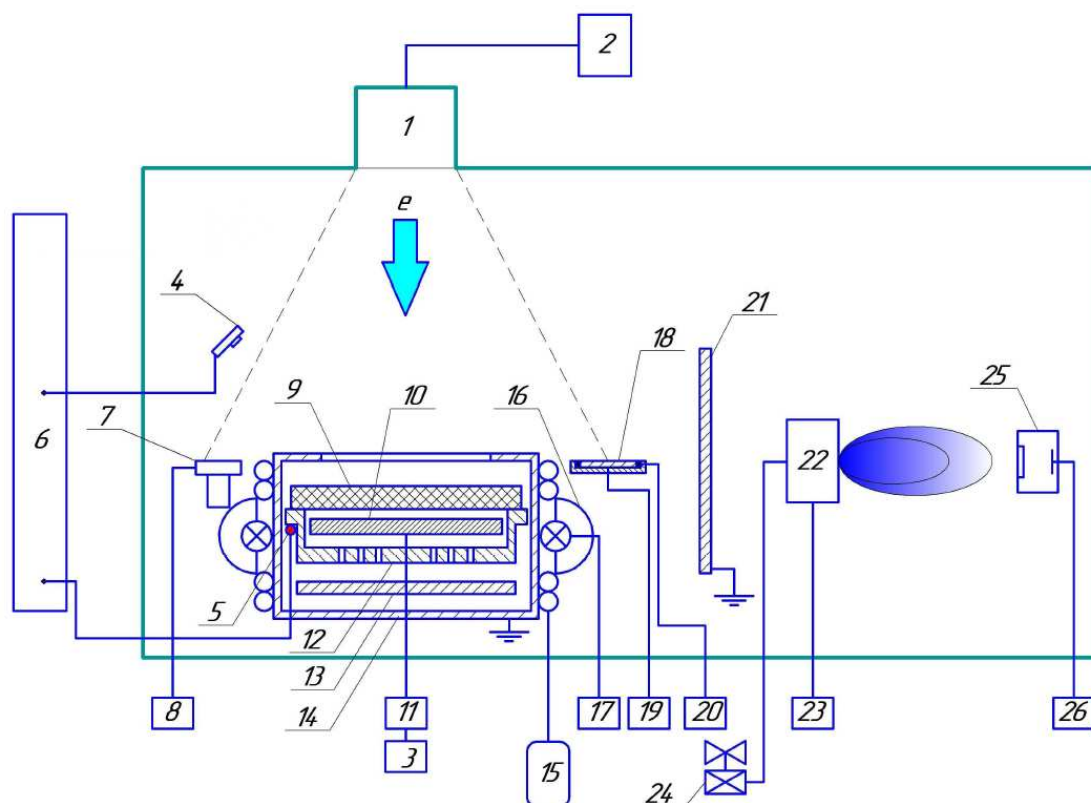


Рис. 1: Схема экспериментальной установки: 1 — электронная пушка; 2 — блок питания-управления электронной пушкой; 3 — осциллограф Tektronix DPO 3034; 4 — датчик напряженности электрического поля (ДЭП-АД); 5 — термосопротивление ТСП-2000; 6 — автоматизированная система управления экспериментом; 7 — цилиндр Фарадея; 8 — вольтметр-электрометр универсальный В7-30; 9 — образец; 10 — измерительный электрод (обкладка конденсаторного датчика потенциала); 11 — преобразователь ток-напряжение; 12 — «чашка»; 13 — экран; 14 — криобокс системы охлаждения; 15 — сосуд Дьюара с жидким азотом; 16 — нагревательный элемент (галогенная лампа); 17 — источник питания АКТАКОМ APS-3103; 18 — плоский зонд Ленгмюра с охранным кольцом; 19 — пикоамперметр Keithley 6485; 20 — блок питания; 21 — перегородка; 22 — источник плазмы ВП-30; 23 — высоковольтный блок питания FUG HCP 35-3500; 24 — система подачи ксенона; 25 — односеточный зонд; 26 — вольтметр универсальный В7-21А

ка ионов наблюдается резкое изменение потенциала, которое датчик напряженности поля не может зафиксировать в силу своей инерционности. Поэтому внутри чашки под образцом на расстоянии 1 мм установлен измерительный электрод 10 (диаметр электрода — 138 мм), предназначенный для регистрации быстрых изменений потенциала образца. Этот электрод представляет собой обкладку конденсаторного датчика потенциала, который регистрирует изменения потенциала образца по величине тока смещения, индуцированного на электроде. Измерение тока смещения производится преобразователем ток-напряжение (ПТН) по схеме, приведенной на рис. 2. Электрод защищен от воздействия плазмы лабиринтным уплотнением, образованным отверстиями в днище чашки и экраном 13.

Температурный режим образца обеспечивается следующим образом.

Чашка с образцом помещена в термобокс 14. Охлаждение термобокса производится путем про-

пускания жидкого азота по трубкам, припаянным к стенкам термобокса. Подача жидкого азота осуществляется из сосуда Дьюара 15 с вытеснительной системой подачи. Нагрев термобокса производится галогенными лампами 16. Температура образца фиксируется термосопротивлением 5.

В качестве образца использовался диск из фторопласта марки Ф4Д диаметром 160 мм и толщиной 3 мм (зона облучения — круг диаметром 110 мм). Облучение образца производилось электронами с энергией 70 кВ и плотностью тока 1.2 нА/см². Стеkanie заряда с образца за счет объемной и поверхностной проводимости практически отсутствовало. Ток разряда источника плазмы — 0.45 мА, ускоряющее напряжение — 600 В, рабочее тело — аргон.

При такой схеме эксперимента на заряженный образец попадали только ионы перезарядки, образующиеся при взаимодействии ускоренных ионов струи ИП с остаточным газом вакуумной камеры. По оцен-

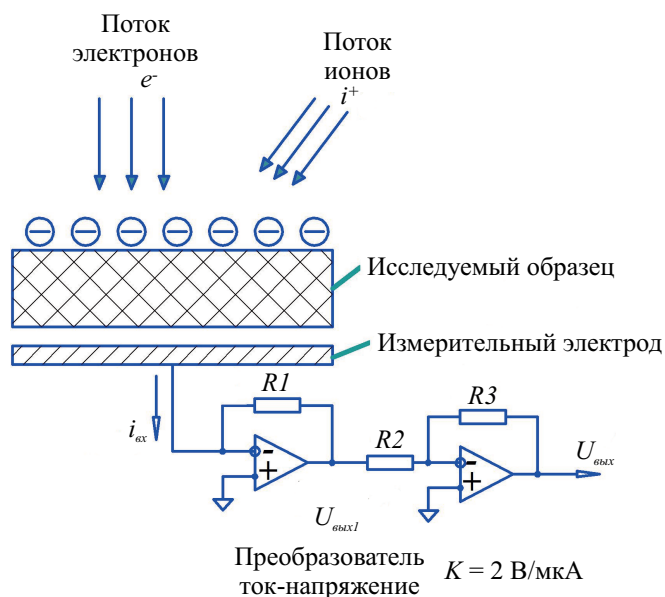


Рис. 2: Схема конденсаторного датчика для измерения быстрых изменений потенциала поверхности образца в процессе его разрядки

кам, полный ионный ток, проникающий в область установки образца, составлял около 4 мкА, концентрация плазмы — $1.75 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$, средняя энергия ионов 5 – 10 эВ, температура электронов 15 эВ.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость накопления заряда образцом от времени облучения представлена на рис. 3.

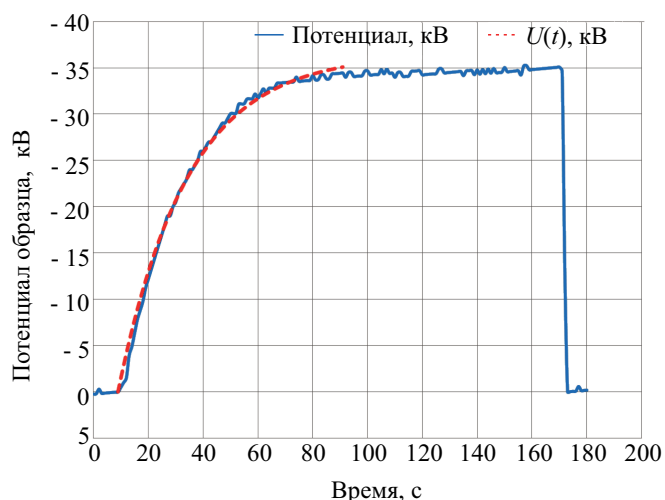


Рис. 3: Динамика зарядки образца (по показаниям ДЭП)

Видно, что кривая зарядки имеет экспоненциальный характер и ее можно аппроксимировать функцией [6]:

$$U(t) = U_{max}(1 - \exp\left\{-\frac{t}{\tau_{char}}\right\}), \quad (1)$$

где U_{max} — предельное значение потенциала (равновесное значение); τ_{char} — постоянная времени зарядки; t — время от начала процесса зарядки.

Аппроксимируя кривую зарядки зависимостью (1), определяют значения U_{max} и τ_{char} .

Импульс напряжения на выходе преобразователя ток-напряжения и изменение тока разряда источника плазмы представлены на осциллограмме (рис. 4).

Из рис. 4 следует, что время выхода источника на стационарный режим составляет около 0.2 секунд, поэтому начальный участок кривой тока смещения — переходный процесс, на котором происходит возрастание ионного тока. Если бы источник выходил на режим мгновенно, то ток смещения в начальный момент времени имел бы максимальное значение и плавно снижался по мере релаксации накопленного заряда. Добиться такого режима даже при удалении источника ионов на большое расстояние от образца и применении защитного экрана в данном эксперименте не удалось, поэтому ток смещения первые 0.2 секунды возрастает, достигает максимума и только после этого начинает падать. Однако весьма неожиданным было появление второго максимума на кривой тока смещения, появившегося после выхода источника на стационарный режим.

Оцифрованная кривая зависимости тока смещения $I_D(t)$ от времени приведена на рис. 5. Положение второго максимума отмечено стрелкой.

По этой кривой можно восстановить зависимость потенциала образца от времени $U(t)$ после включения источника плазмы, используя соотношение:

$$U(t) = U_{max} - \frac{1}{C_D} \int_0^t I_D(t) dt, \quad (2)$$

где C_D — эквивалентная емкость между электродом и заряженной поверхностью образца, определяемая из условия $U(t) = 0$ при $t \rightarrow \infty$. Полученная зависимость $U(t)$ приведена на рис. 6.

Полный ионный ток в зависимости от напряжения на образце измерялся в отдельном эксперименте путем подачи на образец постоянного напряжения в диапазоне 0 – 1.5 кВ. При больших напряжениях (до 30 – 50 кВ) ионный ток экстраполируется зависимостью [7, 8]:

$$I_i(t) = I_{sat} \left(1 - \frac{e|U(t)|}{kT_e}\right), \quad I_{sat} = 0.8en_0 \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}} S_{sur}, \quad (3)$$

где e — заряд электрона; k — постоянная Больцмана; T_e — температура электронов; n_0 — концентрация невозмущенной плазмы; m_i — масса иона; S_{sur} — площадь поверхности образца (используется в качестве подгоночного параметра).

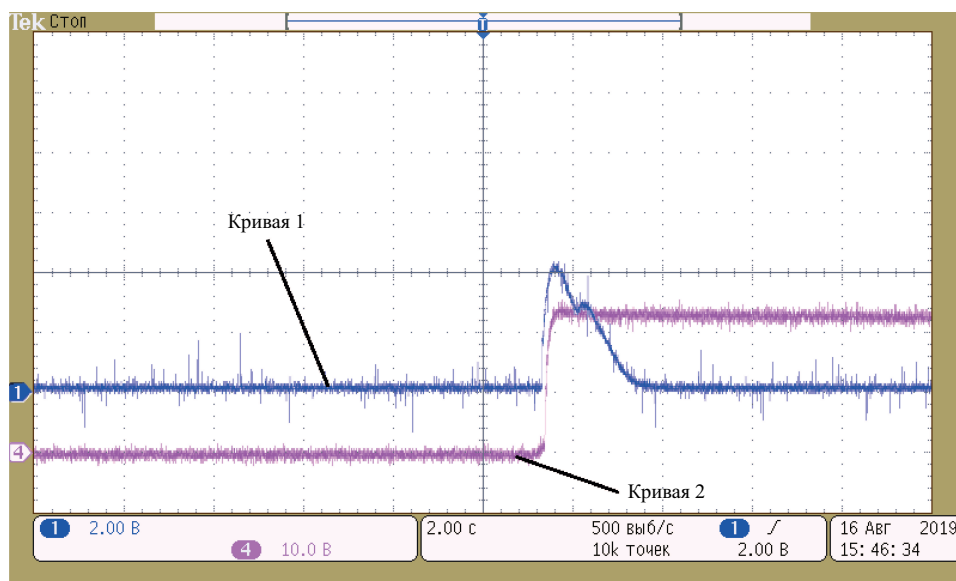


Рис. 4: Оциллограмма: напряжение на выходе ПТН (кривая 1) и изменение тока разряда ИП (кривая 2)

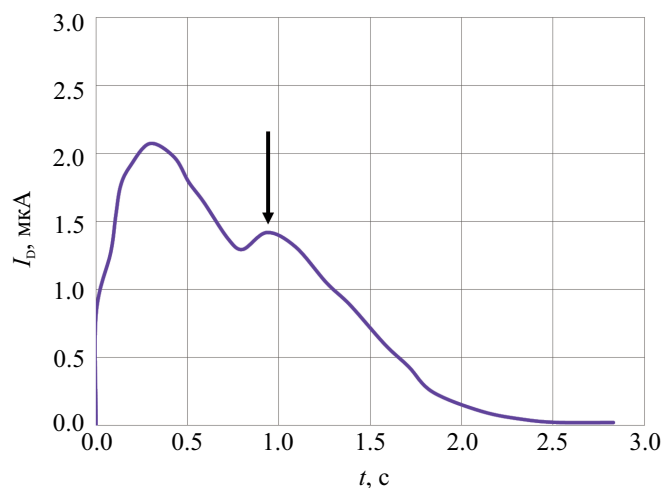


Рис. 5: Динамика изменения тока смещения (по показаниям конденсаторного датчика)

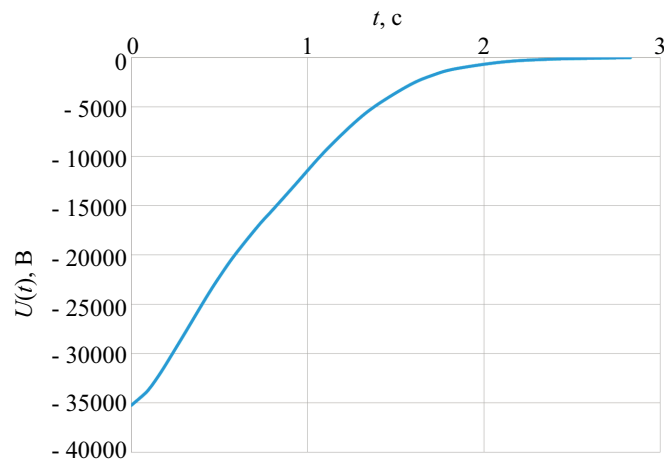


Рис. 6: Динамика изменения потенциала поверхности образца при включении ИП (по показаниям конденсаторного датчика)

Через производную $\frac{dU(t)}{dt}$ на кривой разряда оценивают полный ток релаксации накопленного заряда:

$$I_r(t) = C_S \left(\frac{dU(t)}{dt} \right)_{dischar}, \quad (4)$$

где C_S — эквивалентная емкость образца, определяемая по формуле

$$C_S = \frac{I_e \cdot \tau_{char}}{U_{max}}, \quad (5)$$

где I_e — полный ток электронов на поверхность образца, измеренный в эксперименте.

На рис. 7 представлена зависимость I_r от U , полученная путем отображения кривых $I_r(t)$ и $U(t)$ на

плоскость (I_r, U) в различные моменты времени. Там же приведена экстраполированная зависимость полного ионного тока от напряжения на образце (пунктир).

Нелинейный характер кривой релаксации на рис. 7 указывает на то, что механизм релаксации накопленного заряда более сложный, чем было принято считать ранее. Нелинейность данного процесса может быть связана с наличием в приповерхностном слое радиационно-заряженного диэлектрика двойного слоя положительных и отрицательных зарядов [9]. Возможно, что в начальный момент времени электроны с большой глубины (10 – 30 мкм) диффундируют к поверхности, а релаксация заряда происходит только за счет вторичной ион-электронной эмиссии, сопровождающейся образованием дырок и удержанием ионов

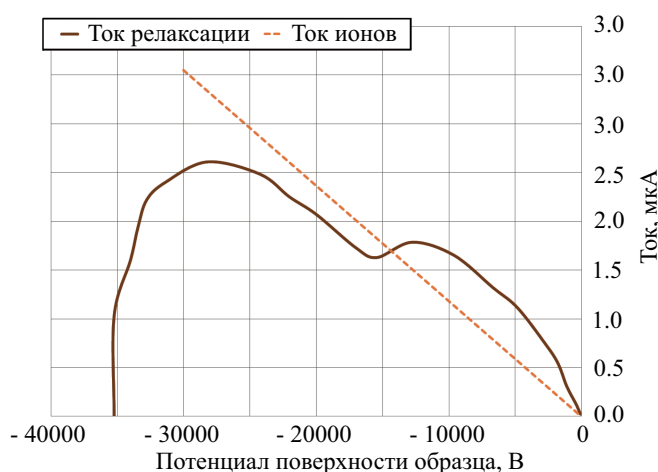


Рис. 7: Кривая релаксации накопленного заряда

плазмы в подповерхностных слоях образца на глубине 5 – 10 нм. На этой стадии количество положительных зарядов (ионы и дырки) увеличивается, а количество отрицательных зарядов (электроны) остается неизменным. Суммарный заряд образца падает, но напряженность поля в диэлектрике возрастает. В некоторый момент времени электроны подходят к поверхности настолько близко, что начинают участвовать в процессах эмиссии и рекомбинации накопленных ионов и дырок. Интенсивность релаксации зарядов при этом резко возрастает, что и проявляется в характерном максимуме на кривой тока смещения.

- [1] Новиков Л. С., Милеев В. Н., Крупников К. К., Маклецов А. А. Модель космоса, т.2, М.: «Книжный дом Университет», 2007.
- [2] Новиков Л. С. Взаимодействие космических аппаратов с окружающей плазмой. М.: Университетская книга, 2006.
- [3] Бургасов М. П., Безнос И. А., Верхотуров В. И., Чиров А. А. и др. Исследования по геомагнетизму, астрономии и физике солнца. М.: Наука, 1992.
- [4] Чиров А. А., Надирадзе А. Б., Шапошников В. В. // Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтрон. исслед. 2014. № 7. С. 74.
- [5] Горшков О. А., Муравлёв В. А., Шагайда А. А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. М.: Машиностроение, 2008.
- [6] Рау Э. И., Евстафьева Е. Н., Андрианов М. В. Физика твердого тела, 2008, **50**.
- [7] Козлов О. В. Электрический зонд в плазме, книга. М.: Атомизда 1969.
- [8] Sirghi L., Popa G., Alexandroaiei D., Costin C. Plasma diagnostics by electrical probes. Practicum manual and documentation. Romania, Iasi, 2011.
- [9] Евстафьева Е. Н. Дисс. на соискание ученой степени кандидата ф-м. наук. М.: МГУ, 2009.

Relaxation of electric charge of dielectric materials in plasma of an electric propulsion

S. S. Blyakharsky^a, Ya. S. Blyakharsky^b, A. B. Nadiradze^c

Department of Electric propulsion and spacecraft power plants, the Institute of number 2 «Aircraft, rocket engines and power plants», Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI)
Moscow, 125993, Russia

E-mail: ^ablahartss@yandex.ru, ^bblahartys@yandex.ru, ^cnadiradze@mai.ru

This paper presents the results of an experimental study of the effect of low-temperature plasma of electric propulsion on the charge state of dielectric materials. The data on the dynamics of the relaxation process of the electric charge accumulated in the dielectric under irradiation with medium-energy electrons under the action of low-temperature plasma formed during the operation of the electric propulsion are obtained. It is shown that the relaxation process is nonlinear and proceeds in two stages, which may be due to the presence of a double layer of positive and negative charges in the surface layers of a radiation-charged dielectric.

PACS: 52.75, 52.90.+z, 52.80.??s, 29.27.Ac.

Keywords: dielectric charging, electric charge, surface potential, electric propulsion, low-temperature plasma, plasma-surface interaction, charge relaxation.

Received 26 February 2019.

Сведения об авторах

1. Надирадзе Андрей Борисович — доктор техн. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: nadiradze@mai.ru.
2. Бляхарский Святослав Станиславович — аспирант, инженер; e-mail: blahartss@yandex.ru.
3. Бляхарский Ярослав Станиславович — аспирант, инженер; e-mail: blahartys@yandex.ru.