

3. Пат. 2263305 РФ. Динамический способ исследования теплофизических свойств жидкостей и устройство для исследования теплофизических свойств жидкостей / В. Л. Веснин и др. // Изобретения. Полезные модели. 2005. № 30.

4. Берг А. Н., Николаев Д. М., Роде С. И. Термография. М.: Изд-во АН СССР, 1944.

5. Егунов В. П. Введение в термический анализ. Самара: СамВен, 1996.

6. Пат. 2183323 РФ. Способ исследования низкотемпературных свойств многокомпонентных жидкостей и устройство для его осуществления / М. Л. Конторович и др. // Изобретения. Полезные модели. 2002. № 12.

7. Соломин Б. А., Ходаков А. М. Сравнительный анализ схем термоохлаждающих устройств в установке для исследования теплофизических свойств жидкостей в условиях неравновесной термодинамики // Изв. Самар. науч. центра. РАН. 2008. № 3. С. 719—723.

8. Пат. 2419781 РФ. Вибровискозиметрический датчик / Б. А. Соломин, М. Л. Конторович, А. А. Подгорнов // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 15.

9. Пат. 2289125 РФ. Способ исследования термодинамического структурообразования жидких сред / Б. А. Соломин и др. // Изобретения. Полезные модели. 2006. № 34.

10. Пат. 2362152 РФ. Способ исследования процессов структурообразования в жидкостях / Б. А. Соломин, В. Б. Галкин, А. А. Подгорнов // Изобретения. Полезные модели.

11. Пат. 2365906 РФ. Способ исследования процессов структурообразования в жидкостях / Б. А. Соломин, А. А. Подгорнов // Там же.

12. Соломин Б. А., Галкин В. Б., Подгорнов А. А. Способ исследования межмолекулярных взаимодействий в многокомпонентных жидких средах методами неравновесной термодинамики // Изв. Самар. науч. центра. РАН. 2008. № 3. С. 732—738.

13. Соломин Б. А., Галкин В. Б., Подгорнов А. А. Способ исследования межмолекулярных взаимодействий в смазочных маслах методами неравновесной термодинамики // Химия и технология топлив и масел. 2008. № 5. С. 48—51.

14. Соломин Б. А. и др. Метод определения наличия восков и воскоподобных веществ в растительных маслах // Заводская лаборатория. 2010. Т. 76. № 5. С. 37—41.

15. Соломин Б. А., Галкин В. Б., Подгорнов А. А. Комплексное исследование термостимулированных микроструктурных процессов в смазочных маслах // Химия и технология топлив и масел. 2010 № 5. С. 47—51.

16. Низаметдинов А. М. и др. Метод количественного определения содержания восков в растительных маслах // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2013. Т. 15. № 4. С. 42—46.

Дата принятия 13.01.2014 г.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

629.786.2:537.29:537.24

### Электростатические явления вблизи низкоорбитальных космических аппаратов

Ю. А. ПЛАСТИНИН, И. Ю. СКРЯБИШЕВА

Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Королев, Россия,  
e-mail: 103300@rambler.ru

*Рассмотрено изменение поляризованных полярных составляющих околообъектовой среды вблизи заряженной поверхности низкоорбитальных космических аппаратов.*

**Ключевые слова:** низкоорбитальный космический аппарат, околообъектовая среда, атмосфера, ионосфера, кинетика, электростатическое поле, потенциал, напряженность.

*It was considering the behaviour of polarized polar contaminants forming environment near charged surfaces of low-orbital spacecrafts.*

**Key words:** low-orbital spacecraft, environment, atmosphere, ionosphere, kinetics, electrostatic field, potential, strength.

При проведении оптически тонких экспериментов на низких околоземных орбитах возникают проблемы, связанные с воздействием орбитальной среды на конструкционные материалы космических аппаратов (КА) [1—5]. Нейтральные, зарядовые составляющие и электромагнитное из-

лучение Солнца вызывают потоки возбужденных контантант в околообъектовой среде, которые создают шумы в видимом и оптическом диапазонах. Дополнительным источником такого шума также является заряд поверхности материала. Отрицательно заряженные поверхности притягивают

положительно заряженные ионы кислорода, преобладающие в рассматриваемой области высот, и поляризованные полярные составляющие околообъектовой среды, вызывая сложный комплекс плазменно-химических процессов вблизи и на заряженной поверхности, что в итоге оборачивается загрязнением и снижением качества материалов (стеклопленки оптико-электронных систем, защитных покрытий солнечных батарей (СБ) и т. д.).

Цель настоящей статьи — разработка метода определения электрической зарядки (полей и потенциалов) поверхности конструкционных материалов КА в условиях воздействия верхней ионосферы Земли для расчета притока поляризованных загрязнителей к заряженной поверхности КА, вызывающих указанные эффекты. Для достижения поставленной цели рассмотрим модель расчета электростатических полей на примере тонкой оптически прозрачной диэлектрической пленки (моделирующей кварцевое покрытие СБ) и применим ее для высот функционирования низкоорбитальных КА.

**Модель расчета электростатических полей и потенциалов заряженного диэлектрического покрытия низкоорбитальных КА.** В основу методики расчета положена стационарная модель однослойного диэлектрика с подвижными и захваченными ловушками носителями в пренебрежении их диффузией [6]. Изначально эта модель предназначалась для высокоорбитальных КА. В области низких орбит характер околообъектовой среды существенно меняется. Суть этих изменений в следующем.

Верхнюю среднелатитудную атмосферу можно условно разделить на две области: первая — ниже 100 км (гомогенная атмосфера, состоящая из  $N_2$  (~80 %),  $O_2$  (~18 %), небольшой примеси  $NO_2$ ,  $Ar$  и др. газов); вторая — выше 100 км (в результате фотодиссоциации молекулярного кислорода начинают преобладать атомы  $O$ ). На высотах около 500 км в зависимости от активности Солнца и расположения орбиты КА изменяются плотность нейтральных составляющих свободной атмосферы в диапазоне  $2 \cdot 10^{12} — 3 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3}$ , кинетическая температура газа 500—2000 К, давление  $1,33 \cdot (10^{-8} — 10^{-6})$  Па. Ультрафиолетовое и вакуумное ультрафиолетовое излучения проникают в атмосферу до высот порядка 60 км от поверхности земли, способствуя возникновению возбужденных и заряженных составляющих. Высотное

изменение плотности нейтральных частиц, частоты ионизации и поглощения излучения атмосферой приводит к формированию структурных слоев ионосферы ( $D$ ,  $E$ ,  $F1$  и  $F2$ ) [7].

Таким образом, в модель расчета электростатических полей и потенциалов заряженных покрытий для низкоорбитальных КА необходимо вносить изменения. На граничные условия влияют: электронная составляющая ионосферы с ограничением до 0,1 эВ в предположении максвелловского распределения частиц по скоростям, значения которых значительно превышают скорость движения самого КА; ионная составляющая с преобладанием положительно заряженных ионов  $O^+$ , тепловая скорость которых много меньше скорости движения КА; фотоны с энергиями 1,55 — 12,23 эВ. Начальные концентрации частиц свободной ионосферы определяют по модели IRI [8].

В отличие от области высоких орбит, где присутствие частиц высоких энергий обуславливает накопление значительного объемного заряда, в рассматриваемой области основополагающую роль в процессах зарядки играют поверхностные эффекты, связанные с изменением потенциала поверхности и его градиента. Кроме того, задание нулевого потенциала на необлучаемом контакте (подложке)  $\varphi_c = 0$  означает отсутствие инжекционных токов с него. В любом случае при  $\varphi_c = 0$  или  $\varphi_c \neq 0$  напряженность  $E$  электростатического поля объемного заряда по толщине  $d$  диэлектрического слоя на каждом  $i$ -м шаге вычислений определяют по формуле

$$E(x_i) = j(x_i) / [q\mu_0 n_0(x_i)],$$

где  $j(x_i)$  — плотность тока утечки заряда внутри диэлектрического слоя;  $n_0(x_i)$  — концентрация свободных носителей  $q$ , обуславливающая проводимость диэлектрического слоя;  $\mu_0 = 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  — истинная подвижность.

Так как токи утечки создают микроскопические поля, усредненная плотность такого заряда мала по сравнению с токами инжекции из ионосферы, что не противоречит классической теории электромагнитного поля. Как и в [9], инжекцию зарядов с контактов определяют по градиенту потенциала  $\Delta\varphi/\Delta x$ . Вторично-эмиссионными процессами ионов пренебрегают.

На рис. 1 представлены тестовые расчеты основных электрофизических характеристик кварцевого покрытия, облуча-

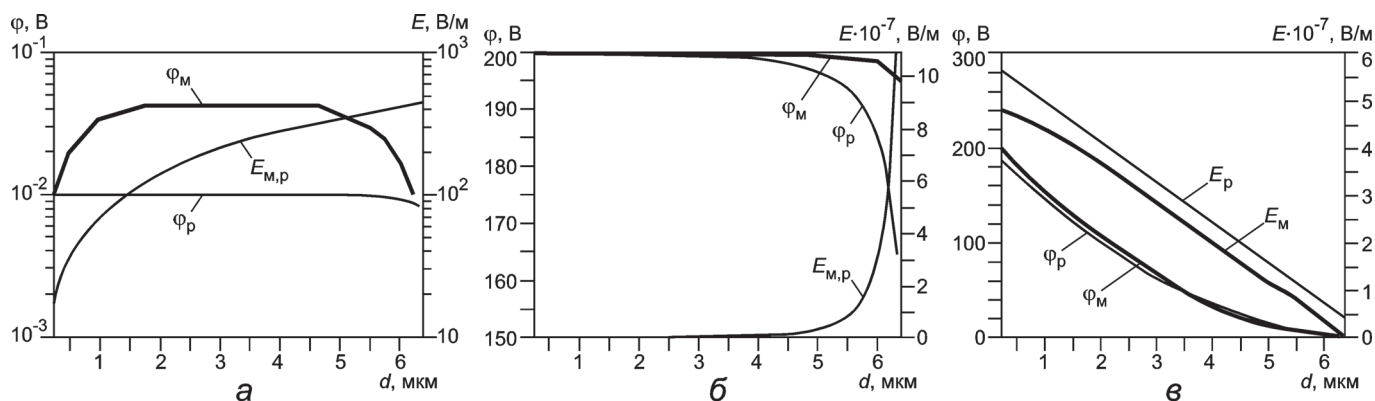


Рис. 1. Распределение потенциала  $\varphi$  и напряженности  $E$  электрического поля по толщине кварцевого покрытия  $d = 6,4$  мкм:

а — инжекция носителей с необлучаемого контакта отсутствует,  $\varphi_d \approx \varphi_c$ ; б —  $\varphi_d = 200$  В и  $\varphi_c = 0$ ; в — инжекция носителей с необлучаемого контакта учитывается,  $\varphi_d = 200$  В и  $\varphi_c = 0$ ;  $\varphi_M$ ,  $E_M$  — представлены в [9],  $\varphi_P$ ,  $E_P$  — рассчитанные в настоящей работе

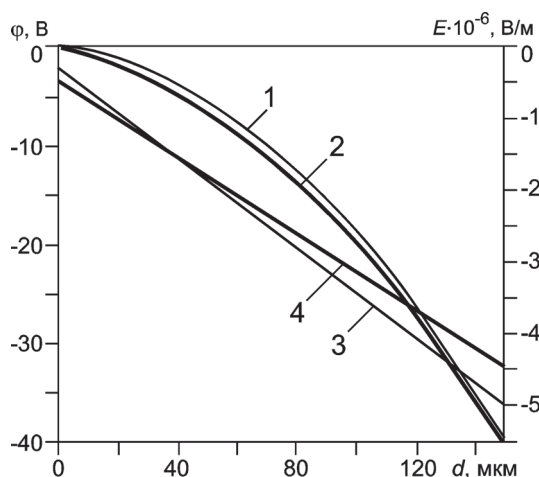


Рис. 2. Распределение потенциала  $\phi$  (кривые 1, 2) и напряженности  $E$  (кривые 3, 4) электростатического поля по толщине кварцевой пленки  $d = 150$  мкм при  $\phi_d = 0$ ,  $\phi_c = -40$  В:

1, 3 —  $\phi_p$ ,  $E_p$  при максимальной энергии электронов ионосферы  $E_{e, \max} = 0,1$  эВ, рассчитанный  $\phi_d = -11,37$  В; 2, 4 —  $\phi_p$ ,  $E_p$  при  $E_{e, \max} = 100$  эВ, рассчитанный  $\phi_d = -37,56$  В

емого электронами с энергией 28 кэВ. Толщина образца составляет 6,4 мкм. Рассмотрены различные варианты зарядки облучаемой поверхности. Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы. Рассчитанные кривые практически совпадают с результатами, представленными в [9]:

случай, изображенный на рис. 1, а, соответствует слабой зарядке облучаемой поверхности  $\phi_d = \pm 0,01$  В и отсутствию инжекции с необлучаемого контакта  $\phi_c = 0$ . При  $\phi_d > 0$  облучаемая поверхность собирает электроны с учетом их эмиссии, чтобы компенсировать положительный объемный заряд, сосредоточенный у противоположного необлучаемого

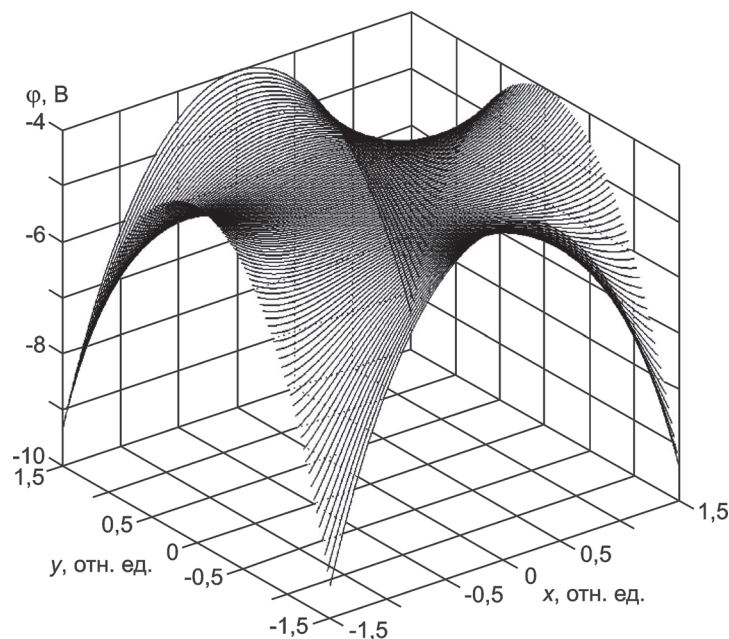


Рис. 3. Распределение потенциала по поверхности кварца, заряженного до уровня  $\phi_d = -11,37$  В

контакта. Аналогичный характер имеет поле в случае, показанном на рис. 1, б. Для  $\phi_d < 0$  и  $\phi_c = 0$  облучаемая поверхность собирает электроны с большей энергией, обуславливая накопление отрицательного объемного заряда у подложки;

при инжекции носителей с необлучаемого контакта (см. рис. 1, в) характер поля спадающий. В отличие от результатов, приведенных в [9], инжекцию на необлучаемом контакте учитывают введением на нем двух граничных условий — величин  $d\phi/dx$  и  $\phi_c \neq 0$ . В противоположность предыдущему результату здесь инжекция существенно ослабляет напряженность поля  $E$ , особенно если  $\phi_c > 0$ . При  $\phi_c < 0$  возникает потенциальный барьер, препятствующий инжекции, тогда  $E$  снижается несущественно.

Разработанная инжекционная модель расчета электростатических полей в заряженных диэлектрических покрытиях низкоорбитальных КА позволяет совмещать теорию пространственного заряда и контактные эффекты.

Далее рассчитывают аналогичные зависимости для кварцевой пленки толщиной  $d = 150$  мкм, моделирующей элемент покрытия СБ КА орбитального типа в потоках низкотемпературной разреженной частично ионизированной ионосферной плазмы: на рис. 2 представлен результат расчета распределений потенциала и напряженности поля по толщине, а на рис. 3 — распределение потенциала по поверхности. Все расчеты проводили при температуре диэлектрика, равной параметру энергетического распределения ловушек в запрещенной зоне.

В рассматриваемой области высот серьезную опасность представляют высоковольтные перемишки СБ, которые могут взаимодействовать с окружающей плазмой, вызывая дуговые разряды или мощные разрядные токи [2]. Высоковольтные панели СБ КА крепят таким образом, чтобы их отрицательный потенциал был заземлен на корпус аппарата, а весь КА имел «плавающий» отрицательный потенциал по отношению к ионосфере. В рассматриваемой области высот потоки подвижных электронов устремляются на положительные поверхности, в то время как отрицательные с усилием собирают тяжелые малоподвижные ионы. Поэтому 90 % напряжения СБ оказывается на отрицательном электроде и только 10 % — на положительном. Таким образом, плавающий отрицательный потенциал может достигать более 140 В, что превышает порог прочности диэлектриков анодируемых покрытий алюминиевой конструкции КА. Поскольку рабочее напряжение составляет 40 В, то его принимают как абсолютное значение потенциала необлучаемого кварцевого покрытия СБ.

Анализ рис. 2, 3 позволяет сделать следующие выводы. Рассмотрены исходные характеристики зарядки диэлектрического слоя в потоках ионосферной плазмы — усредненные значения потоков электронов, положительно заряженных ионов  $O^+$  и фотоэлектронов, составившие 4,81, 2,45 и 1,3 нА/см<sup>2</sup>, соответственно. Несмотря на существующее разделение поверхностных и объемных радиационных процессов зарядки диэлектриков в условиях воздействия факторов космического пространства, в приведенном случае эти явления совмещены: объемный заряд сосредоточен в непосредственно примыкающем к облучаемой поверхности слое толщиной менее 1 нм, в котором обычно происходит эмиссия электронов и фотоэлектронов.

Практический интерес представляет расчет напряженности поля  $E$  и потенциала  $\phi_d$  на облучаемой поверхности.

Предположим, что начальное значение  $\varphi_d = 0$ . На освещенном участке трассы полета КА рассмотрим отрицательную зарядку подложки  $\varphi_c = -40$  В. При максимальной энергии электронов ионосферы  $E_{e, \max}$  равной 0,1 и 100 эВ<sup>1</sup>, рассчитанные значения напряженности поля объемного заряда в приповерхностном слое соответствуют потенциалу –11,37 и –37,56 В, соответственно (см. рис. 2). Такой случай зарядки вызовет отток электронов от облучаемой поверхности, возникновение в объеме диэлектрического слоя сильных, более  $10^6$  В/м, электростатических полей и инжекционных токов (токов утечки) до 0,2 нА/см<sup>2</sup> из необлучаемой области. Приток положительно заряженных ионов и поляризованных полярных составляющих околообъектовой среды (ООС) на облучаемую поверхность обусловит ее оптическое загрязнение.

Для оценки характера оптического загрязнения прямоугольного диэлектрического слоя необходимо рассмотреть структуру поля по его поверхности (см. рис. 3), рассчитанную при решении краевой задачи

$$\frac{\partial^2 \varphi(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi(x, y)}{\partial y^2} = \frac{e^2 \mu_0}{\varepsilon \varepsilon_0 k_{\text{рек}}} \frac{G_0 D(x, y)}{\sigma(x, y)} + \frac{M_0}{\varepsilon \varepsilon_0 \mu_0 \tilde{N}_0} \sigma(x, y); \quad (1)$$

$$\varphi(x_{\min}, y) = \varphi_d f_1(y); \quad \varphi(x_{\max}, y) = \varphi_d f_2(y);$$

$$\varphi(x, y_{\min}) = \varphi_d f_3(x); \quad \varphi(x, y_{\max}) = \varphi_d f_4(x),$$

где  $k_{\text{рек}} = 10^{-15}$  м<sup>-3</sup>/с — коэффициент рекомбинации;  $M_0 = 10^{25}$  м<sup>-3</sup> — суммарная концентрация всех ловушек, экспоненциально распределенных в запрещенной зоне диэлектрика;  $\tilde{N}_0 = 10^{25}$  м<sup>-3</sup> — концентрация состояний у дна зоны проводимости;  $G_0 D(x, y)$  — скорость термализации электронно-дырочных пар в диэлектрическом слое;  $\sigma(x, y)$  — электропроводность диэлектрика;  $\varphi_d f_i(x_i)$ ,  $\varphi_d f_i(y_i)$  — функциональные зависимости потенциала в приграничной области. Для учета стока заряда на края выберем экспоненциальную форму функции  $f_i(x_i)$  [10]:

$$f_i(x_i) = C_1 (e^{-x_i} + e^{x_i}),$$

где  $C_1$  — константа.

Поскольку правая часть уравнения (1) определяется видом функции  $G_0 D(x, y)$ , являющейся функцией источника, зададим для нее зависимость:

$$G_0 D(x, y) = C_2 (e^{-2x^2} + e^{-2y^2}),$$

где  $C_2$  — константа.

Заряд перераспределяется (см. рис. 3) таким образом, что основная его часть сосредотачивается вблизи краев, где  $E \approx 1,5 \cdot 10^6$  В/м и наиболее вероятно загрязнение полярными составляющими ООС КА, в то время как в центральной части прямоугольника оно на порядок меньше. Похожее явление можно ожидать вблизи объективов бортовых оптических приборов.

<sup>1</sup> В зависимости от геомагнитной возмущенности возможно высыпание из магнитосферы мягких электронов с энергиями менее 1 кэВ, существенных для F-области, как дополнительный источник ионизации. В низкоширотную часть они попадают из высокоширотной F-области [7].

Теперь рассмотрим формирование потоков нейтральных и зарядовых составляющих ООС и определим их с использованием газовой-кинетического подхода.

**Расчет потоков основных и малочисленных составляющих околообъектовой среды вблизи заряженной поверхности КА.** В [10] представлена кинетическая модель ООС КА. В соответствие с экспериментальными данными ООС составляют нейтральные атомы и молекулы, а также электроны и положительные ионы: О, О<sub>2</sub>, N, N<sub>2</sub>, H, H<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, OH, H<sub>2</sub>O, HO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, e, O<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup> и NO<sup>+</sup>. Их начальные значения рассчитывают по моделям MSIS [11] и IRI. Между составляющими ООС протекают гетерогенные и гомогенные процессы, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Гетерогенные и гомогенные процессы вблизи заряженной поверхности КА

| Название процесса                            | Формула                                                   |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Физическая адсорбция и термическая десорбция | $\vec{M} + X \leftrightarrow M^S$                         |
| Столкновительная десорбция                   | $\vec{M}_1 + M_2^S \rightarrow \vec{M}_2 + \vec{M}_1 + X$ |
| Реакции Эли—Ридела                           | $\vec{M}_1 + M_2^S \rightarrow M_3^S + M_4$               |
| Реакции Ленгмюра—Хиншельвуда                 | $M_1^S + M_2^S \rightarrow M_3^S + X$                     |
| Фотодиссоциация                              | $M_1 M_2 + h\nu \rightarrow M_1 + M_2$                    |
| Радиативная рекомбинация                     | $e + A^+ \rightarrow A + h\nu$                            |
| Диссоциативная рекомбинация                  | $e + AB^+ \rightarrow A + B$                              |
| Радиационный захват и фотоотрыв              | $e + A^- \rightarrow A + h\nu$                            |
| Ассоциативное отлипание электрона            | $A^- + B \rightarrow AB + e$                              |
| Фотоионизация                                | $A + h\nu \rightarrow e + A^+$                            |

Здесь  $M$  — основные и малые составляющие ООС;  $X$  — вакансии для нейтральной частицы на поверхности;  $A^+$ ,  $AB^+$  — простой и составной положительные ионы, соответственно;  $e$  — электрон;  $h\nu$  — энергия фотона; стрелки в процессах указывают направление потоков составляющих ООС от или к поверхности КА.

Далее для расчета потоков основных и малых составляющих ООС рассматривают их кинетику. Совмещение гетерогенных и гомогенных процессов в общей системе линейных дифференциальных кинетических уравнений проводят интегрированием по толщине столба ООС концентрации поляризованных полярных загрязнителей, определяемой по значению их потока [4].

Аналитические зависимости расчета потоков различных составляющих ООС определяют или аналогично [4], или по константе скорости процесса с учетом движения КА.

В общем случае поток частиц сорта  $Q$ , распределенных изотропно и движущихся со скоростью  $v$ , определяют по концентрациям частиц  $n_Q$ :

$$\bar{n}_a Fr = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} n_Q v \cos \theta d\Omega,$$

где  $d\Omega = d\varphi \sin \theta d\theta$  — элемент телесного угла;  $\theta$  — угол между нормалью к поверхности КА и направлением скорости частицы;  $Q$  соответствует основным и малочисленным составляющим свободной атмосферы;  $\bar{n}_a$  — количество активных центров на элементе поверхности;  $Fr$  — поток частиц вблизи поверхности КА.

В табл. 2 представлены аналитические зависимости потоков на фронтальную поверхность КА для следующих составляющих ООС: NO, NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H, H<sub>2</sub>, OH\* (возбуждающий гидроксил).

В табл. 2:  $\sigma$  — сечение реакций столкновения частиц ООС;  $x$  — максимальный диаметр поперечного сечения КА, ориентированного вдоль потока частиц атмосферы Земли, налетающих под углом  $\vartheta$  к его поверхности;  $k$  — константа скорости бимолекулярных гомогенных процессов, происходящих вблизи поверхности КА (константы отсутствуют для процессов с указанием сечения столкновения молекул);  $T$  — температура ООС.

Ранее при рассмотрении зарядки поверхности тонкого оптически прозрачного диэлектрического покрытия КА установлено, что ее потенциал при прочих заданных условиях составляет  $-11,37$  В. Тогда напряженность электростатического поля у поверхности  $E \approx 2,7 \cdot 10^5$  В/м.

Одной из доминирующих загрязнителей ООС являются пары воды [12]. Под действием электрического поля заряженной поверхности КА облако нейтральных молекул H<sub>2</sub>O поляризуется, в нем возникают дипольные моменты, поэтому дипольные молекулы притянутся к такой поверхности. Таким образом, помимо напряженности поля  $E$  их траекторию определяют индукция  $D$  облака водяных паров и поляризация  $P$  молекул H<sub>2</sub>O. Если рассматривать ООС как диэлектрик с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , то внешнее электрическое поле зарядов поверхности  $E = (D - P)/\epsilon_0$ .

Моделированием поведения облака водяных паров между заряженными пластинами получают выражение для напряженности результирующего поля [13—15]:

$$E_{\Sigma} = E - n_0 \mu_{H_2O} / \epsilon_0 = E - E_{H_2O},$$

где  $n_0$  — концентрация водяных паров в единице объема среды;  $\mu_{H_2O} = 6,14 \cdot 10^{-30}$  Кл · м — дипольный момент одной молекулы воды.

Для  $n_0 \approx 10^{23}$  м<sup>-3</sup> имеем  $E_{H_2O} \approx 6,94 \cdot 10^4$  В/м. Таким образом, для определения  $E_{\Sigma}$  необходимо знать структуру поля  $E$ , определенную при помощи представленной выше модели расчета электростатических полей и потенциалов по толщине заряженного диэлектрического покрытия низкорбитального КА.

**Расчет притока поляризованных полярных составляющих околообъектовой среды КА вследствие сил электростатического прилипания.** Для определения потоков раз-

Таблица 2

Аналитические зависимости потоков на поверхность КА

| Процесс                                                                                                                                                | Константа скорости $k$ , м <sup>3</sup> /с | Поток частиц на 1 м <sup>2</sup> поверхности, с <sup>-1</sup>                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\overleftarrow{N_2} + \overleftarrow{O} \rightarrow \overleftarrow{NO} + \overleftarrow{N}$<br>( $\sigma = 1,5 \cdot 10^{-20}$ м <sup>2</sup> )       | —                                          | $Fr1_{NO} = 6,4 \sigma_{N_2O} n_O n_{N_2} v x \cos \vartheta$                                                                                                                                                                                       |
| $N + O_2 \rightarrow NO + O$                                                                                                                           | $1,5 \cdot 10^{-17} \exp(-3600/T)$         | $Fr2_{NO} = 9,6 \cdot 10^{-17} \exp(-3600/T) n_N n_{O_2} x \cos \vartheta$                                                                                                                                                                          |
| $\overleftarrow{N_2} + \overleftarrow{O_2} \rightarrow \overleftarrow{NO_2} + \overleftarrow{N}$<br>( $\sigma = 1,5 \cdot 10^{-20}$ м <sup>2</sup> )   | —                                          | $Fr1_{NO_2} = 12,8 \sigma_{N_2O_2} n_{O_2} n_{N_2} v x \cos \vartheta$                                                                                                                                                                              |
| $NO + HO_2 \rightarrow NO_2 + OH$                                                                                                                      | $0,35 \cdot 10^{-17} \exp(250/T)$          | $Fr2_{NO_2} = 2,24 \cdot 10^{-17} \exp(250/T) n_{NO} n_{HO_2} x \cos \vartheta$                                                                                                                                                                     |
| $\overleftarrow{H_2O} + \overleftarrow{O_2} \rightarrow \overleftarrow{H_2O} + \overleftarrow{2O}$<br>( $\sigma = 1,5 \cdot 10^{-20}$ м <sup>2</sup> ) | —                                          | $Fr1_{H_2O} = 6,4 \sigma_{H_2OO_2} n_{H_2O} n_{O_2} v x \cos \vartheta$                                                                                                                                                                             |
| $OH + OH \rightarrow H_2O + O$                                                                                                                         | $4,2 \cdot 10^{-18} \exp(-240/T)$          | $Fr2_{H_2O} = \left\{ \left[ 2,688 \exp(-240/T) n_{OH} + 30,72 \exp\left(\frac{250}{T}\right) n_{H_2O} + 3,52 \exp\left(\frac{-2000}{T}\right) n_{H_2} \right] + \right.$<br>$\left. + 1,024 n_H n_{HO_2} \right\} \cdot 10^{-17} x \cos \vartheta$ |
| $OH + HO_2 \rightarrow H_2O + O_2$                                                                                                                     | $4,8 \cdot 10^{-17} \exp(-250/T)$          |                                                                                                                                                                                                                                                     |
| $OH + H_2 \rightarrow H_2O + H$                                                                                                                        | $5,5 \cdot 10^{-18} \exp(-2000/T)$         |                                                                                                                                                                                                                                                     |
| $H + HO_2 \rightarrow H_2O + O$                                                                                                                        | $1,6 \cdot 10^{-18}$                       |                                                                                                                                                                                                                                                     |
| $OH + O \rightarrow H + O_2$                                                                                                                           | $2,2 \cdot 10^{-17} \exp(120/T)$           | $Fr_H = 1,408 \cdot 10^{-16} \exp(120/T) n_{OH} n_O x \cos \vartheta$                                                                                                                                                                               |
| $H + HO_2 \rightarrow H_2 + O_2$                                                                                                                       | $0,73 \cdot 10^{-17}$                      | $Fr_{H_2} = 4,672 \cdot 10^{-17} n_H n_{HO_2} x \cos \vartheta$                                                                                                                                                                                     |
| $O + HO_2 \rightarrow OH^* + O_2$                                                                                                                      | $3,0 \cdot 10^{-17} \exp(200/T)$           | $Fr_{OH^*} = 1,92 \cdot 10^{-16} \exp(200/T) n_{HO_2} n_O x \cos \vartheta$                                                                                                                                                                         |

личных составляющих ООС используют газовой-кинетический подход — уравнение непрерывности для каждой составляющей среды вблизи поверхности КА, которое имеет вид [10]: для нейтральных составляющих

$$\frac{dn_i}{dt} = F_i \bar{n}_a S_i \sigma_i n_i \varepsilon_i - \frac{n_i}{\tau_i} - n_i \sum_{k=1}^N F_k \bar{n}_a \sigma_{ki} \pm \pm \sum_{j=1}^M F_j \bar{n}_a \sigma_{ji} n_j \pm \sum_{l=1}^L k_l n_l n_i + J_{di} n_i, \quad (2)$$

для заряженных составляющих

$$dn_{e,i} / dt = \mathfrak{Z} - k_{e,i} n_e n_{A^+} - k_{e,ia} n_{e,i} n_A + k_{cd} n_{A^-} n_A, \quad (3)$$

где  $F_i \bar{n}_a$  — налетающий под углом  $\vartheta$  к поверхности единичной площади поток нейтральных частиц сорта  $i$ ;  $\bar{n}_a$  — количество активных центров на поверхности;  $S_i \sigma_i$  — сечение реакции физической адсорбции с коэффициентом прилипания  $S_i$  для составляющих ООС сорта  $i$ ;  $\varepsilon_i$  — вероятность нахождения нейтральных частиц в набегающем потоке;  $1/\tau_i$  — скорость термической десорбции;  $k$  — константы скорости химических процессов на поверхности КА;  $J_{di} n_i$  — приток поляризованных молекул ООС вследствие сил электростатического прилипания;  $\mathfrak{Z}$  — скорость образования электронов и ионов в холодной плазме;  $k_{e,i} = 1/(\tau_e n_{A^+})$  — скорость электронно-ионной рекомбинации;  $k_{e,ia} = 1/(\tau_e n_A)$  — скорость радиативного прилипания электронов;  $k_{cd} = 1/(\tau_e n_{A^-})$  — скорость отлипания электронов при соударении с нейтралами. Предпоследнее слагаемое правой части равенства (2) определяет реакции Ленгмюра—Хиншельвуда.

Кинетический режим истечения потоков учтен зависимостью потока  $i$ -й составляющей  $F_i \bar{n}_a$  от числа Кнудсена аналогично [5].

Выражения (2), (3) с соответствующими граничными условиями в начальный момент времени формируют краевую задачу. Совместимость гомогенных и гетерогенных процессов, используемых в единой системе линейных дифференциальных уравнений, проводят интегрированием по толщине столба ООС объемного потока частиц, приходящих на единичную площадь поверхности.

Рассчитанные по указанной схеме высотные зависимости потоков составляющих ООС представлены в [5]. Однако в этих расчетах не учтено последнее слагаемое правой части выражения (2). Оценим его значение для поляризованных полярных молекул воды в области высот более 350 км.

Потоки молекул  $H_2O$ , как это следует из расчетов [5], составляют примерно  $10^{17} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , тогда их концентрация равна около  $1,3 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$ , а приток (за единицу времени) в слое пространственного заряда (слой Дебая) определяется как

$$J_{dH_2O} n_{H_2O} = e n_{H_2O} E_{\Sigma} / m_{H_2O} = 1,88 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Полученное значение сопоставимо с потоком молекул  $NO_2^*$ , присутствующих в ООС повсеместно ввиду малого дипольного момента (0,32 D), в отличие от полярных молекул воды, которые у заряженной поверхности будут скорее адсорбироваться, фотодиссоциировать и т. д. Вдали от поверхности экспериментально измеренный поток молекул  $H_2O$  будет, примерно  $10^{18} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Таким образом, в рассматриваемой области высот при вычислении потоков основных и малых составляющих ООС КА при помощи уравнений (2), (3) на реактивной поверхности слагаемым  $J_{dH_2O} n_{H_2O}$  пренебрегать нельзя.

**Выводы.** На основе разработанной инжекционной модели расчета электростатических полей и потенциалов заряженных диэлектрических покрытий низкоорбитальных космических аппаратов рассчитана зарядка кварцевого слоя в потоках ионосферной плазмы, позволившая оценить приток поляризованных полярных молекул  $H_2O$  в слое пространственного заряда. Полученное значение сопоставимо с потоком нейтральных молекул  $NO_2^*$ , присутствующих в околообъектовой среде повсеместно.

В работе представлены аналитические зависимости расчета потоков основных и малых нейтральных составляющих околообъектовой среды космических аппаратов.

## Л и т е р а т у р а

1. Tribble A. C. The Space Environment and its Impact on Spacecraft Design // AIAA 93-0491: 31<sup>st</sup> Aerospace Sci. Meeting. 1993.
2. Ferguson D. C., Hillard G. B. Low Earth orbit charging design guidelines. NASA/TP—2003-212287.
3. Гарретт Г. Б., Чатджян А., Гэбриел С. Б. Свечение над поверхностью КЛА и его влияние на работу бортовых систем // Аэрокосмическая техника. 1989. № 10. С. 64—90.
4. Корценштейн Н. М. и др. Математическое моделирование процессов, определяющих свечение вблизи поверхностей КА в орбитальном и суборбитальном полетах // Космические исследования. 2000. Т. 38. № 3. С. 268—277.
5. Анфимов Н. А. и др. Моделирование приповерхностного свечения и кинетики нейтральных и заряженных частиц при взаимодействии ионосферы Земли с поверхностью низкоорбитальных КА // Приложение к энциклопедии низкотемпературной плазмы. Диагностика плазмы: Справ. материалы. М.: Наука, 2006.
6. Скрыбышева И. Ю. Влияние фототока на объемный заряд диэлектрических покрытий низкоорбитальных космических аппаратов // Метрология. 2006. № 3. С. 33—47.
7. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988.
8. IRI. [Официальный сайт]. [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012\\_vitmo.htm](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.htm) (дата обращения 05.05.2013 г.).
9. Collins T. W., Holmstrom F. E., Churchill J. N. Charge distributions in MOS for large irradiation doses // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1979. V. NS-26. N. 6. P. 51—79.
10. Пластинин Ю. А., Скрыбышева И. Ю. К вопросу электростатического удерживания поляризованных примесей вблизи низкоорбитальных космических аппаратов // Метрология. 2012. № 11. С. 34—47.
11. MSIS. [Официальный сайт]. [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis\\_vitmo.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis_vitmo.html) (дата обращения 06.05.2013 г.).
12. Zhou D. K. e. a. IR excitation of contaminant water by oxygen for the space shuttle at low Earth orbit altitude // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. N. A10. P. 19.585—19.596.
13. Волькенштейн М. В. Строение и физические свойства молекул. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1955.
14. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: ИИЛ, 1961.
15. Леше А. Физика молекул. М.: Мир, 1987.

Дата принятия 13.12.2013 г.