

К ВОПРОСУ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО УДЕРЖИВАНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРИМЕСЕЙ ВБЛИЗИ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Ю. А. ПЛАСТИНИН, И. Ю. СКРЯБИШЕВА

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

Исследована кинетика основных и малых составляющих околообъектовой среды. Представлена база данных плазменно-химических процессов, протекающих вблизи заряженной поверхности низкоорбитальных космических аппаратов. Проанализированы результаты расчетов потоков нейтральных и заряженных составляющих околообъектовой среды по трассе их полета.

Ключевые слова: атмосфера, ионосфера, околообъектовая среда, космический аппарат, отсек полезной нагрузки, давление, полярные молекулы, положительные ионы, поток, электрическое поле.

The kinetics of basic and small components of the near spacecraft environment was investigated. The database of plasma-chemical processes near the charged coating of low-orbital spacecrafts is presented. The results of calculations of neutral and charged components of near object environment along the route of their flight have been analyzed.

Key words: atmosphere, ionosphere, near object environment, spacecraft, service load box, pressure, polar molecules, positive ions, flow, electric field.

Проблема электростатического удерживания поляризованных полярных примесей вблизи низкоорбитальных космических аппаратов (КА) – одна из важнейших задач моделирования околообъектовой среды (ООС). Отчасти это связано с использованием на борту дополнительных негерметично выполненных отсеков полезной нагрузки (ОПН) для научной аппаратуры. В настоящее время отсутствует кинетическая модель ООС, учитывающая повышение концентрации примесей (контаминант) за счет наличия у них магнитного момента. Достаточный объем экспериментальных данных для этой области высот говорит о существовании и длительном удерживании полярных контаминант вблизи КА [1 – 5], например, молекул H_2O . Фотолиз во-

дяного пара в вакуумном ультрафиолете (УФ) обеспечивает фоновое свечение гидроксильных групп в оптическом диапазоне, что сильно вредит высокоточным оптическим экспериментам и другим задачам, проводимым на борту. Помимо гидроксила помехи обеспечивают разные примеси (азотные составляющие, кислород и т. д.). Повышение их концентрации приводит к увеличению интенсивности фонового излучения. Поэтому целью настоящей работы является разработка кинетической модели ООС в рассмотренной области высот, учитывающей как нейтральные полярные, так и заряженные контаминанты, способные проникать и длительное время удерживаться вблизи заряженной поверхности КА. Для выполнения поставленной цели необходимо определить потоки основных и малых составляющих ООС на основании рассмотрения их кинетики и рассчитать электростатические поля вблизи конструктивных частей поверхности КА (блока с аппаратурой) с целью выявления «ловушек» контаминант ООС и последующей выдачей рекомендаций по локализациям примесей.

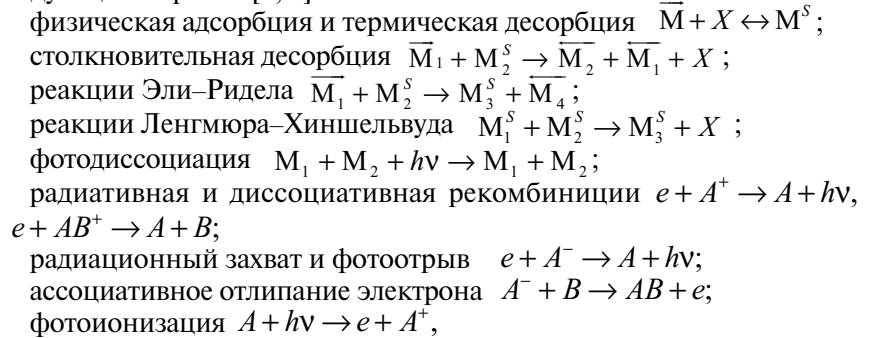
Поскольку интенсивность фонового свечения ООС КА определяют по величинам потоков как основных, так и малых ее составляющих контаминант [5], рассмотрим методику их расчета.

Расчет ионно-молекулярных потоков вблизи КА. Вопрос о параметрах ООС КА орбитального типа стал предметом пристального внимания более 30 лет назад при проведении первого космического эксперимента на орбитальной станции «Салют-7» по осаждению загрязнений на ее внешней поверхности, а также в продолжении полета СТС-74 при стыковке к орбитальной станции «Мир» в рамках программы «Мир–Шаттл» по исследованию загрязнений от струй двигателей (PIC) [6]. Аналогичные исследования проводили в рамках программы «Скайлэб».

При пилотируемых полетах для ООС КА характерно наличие частиц свободной атмосферы и ионосферы Земли, компонентов дегазации–выхлопов ЖРДУ и дренажных систем (в результате демпфирования), а также газовыделения материалов поверхности и переиспарения их загрязнений. В работе отмечено, что в обнаруженных на экспериментальной поверхности КА осаждениях выявлены органические и неорганические соединения в соотношении масс 55:45, причем неорганическая часть содержит в равных долях NO и NO₂. Также отмечалось наличие большого количества водяного пара и т.д. Таким образом, на основании многочисленных экспериментов можно выделить следующие основные и малые как нейтральные, так и зарядовые составляющие ООС – O,

O₂, N, N₂, NO, NO₂, H, H₂, OH, H₂O, электроны, положительные ионы кислорода и окиси азота и др. Указанные загрязнители формируют комплекс сложных гомогенных и гетерогенных физико-химических процессов, зависящих от характеристик свободного пространства. Последние используются в расчетах как начальные данные концентраций основных загрязнителей ООС. Они определяются по стандартным моделям MSIS и IRI для высокой активности Солнца (на 01.05.1991 $\bar{F}_{10,7}^c = 161,7$; $\bar{F}_{10,7}^m = 209,6$; $a_p = 27,4$).

В общем виде физико-химические реакции ООС можно записать следующим образом [5, 7]:



где M_i – основные и малые составляющие ООС КА; X – вакансии для нейтральной частицы на поверхности; A^+ , AB^+ – простой и составной положительные ионы; $h\nu$ – энергия фотона, h – постоянная Планка; ν – частота света.

Как показали экспериментальные исследования, даже на теневых участках полета КА в его ООС присутствуют фотоны крайнего УФ (рассеянное на ночную сторону геокороной излучение Солнца в резонансных линиях L_α водорода $\lambda_{L_\alpha} = 121,6$ нм), вызывающие фотоионизацию рассеянным излучением поляризованных загрязнителей при длинах волн $\lambda \leq \lambda_{\max}$ с образованием положительных ионов и надтепловых электронов [7]

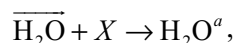


где A – газоподобные компоненты ООС.

Поэтому в области высот вплоть до 500 км основными положительными ионами будут NO⁺, O₂⁺ и O⁺.

Гетерогенные процессы при участии водорода и кислорода каталитические, время их протекания может не превышать 10⁻³ – 10⁻⁵ с и час-

тицы хемосорбируют из преадсорбционного состояния [8]. Адсорбция молекул H_2O на чистую поверхность принималась недиссоциативной

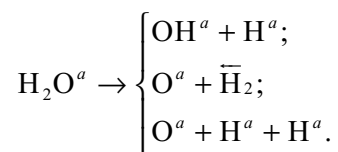


поскольку экспериментально установлено наличие мономеров воды при низких температурах ($< 160 \text{ K}$) на поверхности материалов, широко используемых в авиакосмической технике [9]. Этот факт объясняет молекулярное строение H_2O : $2s$ и $2p$ -электроны внешней оболочки атома кислорода взаимодействуют с $1s$ -электроном двух атомов водорода, оставляя два неподеленных электрона от атома О и по одному протону от каждого атома Н. Последние участвуют в образовании водородной связи между молекулами кристалла льда, а два неподеленных электрона адсорбируют на поверхности.

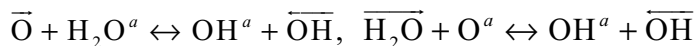
Оценим коэффициент прилипания S_Q процесса молекул воды к чистой поверхности. В соответствии с работой [10]:

$$S_Q = 1 - \frac{\vartheta \bar{n}_a W(\vartheta)}{F_{\text{H}_2\text{O}}},$$

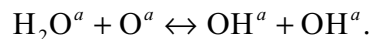
где ϑ – степень покрытия молекулами поверхности; $\bar{n}_a$ – концентрация центров адсорбции, $\bar{n}_a = 9,610^{18} \text{ м}^{-2}$ [5]; $W(\vartheta)$ – вероятность вакуумной сорбции, близка к единице [9]. При низких температурах отмечено малое покрытие поверхности молекулами H_2O и значение для ϑ можно принять равным $0,1 - 0,5$ (в зависимости от типа поверхности). Тогда при $F_{\text{H}_2\text{O}} \approx 10^{18} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ максимальное значение S_Q составит около $0,2$, и адсорбция будет диссоциативной по механизмам Эли–Ридела или Ленгмюра–Хиншельвуда:



В области полета низкоорбитальных КА ($400 - 350 \text{ км}$) основной составляющей свободной атмосферы Земли является атомарный кислород, активно хемосорбирующий с поверхностью КА. Поэтому указанные процессы были заменены гетерогенной рекомбинацией атомов, также протекающей по механизмам Эли–Ридела



или Ленгмюра–Хиншельвуда



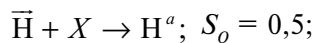
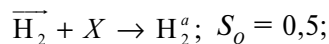
Известно, что для металлов гетерогенная рекомбинация при температурах космического пространства верхней атмосферы Земли протекает скорее с помощью механизма Эли–Ридела из-за слабой подвижности адсорбированных атомов и высокой степени заполнения поверхности, а при высоких температурах – с помощью второго механизма в силу высокой подвижности атомов и низкой степени заполнения поверхности. Кроме того, экспериментально установлено [11], что в этом случае молекулы H_2O способны глубоко проникать в поры адсорбента и хемосорбировать, формируя достаточно прочные OH -связи, уменьшая таким образом количество активных центров поверхности для адсорбции других загрязнителей.

При расчете потоков основных и малых составляющих ООС КА в дополнение к процессам, рассмотренным в [5], использовались следующие плазменно-химические реакции с константами их скорости [2 – 5, 7 – 10, 12]:

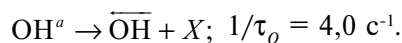
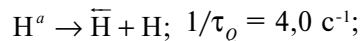
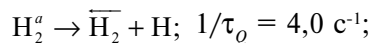
Нейтральные составляющие

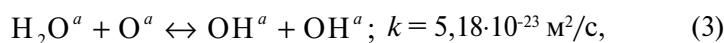
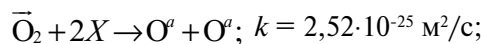
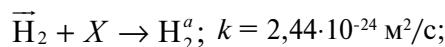
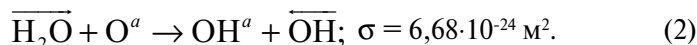
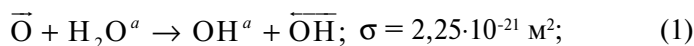
Гетерогенные процессы

Физическая адсорбция



Термическая десорбция





где $1/\tau_0$ – скорость термической десорбции; σ – сечение столкновений рекомбинирующих частиц; k – скорость гетерогенных процессов.

Гомогенные процессы при участии O, O(¹D), O₂, N, N₂, NO, NO₂, H, H₂, OH, H₂O, HO₂, H₂O₂, O⁺, O₂⁺, NO⁺, O⁻, O₂⁻ и OH⁻ с константами скорости описаны в [7, 12]. Сечения процессов (1), (2) рассчитывали при условии равенства физической адсорбции и сорбции по механизму Эли–Ридела [5, 11]. Скорость процесса (3) определяли с учетом сопоставления констант скорости аналогичного гомогенного процесса. За энергию активации принимали $\Delta E = 0,5973$ ккал/моль [11].

Скорости фотодиссоциации O₂ (в вакуумном УФ $\lambda \leq 242$ нм); H₂O ($\lambda \leq 242$ нм; $\lambda \leq 136$ нм и в L_α), H₂O₂ ($\lambda \leq 562$ нм), OH и NO₂ ($\lambda \leq 430$ нм) равны, соответственно: $4,1 \cdot 10^{-6}$; $4,3 \cdot 10^{-6}$; $1,3 \cdot 10^{-6}$; $4,6 \cdot 10^{-6}$; $8,5 \cdot 10^{-5}$; $48,0 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Сечение фотоотрыва электрона от отрицательного иона кислорода O₂⁻ и O⁻ принимали равным $5,0 \cdot 10^{-22}$ и $6,0 \cdot 10^{-22} \text{ м}^2$, а скорости фотоионизации NO ($\lambda \leq 134,15$ нм), O₂ ($\lambda \leq 102,93$ нм) и O ($\lambda \leq 91,3$ нм) – 0,08; 0,07 и 0,06 с⁻¹, соответственно [7, 12].

Таким образом, представленные выше плазменно-химические реакции с константами скорости, сечениями процессов сформировали базу данных, необходимую для расчета кинетики основных и малых составляющих ООС КА. Хотя немногочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о наличии в ООС отрицательных ионов (в частности, иона гидроксила), предположим, что изначально они при-

существуют в незначительных количествах. Одним из условий образования отрицательных ионов в холодной плазме являются частые столкновения между частицами, препятствующими существованию свободных электронов при их концентрации, значительно недостающей концентрации нейтралов. В свободной ионосфере, например, для высоты 400 км $n_e \approx 4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, $n_O \approx 10^8 \text{ см}^{-3}$, $n_{O_2} \approx 10^5 \text{ см}^{-3}$. Поэтому можно предположить, что радиативное прилипание электронов возможно скорее к атомам кислорода, чем к его молекулам. Что касается электроотрицательных гидроксильных групп, они могут быть производными молекул воды, находящейся в кристаллической фазе (если рассматривать сублимацию льда с поверхности КА ионными дефектами).

Далее с помощью газовой-кинетического подхода можно определить потоки различных составляющих ООС на поверхность КА, используя уравнение непрерывности для каждой компоненты среды вблизи поверхности, которое в общем виде записывается в следующей форме [5]:

$$\frac{dn_i}{dt} = F_i \bar{n}_a S_i \sigma_i n_i \epsilon_i - \frac{n_i}{\tau_i} - n_i \sum_{k=1}^N F_k \bar{n}_a \sigma_{ki} \pm \sum_{j=1}^M F_j \bar{n}_a \sigma_{ji} n_j \pm \sum_{l=1}^L K_l n_l n_i, \quad (4)$$

где n_i – концентрация частиц сорта i на поверхности КА; $F_i \bar{n}_a$ – набегающий под углом θ к поверхности единичной площади поток нейтральных частиц сорта i ; $S_i \sigma_i$ – сечение реакции физической адсорбции с коэффициентом прилипания S_i для составляющих ООС сорта i ; ϵ_i – вероятность нахождения нейтральных частиц в набегающем потоке; k_{ij} – константы скорости химических процессов на поверхности КА. Кинетический режим истечения потоков учтен в зависимости величины потока i -й составляющей $F_i \bar{n}_a$ от числа Кнудсена, аналогично [5].

Кинетика зарядовых составляющих ООС рассчитывается также с помощью уравнения непрерывности вида [12]

$$\frac{dn_{e,i}}{dt} = \mathfrak{S} - k_{ei} n_e n_{A^+} - k_{e,ia} n_{e,i} n_A + k_{cd} n_A - n_A + J_a n_{A^-}, \quad (5)$$

где $\mathfrak{S}$ – скорость образования электронов и ионов в холодной плазме;

$k_{ei} = \frac{1}{\tau_e n_{A^+}}$ – скорость электронно-ионной рекомбинации; $k_{ea} = \frac{1}{\tau_e n_A}$ –

скорость радиативного прилипания электронов с образованием отрицательных ионов или ионно-молекулярные процессы; $k_{cd} = \frac{1}{\tau_e n_{A^-}}$ –

скорость отлипания электронов при соударении с нейтралами $A_1 + A_2 \rightarrow A_1 + A_2 + e$ м³/с; $J_d n_A$ – скорость изменения концентрации за счет диффузии.

Выражения (4), (5) с соответствующими граничными условиями в начальный момент времени – характеристиками свободной атмосферы – ионосферы Земли, или нулевыми значениями малых составляющих ООС – формируют краевую задачу. Совместимость гомогенных и гетерогенных процессов, используемых в единой системе линейных дифференциальных уравнений, AB^+ достигалась интегрированием по толщине столба ООС объемным потоком частиц, приходящих на единичную площадь поверхности.

На рис. 1 представлены результаты расчета потоков нейтральных и заряженных составляющих ООС.

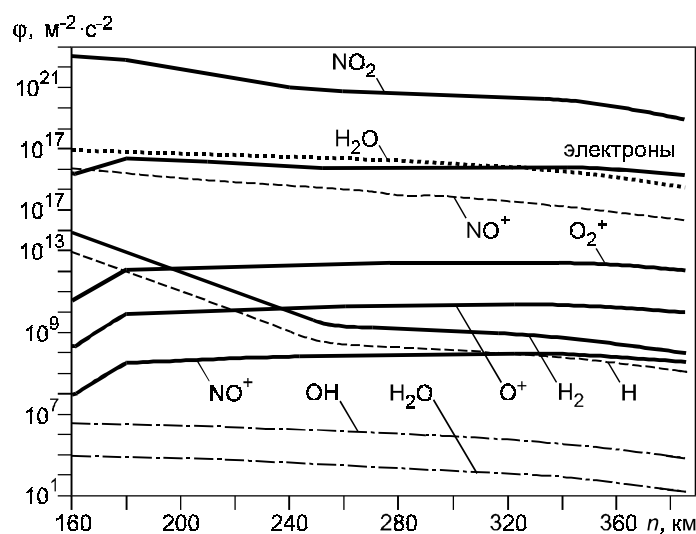


Рис. 1. Результаты расчета плотности потоков нейтральных и заряженных составляющих ООС КА по трассе полета

Анализ проведенных расчетов позволил заключить, что:

потоки электронов с достоверной точностью согласуются с экспериментальными данными [13, 14] и сравнимы с потоками молекул H_2O ООС КА. При величинах около $10^{17} \text{ м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ концентрация электронов по порядку величины составляет 10^5 см^{-3} на высотах, характерных КА орбитального типа;

среди положительно заряженных ионов преобладающими являются ионы молекулярного кислорода O_2^+ , за которыми следуют ионы атомарного кислорода O^+ и молекулярный ион окиси азота NO^+ . Объяснение тому – диссоциативная рекомбинация гибели O_2^+ и NO^+ . Уничтожение O^+ приводит к образованию молекулярных ионов O_2^+ и NO^+ ;

по порядку величин поток молекулярного иона кислорода составляет $\leq 10^{13} \text{ м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, что соответствует выполнению условия квазинейтральности. Отсутствие в полученных результатах электроотрицательных ионов говорит об электроположительной модели холодной частично ионизированной плазмы ООС КА.

Рассмотрим поведение указанных загрязнителей во внешнем электростатическом поле заряженных конструктивных частей поверхности КА (например, в блоке с расположенной непосредственно в нем аппаратурой).

Расчет электростатических полей вблизи конструктивных частей поверхности КА. Использование на борту негерметично исполненных ОПН кубической формы приводит к появлению дополнительного источника ООС, поступающей через вентиляционные отверстия ОПН, расположенные на гранях.

Согласно техническим условиям эксплуатации ОПН с размещением бортовой аппаратуры в нем возможна при снижении давления остаточного газа внутри до значений $10^{-2} - 10^{-3} \text{ Па}$ [15, 16]. С учетом того, что давление ООС КА при включении–выключении дистанционного управления периодически повышается до 1 мПа, а на расстоянии около 10 м от КА – до 1 мкПа, то истечение газовой составляющей ОПН составит дополнительный источник загрязнителей ООС.

В ходе эксплуатации КА на орбите давление в ОПН выравнивается по отношению к внешнему давлению ООС, и источником его повышения внутри ОПН становится дегазация используемых материалов и приток поляризованных молекул и заряженных частиц. Изменение концентрации частиц в этом случае обусловит либо аэростатическое

давление, либо электростатическое, отвечающее за приток поляризованных молекул и заряженных частиц ООС под действием паразитных электромагнитных полей. Последние возникают при зарядке конструкционных материалов поверхности относительно зарядовой составляющей ООС подобно лэнгмюровскому зонду, помещенному в холодную плазму.

На современных КА применяют сотовые трехслойные конструкции панелей–стенок с полимерным наполнителем (в сотах, несущих обшивках). Основным свойством непроводящих материалов, помещенных во внешнее электростатическое поле, является способность поляризовываться.

В условиях космического пространства конструкционные диэлектрические материалы стенок ОПН длительное время сохраняют поляризованное состояние и создают в окружающем пространстве квазипостоянное электрическое поле (т. е. становятся электретами). Электретное состояние наблюдается только в диэлектриках с низкой удельной проводимостью ($10^{-10} - 10^{-15} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ и меньше). В космической технике распространенными материалами сотового наполнителя являются низкоомные углепластики ввиду их повышенной прочности, стойкости к воздействиям факторов космического пространства и сравнительной легкости. Величина электростатических полей, создаваемых таким сотовым наполнителем, при толщине панели от 0,5 см и разности потенциалов на ее внутренней поверхности 0,5 – 2,5 В составляет 1 – 5 В/см. Это значение тем выше, чем тоньше панель и его вполне достаточно для удержания электростатически ассоциативных групп поляризованных молекул, поскольку при дипольном моменте 1,84 Д (молекула H_2O) собственное поле поляризованных зарядов при их концентрации 10^{18} м^{-3} составляет $10^{-11} \text{ Кл}\cdot\text{м}$.

С целью выявления мест локализации поляризованных контаминант и заряженных частиц ООС внутри ОПН рассчитаем электростатику ОПН и модели расположенного в нем прибора с использованием численного метода.

Электростатическая задача сводится к решению уравнения Пуассона с граничными условиями I рода на заряженных поверхностях (граничные условия Дирихле) [17]:

$$\frac{du(x,y,z)}{dx} + \frac{du(x,y,z)}{dy} + \frac{du(x,y,z)}{dz} = -\frac{\rho(x,y,z)}{\epsilon_0}; \quad (6)$$

$$u(x, y, z)|_{x, y, z \in \Gamma} = u_0,$$

где $u(x, y, z)$ – электростатический потенциал; $\frac{\rho(x, y, z)}{\epsilon_0}$ – плотность

пространственного заряда; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума (электрическая постоянная).

Основным свойством величины $\rho(x, y, z)$ – равенство нулю всюду, кроме точки расположения источника заряда. Однако при интегрировании $\rho(x, y, z)$ по объему получаем конечное значение заряда источника. Аналогичное качество присуще δ -функции Дирака. Поэтому для точечного источника с координатами x, y, z в плоскости расположения самого источника (т. е. при $z = 0$) имеем следующее выражение

$$\rho(x, y, z) = \delta(x)\delta(y)\delta(z). \quad (7)$$

Произведение трех δ -функций в правой части равенства (7) есть трехмерная δ -функция. Наибольший интерес представляет исследование характера поля по его центральному сечению, поэтому предположим, что оно располагается при $z = 0$. Тогда от трехмерных изображений мы переходим к их двумерным сечениям. Для этого случая δ -функция может быть представлена в следующем виде

$$\rho(x, y, 0) = \delta(x)\delta(y)\delta(0) \rightarrow \exp(-x) + \exp(-y),$$

что связано с экспоненциальным затуханием потенциала в пространстве. При интегрировании правой части применяется принцип суперпозиции и искомый потенциал находится как сумма потенциалов точечных зарядов.

Численное решение краевой задачи проводили методом конечных элементов. Для этого брали равномерную координатную сетку с шагом по координатным осям $\Delta x, \Delta y$ в виде векторов:

$$x = \{x_i\}; y = \{y_j\}, i, j = 1, 2, \dots, n.$$

Граничные условия первого рода задавали в узлах сетки при минимальных и максимальных значениях аргумента

$$u(x_{\min}, y) = u_1(y); u(x_{\max}, y) = u_2(y); u(x, y_{\min}) = u_3(x); u(x, y_{\max}) = u_4(x).$$

Далее проводили дискретизацию для граничных точек (граничные условия внешней задачи расчета потенциала) и уравнения Пуассона (6) для внутренних точек области

$$u_{1,j} = u_1(y_j); u_{n,j} = u_2(y_j); u_{i,1} = u_3(x_i); u_{i,n} = u_4(x_i); \quad (8)$$

$$\frac{u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}}{\Delta y^2} = -\frac{\rho_{i,j}}{\epsilon_0}, \quad (9)$$

где в левых частях равенств (8), (9) указаны значения потенциала в точках (x_1, y_j) , (x_n, y_j) , (x_i, y_1) , (x_i, y_n) ; $\rho_{i,j}$ – значение функции $s(x, y)$ в точке сетки с координатами (x_i, y_j) .

Таким образом, в результате дискретизации получается система линейных алгебраических уравнений размерности $n \times n$, численное решение которой выполняется в системе инженерных и научных расчетов Matlab.

На рис. 2 представлен расчет паразитного электростатического поля в окрестности вентиляционной ловушки вида, аналогичного [16], и заряженной отрицательно по отношению к материалу ОПН. Характер эквипотенциальных поверхностей таков, что в вентиляционное отверстие устремляются тепловые электроны и положительно заряженные, а также поляризованные полярные контаминанты, где будут удерживаться кулоновскими силами и создавать область повышенной концентрации частиц ООС. Оценить ее величину можно следующим образом. Вблизи поверхности заряженного тела, скорость движения которого много меньше скорости электронов и равновесное распределение электронов возмущается очень слабо, при потенциалах поверхности в 1 В концентрация зарядов вблизи вентиляционной ловушки составит $4,5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ (концентрация полярных молекул, например H_2O , будет больше на два порядка), что определяют расчеты, представленные на рис. 1. Это значение хорошо согласуется с экспериментальными данными [13, 14].

Таким образом, представлена база данных плазменно-химических гетерогенных и гомогенных процессов, протекающих вблизи заряженной поверхности низкоорбитальных КА.

Разработана кинетическая модель ООС КА, позволяющая рассчитать потоки основных и малых нейтральных и заряженных составляющих ООС по трассе полета КА. Разработанная модель учитывает сорбцию молекул воды, протекающую по механизмам Эли–Ридела и Ленгмюра–Хиншельвуда как на свободной поверхности, так и на поверхности,

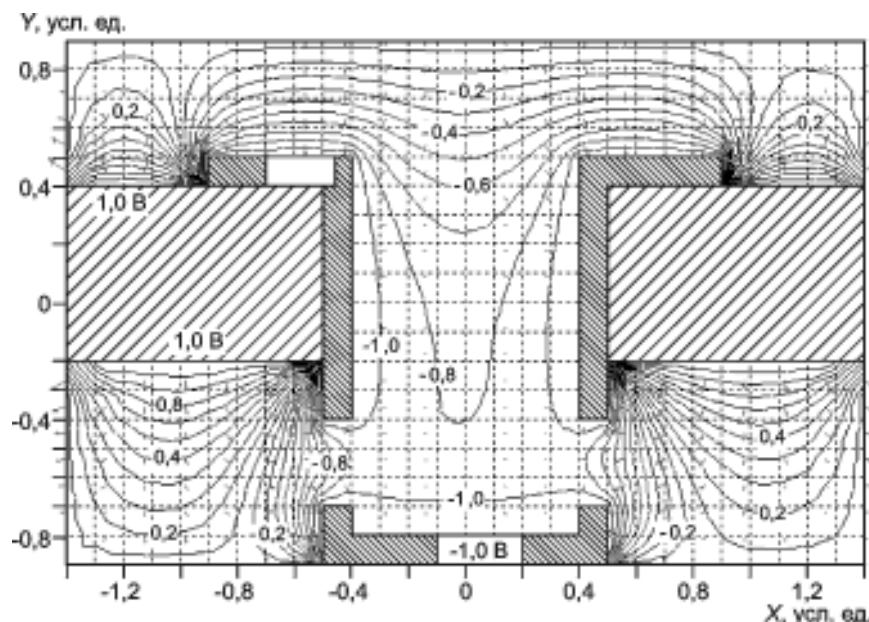


Рис. 2. Характер электростатического поля в вентиляционной ловушке при ее отрицательном зарядении относительно материала поверхности ОПН

занятой атомами кислорода. Полученные результаты расчетов положительно согласуются с экспериментальными данными.

Рассчитаны паразитные электростатические поля вблизи конструктивных частей поверхности КА, позволившие оценить возможность притока полярных и заряженных загрязнителей ООС КА: при потенциалах поверхности, соответствующих характерным электронным температурам рассматриваемой области высот, концентрация зарядов составит $4,5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, что на порядок меньше концентраций основных нейтральных полярных составляющих ООС.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. 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.
2. Dressler R. A., Murad E. Ion chemistry in the spacecraft environment // Unimolecular and bimolecular reactions dynamics /Ed. C. Y. Ng, T. Baer, I. Powis. John Wiley & Sons Ltd, 1994. С. 129 – 165.

3. **Karipides D. P., Boyd I. D., Caledonia G. E.** Detailed simulation of surface chemistry leading to spacecraft glow //J. Spacecraft and Rockets. 1999. V. 36. N 4. P. 566.
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.
5. **Анфимов Н. А. и др.** Моделирование приповерхностного свечения и кинетики нейтральных и заряженных частиц при взаимодействии ионосферы Земли с поверхностью низкоорбитальных космических аппаратов // Приложение к энциклопедии низкотемпературной плазмы. Т. Диагностика плазмы. Справочные материалы. М.: Наука, 2006.
6. **Крылов А. Н.** Исследование динамики загрязнений в собственной внешней атмосфере орбитальных станций //Химическая физика. 2008. Т. 27. № 10. С. 77 – 83.
7. **Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А.** Физика ионосферы. М.: Наука, 1988.
8. **Харламов В. Ф., Харламов Ф. В.** Модель каталитической реакции $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ с участием молекул, находящихся в преадсорбционном состоянии // Кинетика и катализ. 2007. Т. 48. № 3. С. 454 – 462.
9. **Кузнецов А. М.** Адсорбция воды на металлических поверхностях // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 5. С. 45 – 51.
10. **Петрова Н. В., Яковкин И. Н., Птушинский Ю. Г.** Моделирование адсорбции простых газов на поверхности переходных металлов // Физика низких температур. 2005. Т. 31. № 3 – 4. С. 1 – 23.
11. **Ковалев В. Л.** Гетерогенные каталитические процессы в аэродинамике. М.: Физматлит, 2002.
12. **Мак-Ивен М., Филлипс Л.** Химия атмосферы. М.: Мир, 1978.
13. **Ferguson D. C., Morton T. L., Hillard G. B.** First Results from Floating Potential Probe (FPP) on the International Space Station //Proc. 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. USA, Reno, 2001.
14. **Mikatarian R. e. a.** Electrical Charging of the International Space Station //Proc. 41th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. USA, Reno, 2003.
15. **Надирадзе А. Б. и др.** Оценка времени обезгаживания негерметичного приборного отсека космического аппарата // Вестник Сиб. гос. аэрокосмического ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. 2007. № 1. С. 95 – 98.
16. **Смирнов В. А. и др.** Повышение надежности негерметичного приборного отсека космического аппарата // Там же. С. 88 – 91.
17. **Самарский А. А., Андреев В. Б.** Разностные методы для эллиптических уравнений. М.: Наука, 1976.

Дата принятия 13.04.2012 г.