

УДК: [533.9:551.510.535]:629.78

## **Формирование собственной внешней ионосферы космических аппаратов и эффекты её воздействия.**

А.Б. Надирадзе, А.Г. Корсун, М.Ю. Куршаков,  
В.В. Шапошников, Ф.Ф. Габдуллин, Е.М. Твердохлебова

### **Аннотация**

Рассматриваются механизмы образования ионизированной среды вокруг геостационарного космического аппарата – собственной внешней ионосферы (СВИ), и генерации основного компонента СВИ - вторичной плазмы в выхлопной плазменной струе бортового электроракетного двигателя. Описаны методы компьютерного моделирования основных эффектов негативного воздействия СВИ, таких, как эрозионное, силовое, загрязняющее воздействие, оптические помехи, влияние на радиосвязь, и представлено программное обеспечение, разработанное совместно сотрудниками ЦНИИмаш и МАИ и позволяющее решать основной спектр задач, связанных с определением параметров СВИ и ее воздействия на КА.

**Ключевые слова:** космический аппарат; собственная внешняя атмосфера; ионосфера; электрический реактивный двигатель, программа расчёта.

При движении космического аппарата (КА) по орбите на него, кроме факторов космического пространства (ФКП) таких, как УФ излучение Солнца или атомарный кислород в набегающем потоке, воздействует и собственная внешняя атмосфера (СВА). СВА образуется при работе двигателей реактивной системы управления, при поверхностном и объёмном газовыделении, при утечках из гермоотсеков и т.д. Например, при включении реактивных двигателей и некоторое время после их выключения давление вокруг космических аппаратов (КА) возрастает на порядки величины; во время работы электрореактивных двигателей (ЭРД) изменяется состав СВА. Происходит это из-за формирования обратных потоков вторичной плазмы из первичной струи ЭРД. Сказывается

это главным образом на увеличении доли ионизованной составляющей в окрестности КА; потоки вторичной плазмы создают своеобразную собственную внешнюю ионосферу (СВИ) КА. Электрические свойства этого искусственного плазменного образования определяют величину и распределение электрических токов, текущих в системе «СВИ - КА». Кроме этого, СВИ может оказать существенное влияние на поверхностные процессы с участием атомарного кислорода и продуктов испарения материалов КА.

Практическая необходимость теоретического и экспериментального моделирования параметров плазмы в околообъектовом пространстве связана, главным образом, с планами широкого использования ЭРД на геостационарных КА с длительным сроком активного существования. Кроме струй ЭРД, которые все чаще становятся необходимым элементом объединенной двигательной установки (ДУ) перспективных автоматических КА, источниками плазмы вокруг аппарата могут быть также струи газовых и жидкостных реактивных двигателей (ЖРД), которые ионизируются под действием ФКП, и выхлопы импульсных и стационарных источников плазмы, устанавливаемых на борту в научных и практических целях. При определенных условиях ЭРД могут оказывать существенное негативное влияние на элементы и системы КА. В частности, возникающие при бомбардировке поверхности КА ионами струи силы и моменты могут нарушить ориентацию КА или потребовать дополнительных затрат рабочего тела на их компенсацию. Загрязнение продуктами распыления поверхностей КА может привести к деградации системы терморегулирования и нарушению теплового режима КА, а также к снижению чувствительности и выходу из строя оптических приборов и другой бортовой аппаратуры.

Для обеспечения требуемой надежности или заданного ресурса КА необходимо уже на этапе проектирования иметь необходимые средства прогнозирования перечисленных выше эффектов воздействия с тем, чтобы заранее принять меры по их исключению или компенсации.

Компьютерное моделирование эффектов, связанных с воздействием плазменных струй на окружающую среду, на элементы конструкции КА и его служебные системы, позволит, с одной стороны, резко сократить время и расходы на наземные испытания двигателей, а с другой стороны, дать прогноз ожидаемым вторичным эффектам от интеграции ЭРД на КА и рекомендации по совершенствованию конструкции КА для минимизации негативного воздействия СВИ и повышения надежности КА. Основная сложность математического описания процессов взаимодействия плазменного окружения с поверхностью КА состоит, прежде всего, в их многообразии и зависимости от множества факторов, меняющихся во времени и пространстве. В связи с этим возникает противоречие

между необходимостью создания простого в использовании программного обеспечения, позволяющего разработчику получить надежный прогноз воздействия плазмы на КА, и необходимостью учета большого количества различных факторов, влияющих на процессы взаимодействия. В связи с этим одной из важнейших задач построения пакета программ является выбор математических моделей, наиболее адекватно описывающих процессы взаимодействия. В организациях отрасли имеется несколько программных продуктов, позволяющих им проводить необходимые для этого расчёты. В частности программа «Плазма-СЭВ» [1], разработанная ЦНИИмаш совместно с МАИ, позволяет проводить расчёты целого комплекса эффектов, обусловленных силовым, тепловым и эрозионным воздействием плазменных струй ЭРД на элементы конструкции и КА в целом. Ниже представлена работа по развитию программного обеспечения данной тематики, реализованная в программе «СВИ-ЭРД» [2] и в других программах, разработанных в ЦНИИмаш и МАИ.

Программа предназначена для расчёта параметров собственной внешней ионосферы (СВИ) космического аппарата (КА), образующейся при работе бортовых электрореактивных двигателей (ЭРД), и анализа её воздействия на бортовые системы КА.

С применением программы можно получить следующие характеристики:

- распределение параметров вторичных ионов, образующихся при взаимодействии нейтральной и плазменной составляющих струй ЭРД;
- потоки компонентов СВИ на элементы поверхности КА.

Программа разработана в среде программирования Delphi 7.1.

Программа реализована в рамках единой многооконной оболочки, позволяющей в диалоговом режиме подготавливать исходные данные, проводить расчёты и обрабатывать результаты расчётов, представляя их в виде таблиц, графиков, двумерных распределений и трёхмерных изображений.

Функциональная часть Программы «СВИ-ЭРД» реализована в 4 модулях:

- модуль расчёта параметров первичных потоков плазмы и нейтрального газа;
- модуль описания источников вторичных частиц;
- модуль расчёта потоков вторичных частиц;
- модуль диалога ввода исходных данных;

Остальные модули программы являются вспомогательными и обеспечивают визуализацию исходных данных и результатов, хранение данных в файлах БД, управление процессом вычисления параметров СВИ.

Элементы геометрической модели образуют иерархическую структуру, чем достигается простота задания свойств и редактирования модели. Степень детализации модели определяется пользователем, но общая рекомендация для всех задач может быть сформулирована следующим образом: начинать расчёт эффектов следует с самой упрощенной геометрии с указанием расположения и размеров принципиальных элементов (корпус КА, панели солнечных батарей (СБ), двигатели, рефлектор радиоантенны, и т.п.).

В программе предусматривается, что каждый элемент КА может обладать набором свойств, таких как материал поверхности, цвет, система координат, режим отображения, поля молекулярных и тепловых потоков, давлений и т.д.

Задание параметров материалов необходимо для расчёта эффектов взаимодействия струи с поверхностью КА. При задании параметров материалов могут понадобиться данные о компонентах струй. Они необходимы при определении коэффициентов распыления материала и коэффициентов аккомодации. Эти коэффициенты должны быть заданы для всех компонентов струй, установленных на КА двигателей.

### **Расчёт параметров ионизованной составляющей СВИ**

В ФГУП ЦНИИмаш разработаны математические модели искусственных плазменных образований (ИПО), в частности, струй ЭРД. Эти модели учитывают влияние на характеристики ИПО собственных электрических полей плазмы и внешнего геомагнитного поля, которые формируют распределение потоков ионов в струях ЭРД и в околообъектовой плазме. Математическое описание разлёта реактивной струи ЭРД в космосе базируется на автомодельных решениях системы плазодинамических уравнений Брагинского [3]. Подробно описание моделей приведено в [4]. Здесь отметим, что в зависимости от величин критериев и их комплекса в программе выбирается математическая модель описания разлёта первичной плазменной струи.

Характер течения струи определяют следующие критерии:

$$M = \left( \frac{m_i u^2}{\gamma T} \right)^{1/2} \text{ – число Маха;}$$

$$S = \frac{\sigma u^2 B^2 \pi a^3}{2 \dot{N} T} \text{ – параметр магнитного взаимодействия [5] (параметр Ампера),}$$

характеризующий влияние магнитного поля на струю (при  $S < 1$  - магнитное поле не влияет на динамику плазменной струи, а при  $S > 1$  – влияние сильно);

$\Pi = \frac{\pi a T_e \sigma}{\dot{N} e^2}$  - параметр [6], характеризующий относительную роль процессов переноса

в плазме, в частности, её теплопроводность (при  $\Pi < 1$  – струя расширяется адиабатически, а при  $\Pi > 1$  – изотермически);

$Kn_e = \frac{\lambda_{CEX} a'}{a}$  - аналог числа Кнудсена, характеризующий эффективность перезарядки

ионов пучка на нейтралах фона.

В приведённых выше выражениях использованы следующие обозначения:  $\sigma$  – проводимость плазмы;  $T$  – температура,  $T = T_e + T_i$ ;  $u$  – скорость;  $a = a(x)$  – характерный поперечный размер струи;  $\dot{N}$  – расход ионов;  $B$  – индукция магнитного поля;  $m_i$  – масса иона;  $e$  – заряд электрона;  $\gamma$  – показатель адиабаты;  $\lambda_{CEX}$  – длина пробега иона до перезарядки.

Характерные значения критериев струй ЭРД, инжектируемых на геостационарной орбите и в стенде с хорошим вакуумом, следующие:

$$S \ll 1, M^2 \gg 1, \Pi \geq 1, Kn \gg 1.$$

На рисунке 1 приведены линии равной электронной плотности в струе ЭРД типа СПД-70 для ближней зоны, когда  $S < 1$ . На рисунке 2 приведено распределение энергии ионов ксенона.

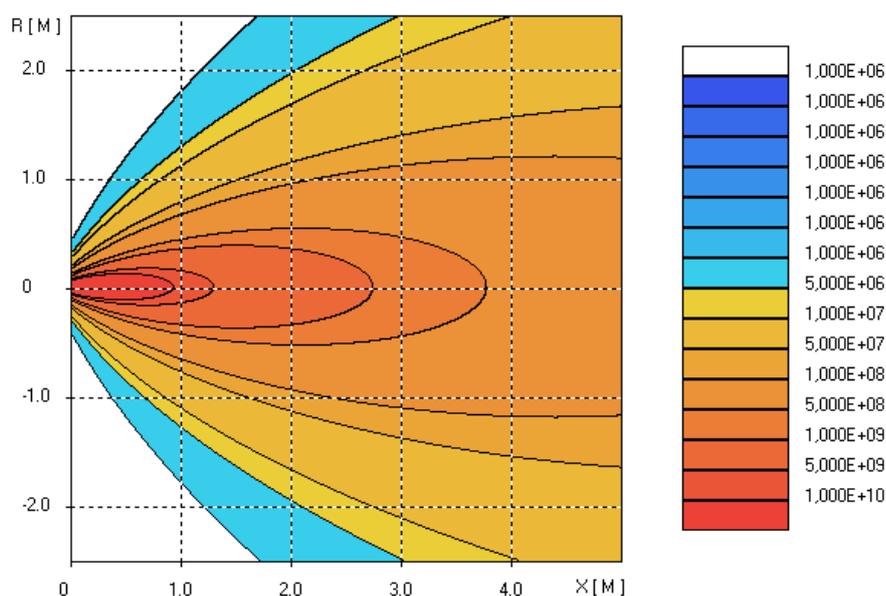


Рисунок 1. Изоконцентрали в ближней зоне плазменной струи СПД-70,  $n_e \text{ см}^{-3}$ .

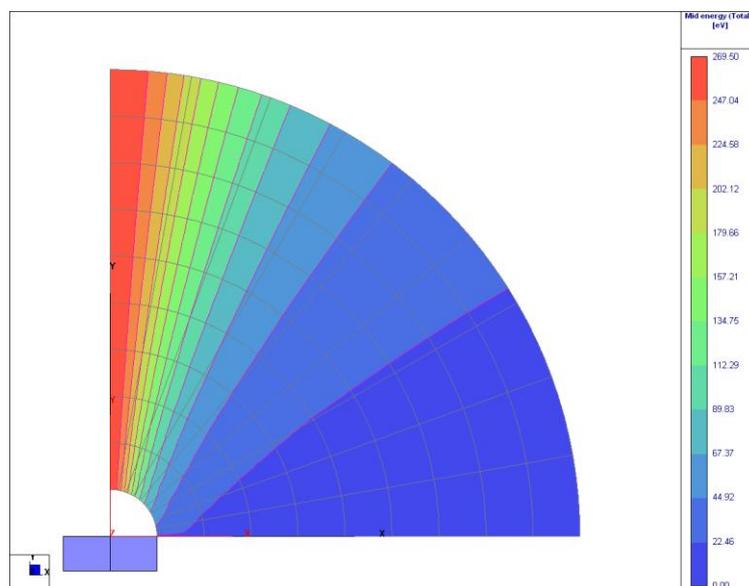


Рисунок 2. Средняя энергия ионов в струе СПД М-70

В результате процессов перезарядки и ионизации нейтральных атомов и молекул, оказавшихся в первичной струе электрореактивного двигателя, образуется вторичная плазма. Например, из общего расхода ионов и атомов  $Xe$  в струе ЭРД типа СПД-100  $\dot{N}_1 \cong 2 \cdot 10^{19} \text{ с}^{-1}$  во вторичную плазму превращается порядка 5%.

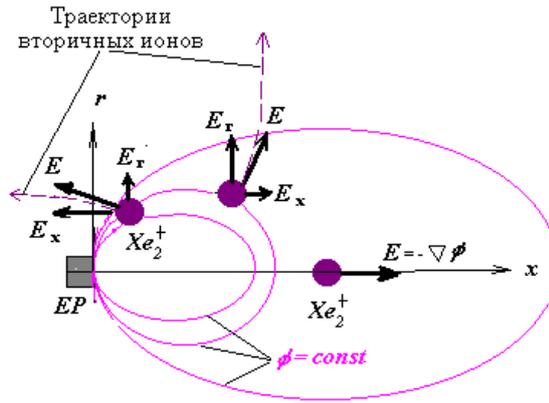


Рисунок 3. Траектории ионов перезарядки формируются собственным электрическим полем струи

Эти медленные вторичные ионы разлетаются под действием электростатического поля первичного пучка преимущественно перпендикулярно его оси (см. рисунок 3). При этом они приобретают в этом поле энергию порядка  $\varepsilon = 20 \div 30$  эВ, соответствующую падению потенциала поперёк пучка. К этой энергии нужно добавить еще  $10 \div 20$  эВ, которую ионы приобретают в пристеночном слое падения потенциала между плазмой ЭРД и поверхностью КА. Таким образом, энергия ионов, образующих обратные потоки,  $\varepsilon_i \geq 20$  эВ, превышает пороги распыления  $\varepsilon_p$  материалов конструкции КА (например, для алюминия  $\varepsilon_p \sim 12$  эВ).

На рисунках 4 и 5 приведены результаты расчёта основных параметров потока вторичной плазмы из первичной струи холловского двигателя мощностью  $1.35$  кВт, работающего при фоновой концентрации нейтралов  $Xe$   $n_n = 2 \cdot 10^8$  см<sup>-3</sup>.

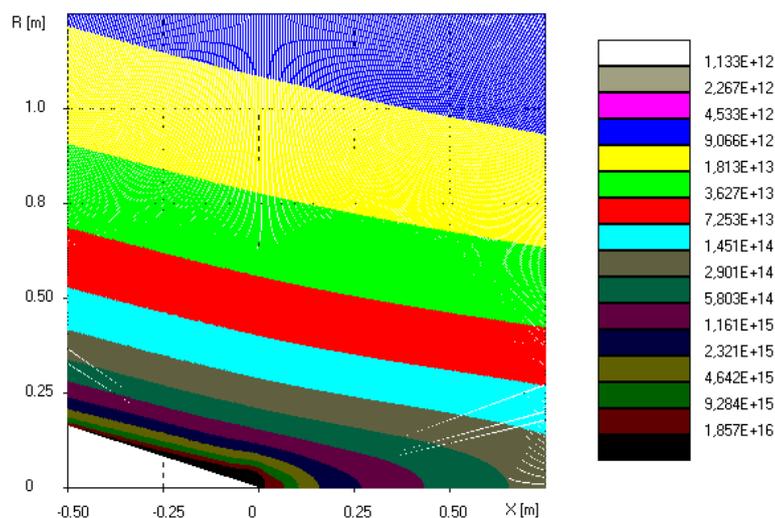


Рисунок 4. Распределение концентрации вторичной плазмы,  $n_2[\text{м}^{-3}]$

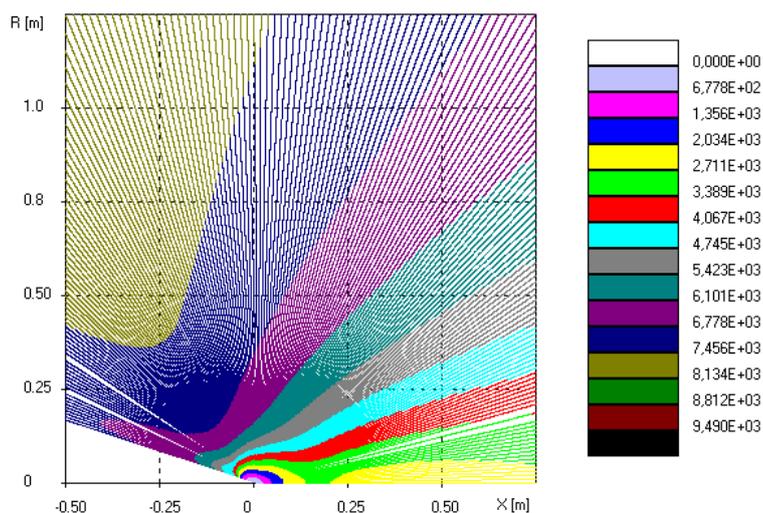


Рисунок 5. Распределение скорости вторичных ионов,  $u_2 [\text{м/с}]$

### Модель расчёта рассеянных потоков газовой составляющей СВИ

При разработке вычислительного алгоритма расчёта рассеянных потоков был использован метод первых столкновений (О методе первых столкновений см., например, работу [7]). То есть, считалось, что молекулы на своём пути от газящей (отражающей) поверхности или от источника до рассматриваемой оптической (чувствительной) поверхности испытывают только одно столкновение. Объём, в котором могут происходить

такие столкновения, далее называется объёмом рассеяния. Объём рассеяния представляет собой полусферу, в центре основания которой лежит площадка-приёмник (рассматриваемая чувствительная поверхность). Радиус полусферы равен длине свободного пробега молекул.

Для определения величины рассеянного потока на рассматриваемую поверхность необходимо проинтегрировать все потоки, рассеянные в объёме (полупространстве), видимом с этой поверхности и заключённом в пределах длины свободного пробега молекул. Разбивая этот объём на элементарные объёмы, можно выразить рассеянный поток на рассматриваемую площадку (с площадью  $S_n$ ) от одного элементарного объёма ( $dV_p$ ):

$$S_n dJ_n = Q_{n \rightarrow p} \cdot e^{-|r_p - r_n|/l} \cdot \frac{dV_p}{l} \cdot \frac{S_n \cos(\mathbf{n}_n, \mathbf{r}_p - \mathbf{r}_n)}{4\pi(\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_n)^2} \quad (1)$$

Индексы “и”, “р”, “п” принадлежат величинам характеризующим, соответственно, источник, рассеиватель (объём рассеяния) и приёмник.

$\mathbf{r}_n$  - место расположения источника (когда источником является газящая поверхность - точка на поверхности, откуда испускается газ),

$\mathbf{r}_p$  - место расположения объёма рассеивания,

$\mathbf{r}_n$  - место расположения приёмника,

$S_n$  - площадь приёмника [ $см^2$ ],

$J_n$  - поток, падающий на приёмник [ $г/(см^2 \cdot с)$ ],

$Q_{n \rightarrow p}$  - поток от источника, идущий в направлении объёма рассеяния [ $г/(см^2 \cdot с)$ ],

$l$  - длина свободного пробега,

$V_p$  - объём рассеивания,

$\mathbf{n}_n$  - нормаль от площадки-приёмника.

В левой части равенства стоит произведение размера площадки-приёмника ( $S_n$ ,  $см^2$ ) на поток рассматриваемого компонента ( $dJ_n$ ,  $г/(см^2 \cdot с)$ ), идущий на площадку-приёмник из объёма рассеяния  $dV_p$ .

Сомножитель  $e^{-|r_p - r_n|/l}$  введён для учёта уменьшения потока, происходящего из-за столкновений молекул на пути от источника до объёма рассеяния.

Элементарный объём  $dV_p$  можно представить в виде  $dV_p = dr_p dS_p$ , где  $dr_p$  - размер элементарного объёма в направлении распространения потока от источника,  $dS_p$  - площадь поперечного сечения этого объёма. Тогда уравнение (1) можно записать в следующем виде

$$S_n dJ_n = \left[ \left( Q_{n \rightarrow p} \cdot e^{-|r_p - r_n|/l} \cdot dS_p \right) \cdot \frac{dr_p}{l} \right] \cdot \frac{S_n \cos(\mathbf{n}_n, \mathbf{r}_p - \mathbf{r}_n)}{4\pi(\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_n)^2} \quad (1')$$

Выражение в круглых скобках соответствует суммарному потоку, поступившему в объём  $dV_p$ . Отношение  $\frac{dr_p}{l}$  определяет, какая доля этого потока была в объёме  $dV_p$  рассеяна (модель тонкой мишени). То есть, выражение в квадратных скобках представляет собой суммарный поток, рассеянный в объёме  $dV_p$ .

Предполагается, что распределение рассеянного потока изотропно, то есть, разлёт молекул происходит сферически симметрично, пропорционально телесному углу. Дробь, являющаяся последним сомножителем, представляет собой телесный угол, под которым площадка-приёмник видна из объёма рассеяния.

Как всякая простая модель, модель изотропного рассеяния является очень грубой. В частности она существенно завышает результат для площадок-приёмников, расположенных выше по течению.

После деления левой и правой частей на  $S_n$  и интегрирования по всему объёму рассеивания, получается выражение для потока рассматриваемого компонента СВА, падающего на площадку-приёмник в результате рассеивания.

$$J_n = \iiint Q_{n \rightarrow p} \cdot e^{-|r_p - r_n|/l} \cdot \frac{\cos(\mathbf{n}_n, \mathbf{r}_p - \mathbf{r}_n)}{4\pi(\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_n)^2} \frac{dV_p}{l} \quad (2)$$

Поток от источника ( $Q_{n \rightarrow p}$ ), описывается выражением

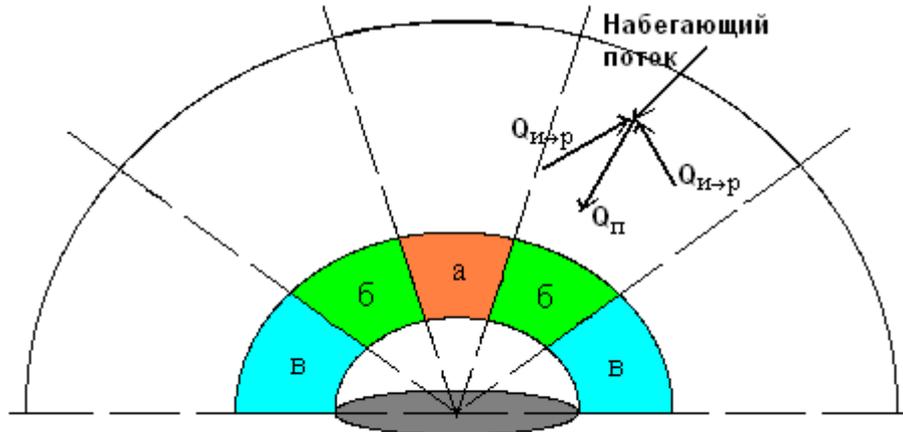
$$Q_{n \rightarrow p} = \sum Q_n + \iint_{S_{KA}} \frac{I(\mathbf{r}_n) \cos(\mathbf{n}_n, \mathbf{r}_p - \mathbf{r}_n)}{\pi(\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_p)^2} dS_{KA} \quad (3)$$

содержащим сумму всех потоков от индивидуальных источников (двигателей, дренажных отверстий и т.п.) и интеграл, определяющий потоки, идущие с поверхности КА. Причём, величина потока с единицы площади поверхности складывается из потока газовыделения и отражённого потока.

Одним из ключевых моментов, на который необходимо обратить внимание при разработке метода расчёта рассеянных потоков, является способ разбиения полупространства, видимого с площадки-приёмника, на элементарные объёмы. Для обеспечения достаточной точности необходимо, чтобы размерности элементарных объёмов были близки. То есть, форма элементарных объёмов должна, по возможности, быть близкой

к кубу или сфере. Интегральный объём рассеяния логично ограничить расстоянием от площадки-приёмника, равным длине свободного пробега.

Разбиение объёма интегрирования на элементарные объёмы осуществляется следующим образом. (Вертикальное сечение объёма интегрирования приведено на рисунке 6.)



**Рисунок 6. Вертикальное сечение объёма интегрирования**

- Первая ячейка представляет собой полусферу, в основании которой лежит площадка-приёмник. Диаметр полусферы равен размеру площадки-приёмника.
- Следующая серия ячеек располагается в полушаровом слое, образованном двумя concentricкими полусферами, первая из которых – это полусфера, ограничивающая первую ячейку, а вторая имеет вдвое **большой** радиус. То есть, толщина слоя равна радиусу первой сферы. Шаровой слой разбит двумя коническими поверхностями на три пояса. Углы образующих конусов с осью составляют  $18^\circ$  и  $54^\circ$ . Пояс “а” представляет собой компактный объём и считается одной ячейкой. Пояса “б” и “в” имеют бубликообразную форму и разбиты меридиональными плоскостями соответственно на 6 и 9 равных ячеек.
- Последующие полушаровые слои организованы аналогично. Причём внешняя сфера всегда имеет в два раза **большой** радиус, чем внутренняя.

Последним шаровым слоем считается тот, внешняя граница которого отстоит от площадки приёмника более, чем на длину свободного пробега.

Длина свободного пробега определяется по формуле

$$l = \frac{c}{\sigma n V} \tag{4}$$

где  $\sigma$  - сечение рассеяния;  $n$  - концентрация;  $c$  - средняя тепловая скорость (для равновесного газа определяется по формуле  $c = \sqrt{\frac{8RT}{\pi m}}$ );  $V$  - средняя скорость пробных молекул относительно полевых.

Формула (4) используется при определении длины свободного пробега при расчёте рассеяния молекул СВА на молекулах набегающего потока. В этом случае  $V$  равна скорости КА.

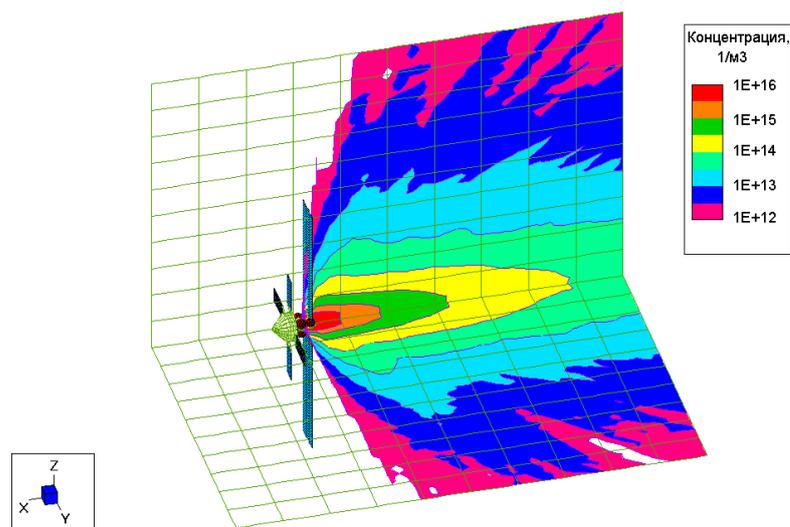
При расчёте рассеяния молекул СВА за счёт столкновений друг с другом формула (4) приобретает вид

$$l = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma n} \quad (5)$$

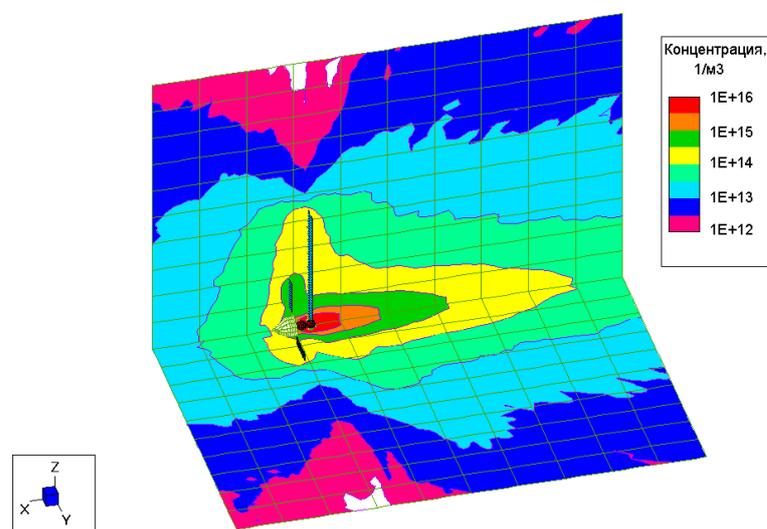
Весьма непростым вопросом является определение величины сечения рассеяния. Способ определения этой величины по коэффициенту вязкости с применением уравнения Сёзерлэнда не годится, так как уравнение Сёзерлэнда не применимо для высот более 90 км. Для оценок можно использовать величину эффективного диаметра молекул воздуха, равную, в соответствии со стандартной атмосферой [8],  $0.365 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ .

### Примеры моделирования

На рисунках 7 и 8 показаны результаты моделирования параметров СВИ, формирующихся при работе ЭРД СПД-100. Видно, что панели СБ оказываются практически полностью погруженными в плазму с уровнем концентрации  $n_e \approx 10^{14} \text{ м}^{-3}$ . При этом энергия частиц, бомбардирующих панели СБ, превышает 50 эВ, как было показано выше. Ионизованная среда такой плотности оказывает заметное силовое и эрозионное воздействие на КА за счёт динамического воздействия высокоскоростного потока ионов и за счёт электростатического воздействия плазмы на элементы конструкции, находящиеся под плавающим потенциалом относительно окружающей плазмы. Для данной геометрии КА, вследствие симметричности расположения двигателей и солнечных панелей, не создавалось существенных паразитных крутящих моментов.



**Рисунок 7. Распределение первичных ионов в окрестности КА**



**Рисунок 8. Распределение первичных, вторичных и отраженных ионов в СВИ**

В зону разлёта струи попадают все элементы поверхности СБ, которые будут распыляться под действием высокоэнергетических ионов струи СПД. С точки зрения механических повреждений указанных элементов конструкции КА фактор ионного распыления мало существенен. Однако, продукты распыления могут осаждаться на других поверхностях, изменяя их функциональные характеристики. В первую очередь это относится к изменению оптических характеристик внешних поверхностей фотопреобразователей и астродатчиков, а также к изменению оптических коэффициентов теплозащитных покрытий.

Для расчета параметров силового и эрозионного воздействия плазменных струй ЭРД на элементы конструкции КА мы использовали программу «Плазма-СЭВ» [1].

В результате работы программы можно получить следующие характеристики:

- распределение параметров первичной плазменной струи в околообъектовом пространстве;
- распределение скорости эрозии поверхностей КА под действием струй электроракетных двигателей;
- силы, действующие на элементы конструкции КА, попадающих в зону разлета плазменной струи;
- величины моментов, возникающих при обтекании плазменной струей элементов конструкции КА ( при вращении панелей солнечных батарей рассчитываются угловые зависимости величины моменты от положения солнечной панели).

Результаты эрозионного воздействия СВИ на КА представлены на рисунках 9 - 11. На рисунке 9 приведены результаты расчёта средней скорости эрозии рабочей поверхности панелей СБ при работе ЭРД. Из представленных результатов следует, что максимальная средняя скорость эрозии составляет  $10^{-4}$  мкм/час. За 1000 часов работы двигателя это приведет к эрозии около 1000 ангстрем. На рисунке 10 даны результаты моделирования загрязняющего воздействия ЭРД на КА, а на рисунке 11 распределение распыленного материала в окрестности КА.

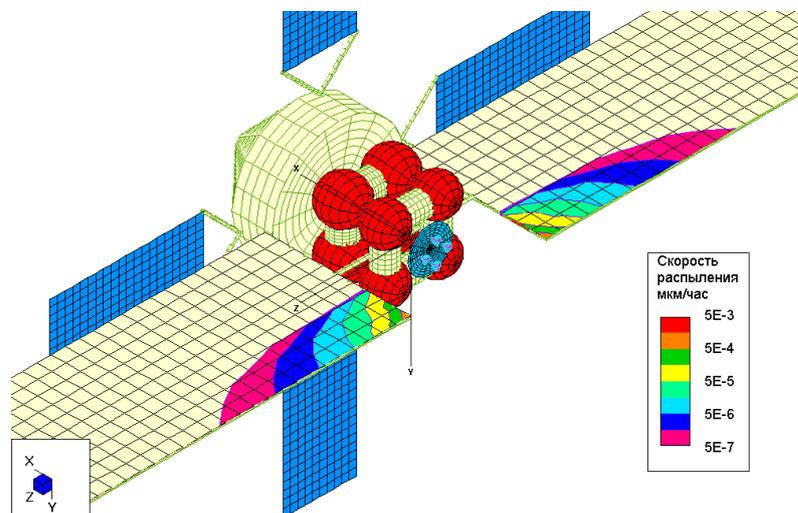


Рисунок 9. Средняя скорость распыления поверхности СБ при работе двигателя

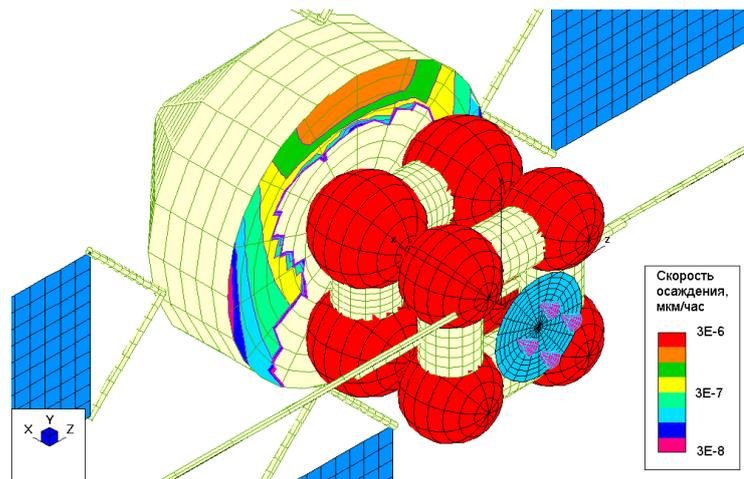


Рисунок 10. Расчёт загрязняющего воздействия корпуса КА при работе ЭРД

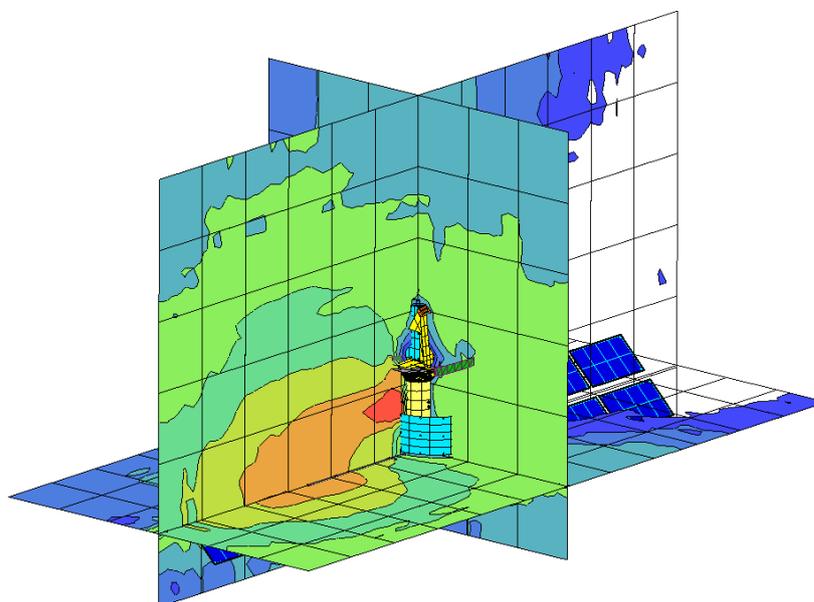


Рисунок 11. Распределение плотности СВИ с учетом распыления материалов поверхности КА

### Заключение

1. Разработана математическая модель комплексной струи ЭРД типа СПД, позволяющая с высокой скоростью и достаточной точностью проводить расчёты параметров как первичной струи ускоренных ионов, так и обратных и радиальных потоков вторичных ионов, образующихся в струе СПД в результате процессов перезарядки и ионизации нейтральных атомов и молекул.
2. Разработан программный комплекс для расчёта параметров СВИ и её воздействия на КА. Все программы комплекса имеют дружественный интерфейс и высокое быстродействие.

3. Примеры моделирования СВИ показывают, что можно наглядно увидеть распределение параметров среды в околообъектовом пространстве, интенсивность потоков частиц и энергий, приходящих на заданный элемент поверхности аппарата. Проведенные расчёты показали, что вторичная плазма СПД, составляющая основную часть СВИ, может оказывать существенное воздействие на КА, в том числе в зонах, находящихся вне прямой видимости ЭРД.

---

### **Библиографический список**

- 1 Надирадзе А.Б., Корсун А.Г., Габдуллин Ф.Ф., Твердохлебова Е.М. Расчет силового и эрозионного воздействия плазменных струй электрореактивных двигателей на КА. «Плазма-СЭВ». Программа ОФАП, рег № 4104 от 05.10.2005.
- 2 Надирадзе А.Б., Шапошников В.В., Лукьянец Р.В., Корсун А.Г., Куршаков М.Ю., Твердохлебова Е.М. Программа расчёта параметров собственной внешней ионосферы геостационарного космического аппарата, оснащённого электрореактивными двигателями – «СВИ-ЭРД». ФАП РКТ, рег.№ 4144, 2010г.
- 3 Брагинский С.И. Явления переноса в плазме. -В сб.: Вопросы теории плазмы. М.: Госатомиздат, 1963, №.1.
- 4 Корсун А.Г., Твердохлебова Е.М., Габдуллин Ф.Ф.. Динамика искусственных плазменных образований в космосе. В сб Модель космоса. Том II. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Под ред. Проф. Л.С. Новикова, М.: Книжный дом Университет (КДУ), 2007 – с.918-945.
- 5 A.G.Korsun, E.M.Tverdokhlebova, F.F.Gabdullin. The Earth's Magnetic Field Effect upon Plasma Plumes Expansion. //25th International Electric Propulsion Conference, Cleveland, August 1997. IEPC-97-178.
- 6 A.G.Korsun, E.M.Tverdokhlebova. The Characteristics of the EP Exhaust Plume in Space. //33rd Joint Propulsion Conference, Seattle, July 1997.AIAA-97-3065.
7. Ю.А. Рыжов, М.П. Бургасов, К.Н. Кузовкин, С.Б. Свирщевский. О методах расчёта параметров собственной внешней атмосферы летательных аппаратов. В сб. Аэротермогазодинамика в разреженных потоках. М.: МАИ, 1988, с. 3 – 24.
8. Стандартная атмосфера. ГОСТ 4401-81. Москва. 1981.

---

### Сведения об авторах

Надирадзе Андрей Борисович, ведущий научный сотрудник Московского авиационного института (государственного технического университета), д.т.н. МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.: (499) 158-46-74, e-mail: nadiradze@mai.ru

Шапошников Владимир Владимирович, старший научный сотрудник Московского авиационного института (государственного технического университета). МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.: (499) 158-46-74, e-mail: nadiradze@mai.ru

Корсун Анатолий Григорьевич, главный специалист Центрального научно-исследовательского института машиностроения. Ул. Пионерская, 4; г. Королёв, Московская область, 141070; тел.: (495) 513-56-29, e-mail: tverdokhlebova@tsniimash.ru.

Куршаков Михаил Юрьевич, ведущий научный сотрудник Центрального научно-исследовательского института машиностроения, к.ф.-м.н. Ул. Пионерская, 4; г. Королёв, Московская область, 141070; тел.: (495) 513-56-29, e-mail: mkurshakov@narod.ru.

Габдуллин Флюр Флатхлисламович, главный специалист Центрального научно-исследовательского института машиностроения. Ул. Пионерская, 4; г. Королёв, Московская область, 141070; тел.: (495) 513-56-29, e-mail: tverdokhlebova@tsniimash.ru.

Твердохлебова Екатерина Михайловна, начальник лаборатории Центрального научно-исследовательского института машиностроения, к.т.н. Ул. Пионерская, 4; г. Королёв, Московская область, 141070; тел.: (495) 513-56-29, e-mail: tverdokhlebova@tsniimash.ru.