

УДК 629.78

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СТЕПЕНИ ВОЗДЕЙСТВИЯ СОБСТВЕННОЙ АТМОСФЕРЫ И ПЛАЗМЫ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ, ОТ КОНСТРУКТИВНО-КОМПОНОВОЧНОЙ СХЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

© 2009 Н. А. Тестоедов, В. А. Смирнов

ОАО «ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ»
им. академика М.Ф. Решетнева» (ОАО «ИСС»)

Кратко описаны механизмы воздействия собственной атмосферы (СА) и плазмы, генерируемой стационарными плазменными двигателями (СПД), на космический аппарат (КА). Приведены результаты исследований зависимости степени воздействия данных факторов от конструктивно-компоновочной схемы (ККС) КА. Намечены подходы минимизации негативного воздействия СА и плазмы, генерируемой СПД на этапе выбора ККС КА.

Космический аппарат, собственная внешняя атмосфера, собственная атмосфера негерметичных отсеков, стационарный плазменный двигатель, воздействие, конструктивно-компоновочная схема.

При проектировании современных высоконадёжных спутников с длительными сроками активного существования (САС) обязательным условием является учет наряду с факторами космического пространства (ФКП) факторов, обусловленных функционированием собственных систем спутника, или факторов техногенного характера (ФТХ). К ФТХ можно отнести СА спутника, состоящую из собственной внешней атмосферы (СВА) спутника и собственной атмосферы негерметичных отсеков (САНО), и плазму, генерируемую СПД.

О серьёзности воздействия ФТХ на функционирование спутника свидетельствуют следующие данные. Внешние поверхности КА, например, КА серии «Экспресс-АМ» содержат более 200 кг неметаллических конструкционных материалов. На этапе орбитальной эксплуатации КА в околоспутниковое пространство под воздействием ФКП из них выделяется около 1 кг различных веществ, изменяя при этом параметры среды вокруг КА. В частности, величина давления, соответствующая невозмущённому космическому вакууму на геостационарной орбите и равная 10^{-13} мм рт. ст., увеличивается до значений $10^{-10} \div 10^{-8}$ мм рт. ст., что может привести к увеличению светового фона или ослаблению светового сигнала в окрестности КА. Около 100 г веществ конденсируются на поверхно-

стях КА, в том числе функциональных, образуя на них загрязняющие пленки.

При снижении давления в негерметичных отсеках до $10^{-3} \div 10^{-4}$ мм рт. ст. происходит изменение режима течения газа во внутренних объёмах в негерметичных отсеках от континуального к переходному, а затем к свободномолекулярному. Таким образом, величина давления в отсеке довольно долго может оставаться опасной с точки зрения возникновения высоковольтного электрического пробоя.

Присутствующие в плазменных струях СПД энергичные ионы с энергией до 300 эВ и скоростью до 20000 м/с, попадая на поверхности КА, приводят к их распылению. Концентрация тепловых ионов плазмы (с энергией до 50 эВ), генерируемой СПД, в зонах размещения высоковольтного оборудования может достигать величин порядка 10^5 см⁻³. При этом происходит изменение изоляционных характеристик вакуумных промежутков между токоведущими частями оборудования. Электроны плазменной струи СПД, попадающей в пространство между рефлектором и излучателем антенных систем КА, при достижении концентрации порядка $5 \cdot 10^8$ см⁻³ могут оказать влияние на прохождение радиоволн в результате изменения электрофизических свойств пространства.

Можно предположить, что разработка мероприятий по предотвращению и парированию повреждающего и дестабилизирующего воздействия ФТХ наиболее эффективна в рамках подхода, обуславливающего выбор проектных параметров КА, в частности его ККС, в зависимости от характеристик воздействующих на него факторов. При этом очень важным являются данные о зависимостях степени воздействия СА и плазмы, генерируемой СПД, от особенностей ККС КА.

Исследования, проведённые в ОАО “ИСС”, показали, что величины загрязнения критичных поверхностей КА в существенной степени определяются их положением по отношению к источникам формирования СВА КА (оборудованию, содержащему на внешних поверхностях значительное количество неметаллических материалов) и к поверхностям КА, распыляемым струями СПД, которые и являются источниками загрязнения. В свою очередь величины распыления зависят от взаимного расположения распыляемых поверхностей и СПД.

Было установлено, что определяющий вклад в формирование загрязняющих пленок продуктами газовой выделенной неметаллических конструкционных материалов на критичных поверхностях КА вносит ограниченное число оборудования. Причем, не масса, не величины параметров потери массы (ПМ) и летучих конденсирующихся веществ (ЛКВ) неметаллических конструкционных материалов из состава источников загрязнения, а механизмы массопереноса определяют вклад того или иного оборудования в формирование загрязняющих пленок на критичных поверхностях КА.

Использование математической модели загрязнения продуктами газовой выделенной неметаллических конструкционных материалов [1], разработанной на основе физической модели процессов массопереноса и учитывающей применительно к процессам формирования СВА и её воздействия на КА основные механизмы массопереноса, позволило провести анализ вклада различных механизмов массопереноса в загрязнение той или иной критичной поверхности КА.

К основным механизмам массопереноса относятся:

- прямой массоперенос частиц от поверхности массоотделения к поверхности осаждения – прямые потоки массы (ППМ);
- массоперенос с переотражением частиц от элементов конструкции КА, что может обеспечить попадание переотражённых частиц на элементы конструкции КА, прямо не видимые с поверхности массоотделения – отражённые потоки массы (ОПМ);
- рассеяние частиц за счет столкновений друг с другом, в результате чего частицы могут возвращаться к поверхностям КА (саморассеяние) – возвратные потоки массы (ВПМ).

При использовании модели [1] расчёт уровней загрязнения функциональных поверхностей КА продуктами газовой выделенной неметаллических конструкционных материалов проводится в два этапа. На первом этапе для модели КА определяются коэффициенты массопереноса, характеризующие вклад того или иного механизма в загрязнение критичных поверхностей КА. Исходными данными для этого этапа расчета являются геометрические размеры и взаимное расположение поверхностей и оборудования КА.

На втором этапе на основе конкретных характеристик неметаллических конструкционных материалов (массы материалов, параметров ПМ и ЛКВ) вычисляются конкретные значения уровней загрязнения элементов критичной поверхности КА с использованием следующего соотношения:

$$m_i^+ = \sum_j m_j^- [\alpha_{ij} + \beta_{ij} + \gamma_{ij}],$$

где m_i^+ – масса осаждённого вещества на i -ом элементе критичной поверхности КА (контрольной площадке) за весь САС КА; m_j^- – суммарное массоотделение ЛКВ с j -го элемента КА (интегральный параметр ЛКВ j -го элемента КА); α_{ij} – коэффициент прямого массопереноса, определяющий долю вещества, выделившегося с j -го элемента и осаждающегося на i -ю контрольную площад-

ку; β_{ij} – коэффициент переотражения, определяющий долю вещества, выделившегося с j -го элемента и осаждающегося на i -ую контрольную площадку в результате переотражения частиц СВА от поверхностей КА; γ_{ij} – коэффициент возврата, определяющий долю вещества, выделившегося с j -го элемента и осаждающегося на i -ую контрольную площадку в результате саморассеяния частиц СВА.

Коэффициенты массопереноса при этом определяются численно, с использованием метода трассировки лучей Монте-Карло.

Анализ вклада различных механизмов массопереноса в загрязнение той или иной критичной поверхности КА показал, что именно взаимное расположение критичных поверхностей и источников загрязнения (оборудования, содержащего на внешних поверхностях значительное количество неметаллических материалов, и поверхностей КА, распыляемых струями СПД) является основным фактором, определяющим механизм массопереноса и влияющим, в конечном итоге, на степень загрязняющего воздействия СВА КА.

Так как при загрязняющем воздействии СВА КА и эрозионно-загрязняющем воздействии плазмы, генерируемой СПД, стойкость КА определяется изменением оптических характеристик его функциональных поверхностей (для отражающих поверхностей – коэффициентом отражения; для терморегулирующих – коэффициентами поглощения и излучения; для защитных (прозрачных) – коэффициентом пропускания), критерий обеспечения стойкости КА, в рамках критерия “оптической деградации”, был представлен в следующем виде:

$$\kappa_i = \Delta X_i < \Delta X_{i,\text{lim}},$$

где ΔX_i – изменение физического свойства i -ой критичной поверхности КА (например, коэффициент отражения, поглощения и излучения, пропускания и т.п.); $\Delta X_{i,\text{lim}}$ – допустимое изменение свойства.

При негерметичном исполнении приборных отсеков КА предотвращение проник-

новения в них КА паразитных электромагнитных полей и токов достигается посредством экранирования зазоров элементом, выполненным из специального материала, предотвращающего проникновение электромагнитного излучения. Оптическая непрозрачность материала предотвращает проникновение в приборный отсек через зазоры также и заряженных частиц, но препятствует истечению продуктов газовой выделенной неметаллических конструкционных материалов, расположенных внутри негерметичных отсеков и формирующих САНУ. Для их отвода должны быть предусмотрены специальные вентиляционные отверстия. Этим достигается управляемость процесса отвода продуктов САНУ из негерметичных отсеков.

При выборе таких параметров ККС КА, как размеры, количество и места расположения вентиляционных отверстий для отвода продуктов САНУ из негерметичных отсеков, также важно учитывать дестабилизирующее воздействие этой составляющей СА. Согласно данным, представленным в работе [2], отвод продуктов САНУ через вентиляционные отверстия определенных размеров, расположенных в определенных местах, позволяет существенно уменьшать деградацию функциональных характеристик подсистем КА вследствие их загрязнения продуктами САНУ.

Максимально допустимый размер вентиляционного отверстия при этом определяется длиной волны электромагнитного излучения, исходя из условия предотвращения его проникновения в негерметичный отсек. Количество вентиляционных отверстий определяется из условия минимизации механических нагрузок на конструкцию негерметичного отсека при спаде давления на участке выведения.

Для минимизации проникновения в приборный отсек ионов плазмы, генерируемой СПД, через вентиляционные отверстия располагать их следует на максимальном расстоянии и вне зон прямой видимости СПД. При этом коэффициент ослабления потоков плазмы на участке от среза сопла двигателя до вентиляционного отверстия оценивается по формуле

$$K_1 = 8 \cdot \left(\frac{R_1}{R_0} \right)^2,$$

где R_1 – расстояние от среза сопла СПД до зоны расположения вентиляционного отверстия; R_0 – радиус сечения сопла СПД.

Дополнительное ослабление потоков как ионов плазмы, генерируемой СПД, так и электронов магнитосферной плазмы может быть достигнуто за счет лабиринтного исполнения вентиляционных отверстий, исключающих попадание прямых потоков частиц в приборный отсек [3].

Ослабление потоков заряженных частиц достигается за счет их рекомбинации и нейтрализации, обусловленных большим количеством соударений частиц с поверхностями отверстия. Величина ослабления потоков заряженных частиц $K_{осл.}$ лабиринтом определяются коэффициентом отражения частиц от поверхностей лабиринта R и зависит от его геометрических параметров:

$$K_{осл.} = C \cdot R^{-\alpha} \left(\frac{l}{s} \right),$$

где C – коэффициент пропорциональности; α – коэффициент, зависящий от геометрических параметров лабиринта; l, s – геометрические параметры лабиринта.

Коэффициент отражения R может быть определен экспериментально для интервала

энергий частиц, реализуемого в условиях орбитальной эксплуатации изделия.

Прямую зависимость степени эрозионно-загрязняющего воздействия плазмы, генерируемой СПД, от ККС КА подтверждает сравнительный анализ эрозионно-загрязняющего воздействия плазмы, генерируемой СПД, на поверхности унифицированных спутниковых платформ 767.МСС (на примере КА “Экспресс-АМ”) и “Экспресс-1000”.

Геометрические модели КА “Экспресс-АМ” и платформы “Экспресс-1000” представлены на рис. 1 и 2.

Примеры графического представления результатов расчетов скоростей эрозии поверхностей панелей БС КА “Экспресс-АМ” и платформы “Экспресс-1000” от воздействия струй СПД приведены на рис. 3 и 4.

Примеры графического представления результатов расчетов скоростей загрязнения ТРП эллиптического радиатора СТР КА “Экспресс-АМ” и радиатора СТР платформы “Экспресс-1000” продуктами эрозии поверхностей панелей БС, распыляемых струями СПД, приведены на рис. 5 и 6.

Результаты сравнительного анализа эрозионно-загрязняющего воздействия плазмы, генерируемой СПД, на поверхности платформ 767.МСС и “Экспресс-1000” показывают, что расположение СПД и панелей БС на платформе “Экспресс-1000” в разных плоскостях уменьшает эрозионно-загрязняющее

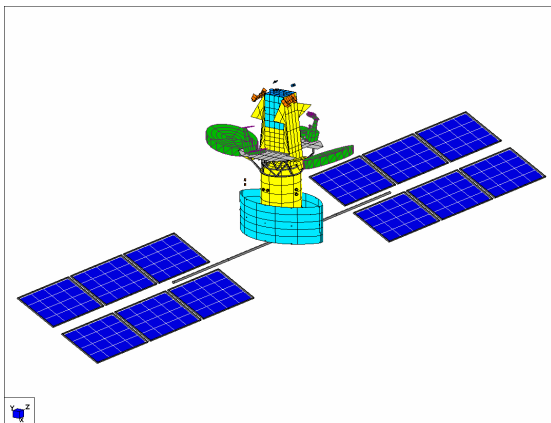


Рис. 1. Геометрическая модель КА “Экспресс-АМ”.
Общий вид

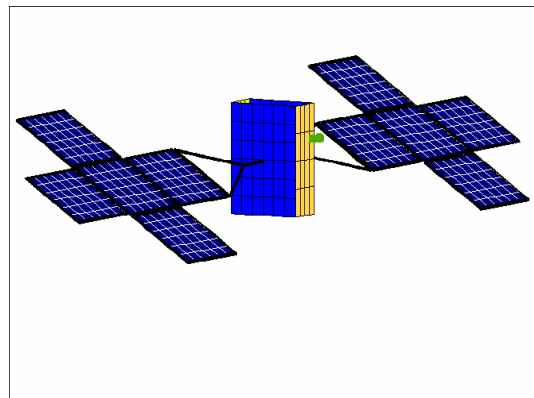


Рис. 2. Геометрическая модель платформы “Экспресс-1000”.
Общий вид

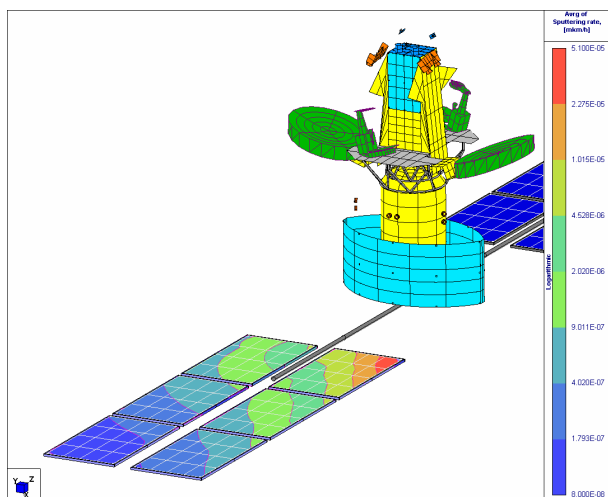


Рис. 3. Средняя скорость эрозии защитных стекол панелей БС

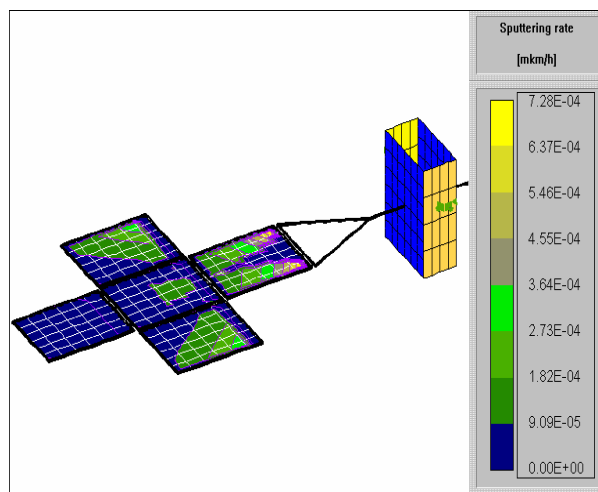


Рис. 4. Скорость эрозии защитных стекол ФП панелей БС. Угол поворота панелей БС 0 градусов

воздействие плазмы, генерируемой СПД, практически на порядок, т.к. в этом случае поверхности панелей БС значительно меньше по сравнению с платформой 767.МСС попадают в углы раскрыва струй СПД.

Еще одной важной особенностью ККС КА, существенно влияющей на степень воздействия плазмы, генерируемой СПД, является наличие в составе КА крупногабаритных антенных систем. В этом случае плазменные струи СПД могут попадать в диапазоны рабочих углов крупногабаритных антенных систем, состоящих из рефлектора и излучателя.

При этом в зависимости от конкретных значений рабочей частоты радиоканала и пространственной концентрации электронов в плазменной струе СПД последняя может рассматриваться как неоднородная диэлектрическая среда с диэлектрической проницаемостью ϵ меньше 1,0. Зоны с концентрацией электронов критической, с точки зрения прохождения радиоволн, образно можно представить в виде металлизированных тел.

Очевидно, что такого рода изменение электрофизических свойств пространства, окружающего крупногабаритную антенну

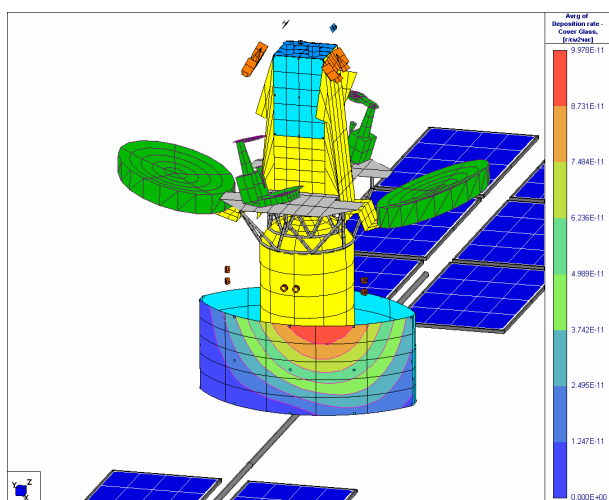


Рис. 5. Средняя скорость осаждения материала защитных стекол панелей БС на эллиптический радиатор СТР

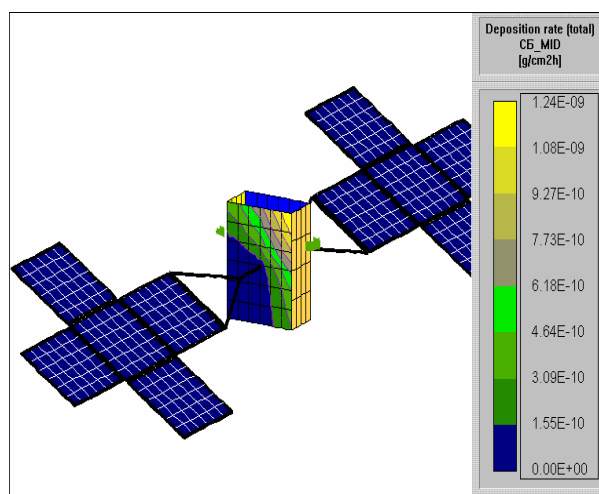


Рис. 6. Средняя суммарная скорость осаждения материалов панелей БС на радиатор СТР

(КГА), изменит условия фазирования лучей в апертуре и приведёт к изменению диаграммы направленности антенны (ДНА).

Оценка влияния струи СПД как многослойной диэлектрической среды на параметры ДНА заключается в решении электродинамической задачи, рассматривающей электрическую и магнитную составляющие электромагнитного поля антенны, представленной в виде синфазной плоскости эквивалентных токов, на участках между слоями диэлектрической среды. Данный вычислительный алгоритм, разработанный на основе метода интегральных уравнений [4], позволяет рассчитывать модифицированные ДНА в зависимости от ориентации и параметров плазменных струй СПД, попадающих в диапазон рабочих углов антенной системы между рефлектором и излучателем. Строгое решение задачи, описанной выше, показывает, что влияние плазмы, генерируемой СПД, увеличивается с уменьшением частоты электромагнитной волны. Оно проявляется в уменьшении максимума ДНА, его смещении и расширении главного лепестка.

Для упрощенной оценки влияния струи СПД на функционирование КГА необходимо пересчитать критическое, с точки зрения прохождения радиоволн, значение пространственной концентрации электронов в плазменной струе СПД, которое зависит от значений рабочей частоты радиоканала, в значение диэлектрической проницаемости ε . Для этого можно воспользоваться следующим соотношением [5]:

$$\varepsilon^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad (1)$$

где ω_p^2 – круговая частота плазменного образования; ω – круговая частота радиоволн.

При $\omega^2 < \omega_p^2$ показатель проницаемости в соотношении (1) становится мнимым, т.е. волна или поглощается плазменным образованием, или отражается от него. При $\omega > \omega_p$ показатель проницаемости является вещественным и слабо отличается от единицы, т.е. плазменное образование прозрачно для таких частот излучения.

В преобразованном виде зависимости величины диэлектрической проницаемости ε и критической, с точки зрения прохождения радиоволн, концентрации электронов n_c от частоты электромагнитной волны f описываются выражениями:

$$\varepsilon = 1 - \frac{n}{n_c},$$

$$n_c = 1,24 \cdot 10^{10} \cdot f^2.$$

Размерности критической, с точки зрения прохождения радиоволн, концентрации электронов n_c и частоты электромагнитной волны f соответственно см³ и ГГц.

Результаты расчетов критической, с точки зрения прохождения радиоволн, концентрации электронов n и значения максимального осевого размера зоны критической концентрации p представлены в виде графических зависимостей от частоты f для диапазона частот, используемых в спутниковой связи (от 0,2 до 50 ГГц), на рис. 7 и 8.

В заключение можно констатировать следующее:

1. Степень загрязняющего воздействия СВА и эрозионно-загрязняющего воздействия плазмы, генерируемой СПД, на критичные поверхности КА определяется его ККС.

2. Выбор оптимального с точки зрения загрязняющего воздействия СВА и эрозионно-загрязняющего воздействия плазмы, генерируемой СПД, взаимного расположения критичных поверхностей, СПД и источников загрязнения позволяет значительно уменьшить уровни эрозии и загрязнения. Другие мероприятия по парированию загрязняющего воздействия СВА, например такие, как дополнительное обезгаживание неметаллических материалов или их замена на материалы с меньшими параметрами ПМ и ЛКВ, не всегда могут дать такие же высокие результаты.

3. Управляемый отвод продуктов САНУ через вентиляционные отверстия, размеры и количество которых задаются, позволяет контролировать процесс обезгаживания негерметичных отсеков посредством расчетно-аналитического метода и обеспечивать режимы функционирования высоковольтной и высоко-

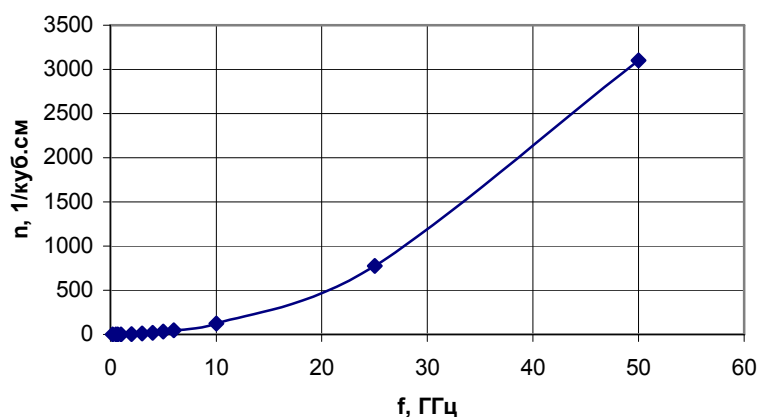


Рис. 7. Зависимость критической, с точки зрения прохождения радиоволн, концентрации электронов n от частоты спутниковой связи f

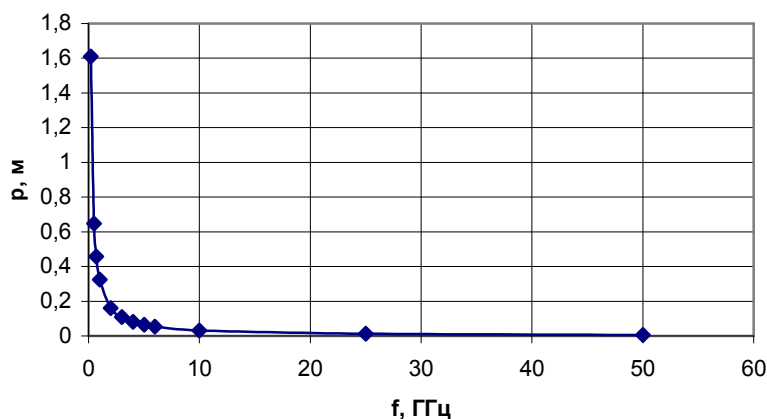


Рис. 8. Зависимость максимального осевого размера зоны критической концентрации электронов r от частоты спутниковой связи f

кочастотной аппаратуры, безопасные с точки зрения возникновения электрического пробоя.

4. Отвод продуктов САНУ через вентиляционные отверстия определённых размеров, расположенных в определённых местах, позволяет существенно снизить степень их загрязняющего воздействия.

5. При выборе взаимного расположения КГА и СПД следует учитывать влияние плазменных струй СПД, которые могут попадать в диапазоны рабочих углов крупногабаритных антенных систем, оказывая тем самым влияние на прохождение радиоволн в результате изменения электрофизических свойств пространства.

Таким образом, наиболее эффективно минимизировать дестабилизирующее и по-

вреждающее воздействие СА и плазмы, генерируемой СПД, возможно на первоначальном этапе проектирования КА – при выборе его проектного облика и ККС.

Библиографический список

1. А. Б. Надирадзе, В. В. Иванов, И. А. Максимов, В. В. Хартов, В. А. Смирнов. Математическое моделирование загрязнения внешних поверхностей космических аппаратов выхлопами электроракетных двигателей и компонентами собственной внешней атмосферы. – Сборник тезисов IV Международного аэрокосмического конгресса. 18-23 августа 2003 г. – Москва. - С. 200-201.
2. A. C. Tribble (Rockwell International Corporation). Revised Estimates of Photochemically Deposited Contamination on the Glo-

bal Positioning System Satellites – Spacecrafts and Rockets, 1998.

3. А. Б. Надирадзе. Прогнозирование воздействия струй электроракетных двигателей на элементы и системы космических летательных аппаратов. – Диссертация на со-

искание ученой степени доктора технических наук. – М.: 2003.

4. Е. Н. Васильев. Возбуждение тел вращения. – М: Радио и связь, 1987.

5. Б. Н. Иванов. Законы физики. – М: Высшая школа, 1986.

References

1. A. B. Nadiradze, V. V. Ivanov, I. A. Maksimov, V. V. Khartov, V. A. Smirnov. Mathematical modeling of space vehicle outer surface contamination by electric rocket engine exhausts and components of their own outer atmosphere. – Collection of theses of the IV International Aerospace Congress. August 18-23, 2003. – Moscow, pp. 200-201.

2. A. C. Tribble (Rockwell International Corporation). Revised Estimates of Photochemically

Deposited Contamination on the Global Positioning System Satellites – Spacecrafts and Rockets, 1998.

3. A. B. Nadiradze. Forecasting the influence of jets of electric rocket engines on elements and systems of space vehicles. – Doctoral dissertation. Moscow: 2003.

4. Ye. N. Vasilyev. Excitation of rotation elements. – Moscow: Radio i svyaz (Radio and communication), 1987.

5. B. N. Ivanov. Laws of physics. – Moscow: Vysshaya shkola (Higher school), 1986.

DEPENDENCE OF THE EXTENT TO WHICH THE SPACE VEHICLE'S OWN ATMOSPHERE AND PLASMA GENERATED BY STATIONARY PLASMA ENGINES AFFECT THE SPACE VEHICLE ON ITS STRUCTURAL LAY-OUT

© 2009 N. A. Testoyedov, V. A. Smirnov
Joint Stock Company “Information Satellite Systems”
named after academician M. F. Reshetnyov

The paper describes the mechanisms of influence of the space vehicle's own atmosphere (OA) and plasma generated by stationary plasma engines (SPE) on the space vehicle. The results of investigating the extent to which these factors depend on the structural layout (SLO) of the space vehicle are given. Ways of minimizing the negative effect of OA and plasma generated by SPE at the stage of choosing the space vehicle's SLO are planned.

Space vehicle, own outer atmosphere, own atmosphere of unpressurized compartments, stationary plasma engine, influence, structural layout.

Информация об авторах

Тестоедов Николай Алексеевич, доктор технических наук, генеральный конструктор и генеральный директор, ОАО «Информационные спутниковые системы» им. академика М. Ф. Решетнева, e-mail: office@iss-reshetnev.ru. Область научных интересов: математическое моделирование внешних воздействий и их имитация в лабораторных условиях.

Смирнов Виктор Александрович, кандидат технических наук, начальник сектора отдела исследований космической среды, ОАО «Информационные спутниковые системы» им. академика М. Ф. Решетнева, e-mail: smirnov@iss-reshetnev.ru. Область научных интересов: прогнозирование воздействия собственной атмосферы, плазмы электроракетных двигателей и метеорного вещества на функционирование космического аппарата.

Testoyedov Nickolay Alexeyevitch, general designer and general director of the joint-stock company “Information Satellite Systems” named after academician M. F. Reshetnyov, doctor of technical science, e-mail: office@iss-reshetnev.ru. Area of research: mathematical modeling of external influences and their simulation in laboratory conditions.

Smirnov Victor Alexandrovitch, head of department of space environment investigation, candidate of technical science, joint-stock company “Information Satellite Systems” named after academician M. F. Reshetnyov, e-mail: smirnov@iss-reshetnev.ru. Area of research: forecasting the influence of the space vehicle’s own atmosphere, plasma of electric rocket engines and meteor substance on the vehicle’s operation.