

## **ИНТЕГРАЦИЯ ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК С КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ**

Работа электрореактивных двигателей (ЭРД) и изменение внешней окружающей среды при их функционировании приводят к различным физическим эффектам и воздействиям на КА.

В общем виде можно выделить следующие основные эффекты негативного влияния ЭРД на КА:

- силовое воздействие;
- тепловое воздействие;
- эрозионное воздействие;
- загрязнение поверхности КА продуктами истечения двигателя;
- оптические помехи;
- электромагнитное излучение;
- влияние плазмы на прохождение радиоволн и надежность радиосвязи с КА;
- электромагнитное взаимодействие с радиосистемами КА;
- повышение температуры ионосферной плазмы в окрестности КА;
- изменение электрического потенциала КА;
- взаимодействие по цепям питания.

Силовое (механическое) воздействие связано с возникновением дополнительных возмущающих моментов за счет отклонения вектора тяги ЭРД от его геометрической оси, неточностью установки двигателя на КА, смещением центра масс аппарата вследствие выработки запасов рабочего тела, а также с частичным взаимодействием струи двигателя с элементами конструкции КА (например с панелями солнечных батарей).

Тепловое воздействие обусловлено тем, что при работе некоторые элементы конструкции ЭРД имеют относительно высокую температуру (например в СПД более 1000 К), в результате чего выделившееся тепло излучением и за счет теплопроводности передается элементам КА.

Эрозионное воздействие может происходить вследствие попадания плазменных струй ЭРД на элементы конструкции КА и приводить к изменению свойств материалов наружных поверхностей аппарата. Так, например, эрозия защитных стекол солнечных бата-

рей (СБ) под воздействием струи может явиться причиной деградации характеристик фотоэлектрических преобразователей (ФЭП).

Загрязняющему воздействию истекающей струи двигателя могут подвергаться панели СБ, оптические, терморегулирующие покрытия и другие элементы КА.

Одним из наиболее существенных факторов является осаждение пленок загрязнений на панелях СБ, что приводит к снижению генерируемой мощности за счет поглощения части солнечного излучения пленкой, увеличения коэффициента отражения и повышения температуры СБ. Осаждение загрязнений может сопровождаться также полимеризацией пленок под влиянием ионизирующего излучения в условиях орбитального полета, что еще более усугубляет сложившуюся ситуацию.

Влияние ЭРД на оптические системы КА объясняется тем, что в плазменных струях присутствуют находящиеся в возбужденном состоянии ионы. Эти частицы излучают энергию в широком диапазоне частот, включая оптический. Мощность излучения может достигать 5%, что является достаточным для засветки чувствительных оптических приборов.

Плазменные струи ЭРД обладают также и электромагнитными свойствами, что приводит к изменению условий прохождения радиосигналов, эффективных размеров и диаграммы направленности бортовых антенн, что, в конечном счете, может приводить к нарушению радиосвязи.

Кроме того, струя ЭРД может возбуждать ионосферу, приводя, в частности, к разогреву ионосферной плазмы.

При взаимодействии с плазмой ЭРД корпус КА может приобретать некоторый дополнительный потенциал относительно окружающего космического пространства, что изменяет условия функционирования радиотехнических систем КА. И, наконец, взаимодействие по цепям питания может приводить к возникновению дополнительных электромагнитных помех в работе бортовой аппаратуры, обусловленных колебаниями тока в цепях питания ЭРД и индуктивным характером нагрузки.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что взаимодействие ЭРД с КА является весьма сложным и многообразным, в которое вовлекаются многие системы и подсистемы КА (рис. 1).

С учетом специфики КА ДЗЗ «Ресурс-О» и «Электро» в части компоновочных решений и условий эксплуатации на орбите, наибольшему воздействию со стороны электрореактивных двигательных установок (ЭРДУ) могут быть подвержены СБ системы энергоснабжения, радиосистемы и конструкция аппарата. Возможно, в

меньшей степени, влияние также на оптические, магнитные системы и систему ориентации.

В данной работе рассмотрены вопросы интеграции применительно к двум типам ЭРДУ: на базе стационарных плазменных двигателей (СПД) и электронагревных двигателей (ЭНД). Эти ЭРДУ являлись основными исполнительными органами в системах управления указанных выше КА.

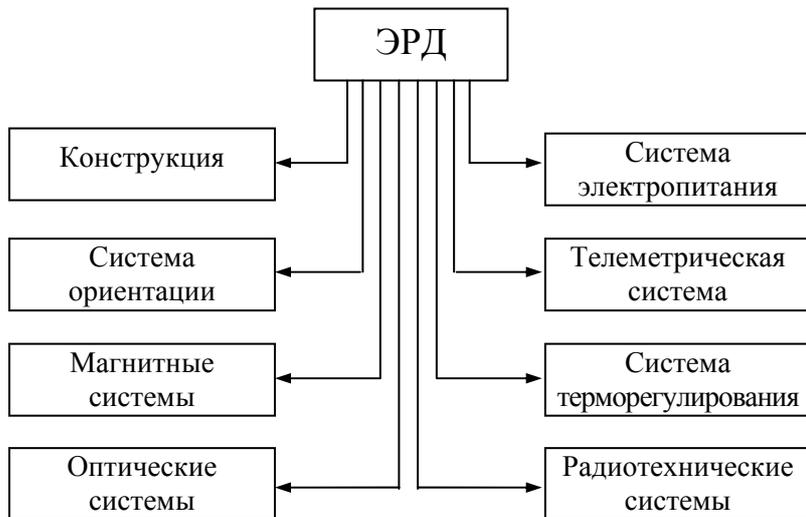


Рис. 1. Схема взаимодействия ЭРД с системами КА

### Стационарные плазменные двигатели

#### *Влияние на работоспособность СБ*

В лабораторных условиях проведено исследование стойкости панелей СБ при воздействии на них струи и теплового излучения СПД [1].

Целью экспериментов являлось определение условий длительного совместного функционирования СПД и СБ систем энергопитания КА.

Для экспериментального исследования были выбраны две модели СПД, характеристики которых обеспечивали широкий диапазон работы СПД по мощности. Параметры одной из них соответствовали стационарным плазменным двигателям применительно к КА "Метеор-Природа" и "Ресурс-О": расход рабочего тела (ксенон)

$\dot{m} = 2,4 \cdot 10^{-6}$  кг/с, мощность разряда  $N_p = 0,4$  кВт, напряжение разряда  $U_p = 160$  В, ток разряда  $I_p = 2,5$  А (режим I).

Параметры другой соответствовали предельным величинам, которые могут быть обеспечены системами энергоснабжения на основе СБ:

$\dot{m} = 3,4 \cdot 10^{-5}$  кг/с,  $N_p = 19,5$  кВт,  $U_p = 500$  В,  $I_p = 39$  А (режим II).

В режиме II моделировались условия взаимодействия СПД с СБ применительно к перспективному геостационарному КА "Электро" № 2.

В экспериментах использовались технологические панели СБ площадью 0,65 и 0,8 м<sup>2</sup>, а также электромагниточистая (ЭМЧ) панель площадью 0,76 м<sup>2</sup>.

Исследование влияния работы СПД на характеристики СБ проводилось в большой вакуумной камере объемом ~ 200 м<sup>3</sup> при динамическом вакууме  $5 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2}$  Па. Чистота эксперимента гарантировалась использованием азотных ловушек и контролировалась с помощью масс-спектрометра.

Перед установкой панелей СБ в вакуумную камеру были проведены измерения структуры, энергетических характеристик струи и теплового излучения моделей СПД в диапазоне мощностей разряда 0,4 - 25 кВт. На основе полученных данных определялось относительное расположение СПД и СБ в камере, моделирующее реальные условия эксплуатации этих систем на КА [1]. Наиболее напряженной являлась компоновка КА, при которой угол между осью струи и плоскостью СБ составлял ~ 35° (рис. 2,а). Параметры СПД соответствовали режиму I. Плотность тока ионов, попадающих на поверхность СБ, изменялась в пределах 1 - 5 А/м<sup>2</sup> при их энергии 140 - 160 В, а углы взаимодействия составляли ~ 30 - 40°. Температура поверхности СБ за несколько минут выходила на стационарный уровень ~ 310 К. Суммарное время воздействия струи и излучения СПД на СБ в этом эксперименте составило 50 ч.

Для режима I получено незначительное, на уровне 7%, т.е. в пределах ошибок измерений, изменение вольт-амперных характеристик (ВАХ) СБ (рис. 3,а), что хорошо согласуется с результатами натурных исследований по влиянию работы СПД на СБ, ранее проведенных на КА "Метеор-Природа" №1 [2]. В этих экспериментах при попадании на поверхность СБ ионного потока с плотностью ~ 0,25 А/м<sup>2</sup> и энергией ~ 100 В было получено снижение характеристик "пораженного" участка на ~ 35% за 300 ч работы КДУ "ЭОЛ-2" с СПД, а снижение характеристик СБ в целом находилось на уровне естественного старения батарей.

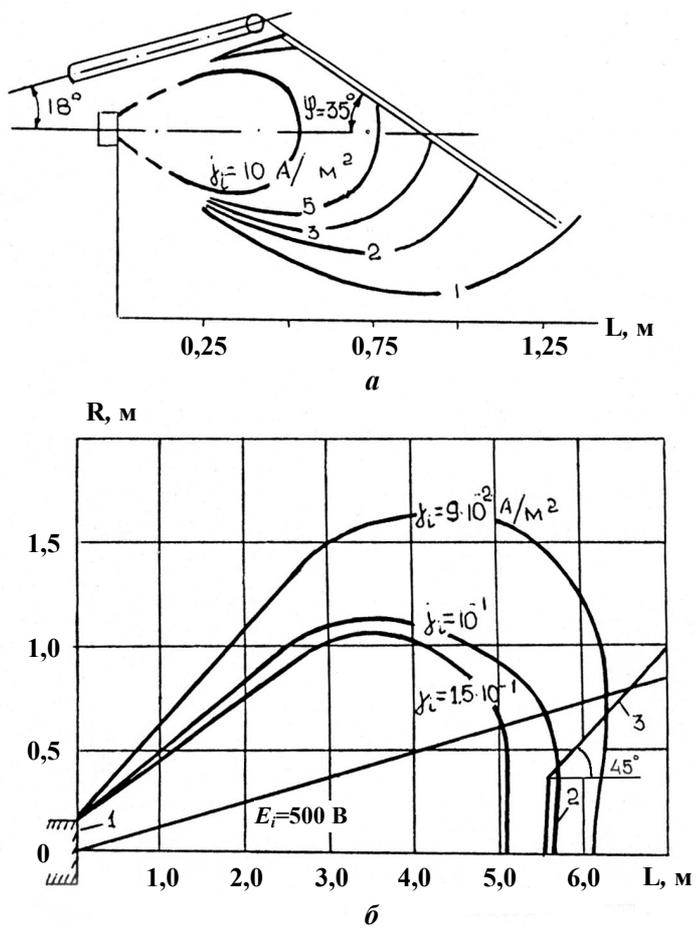


Рис. 2. Параметры взаимодействия струи СПД с панелями СБ:  
*a* - режим I; *б* - режим II

В лабораторных экспериментах обнаружено сильное эрозийное воздействие ионного потока на открытые металлические поверхности (элементы) и лицевые участки ФЭП.

Влияние СПД на элементы конструкции СБ определяется двумя основными факторами: распыляющим и тепловым воздействием ионного потока.

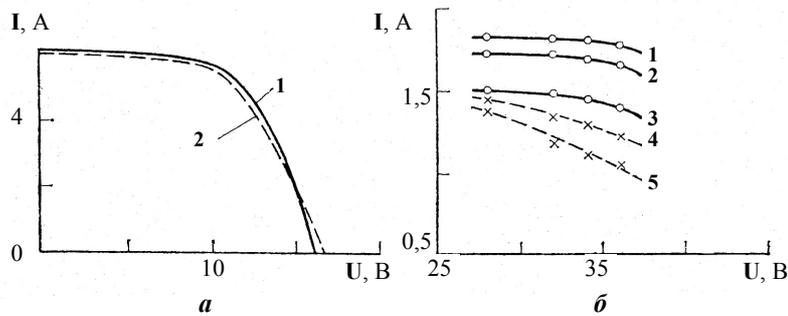


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики панелей СБ:

*a* – режим I; 1 – исходная, 2 – после эксперимента;

*б* – режим II; 1 – исходная характеристика панелей СБ1, СБ2;

2, 3 – характеристики СБ1 после первого и второго этапов соответственно;

4, 5 – характеристики СБ2 после первого и второго этапов соответственно

Оценки показали, что нагрев поверхности СБ в режиме I связан в основном с ионной бомбардировкой (мощность ионного потока ~ 320 Вт при мощности теплового излучения ~ 100 Вт). Такое соотношение характерно для электрореактивных двигателей (ЭРД) небольшой мощности ( $\leq 1$  кВт). Использование мощных ЭРД ( $\geq 10$  кВт) радикально изменяет ситуацию, что приводит к необходимости учета при нагреве СБ не только относительной доли теплового излучения, но и диаграммы его направленности.

В режиме II технологическая ЭМЧ панель (рис. 2,б - позиция 2) была установлена на расстоянии ~ 5 м от среза СПД 1 перпендикулярно его оси, а панель СБ обычной конструкции 3 под углом  $45^\circ$ . Плотность потока ионов, попадающих на поверхность СБ, составляла 0,08-0,15 А/м<sup>2</sup>, на порядок величины меньше, чем в режиме I. При этом средняя энергия ионного потока соответствовала разрядному напряжению режима II. Абсолютная величина мощности излучения увеличивалась более чем на порядок по сравнению с режимом II.

Эксперимент в режиме II проводился в два этапа по 25 ч каждый. Воздействие струи и теплового излучения СПД привело к заметному ухудшению ВАХ обеих панелей (рис. 3,б), которое в целом составило (23-50)%. Ухудшение ВАХ связано, главным образом, с воздействием на их рабочую поверхность теплового потока для рассмотренных компоновок СБ и СПД на КА. Воздействие теплового излучения становится определяющим при мощностях разряда, превышающих 5 кВт.

ЭМЧ панель находилась в неблагоприятных (по сравнению с обычной) условиях, что привело ее к большей деградации. Наиболее сильному воздействию подверглись открытые коммутационные элементы, паянные соединения и металлическое напыление радиационно-защитных стекол.

Анализ показал, что экспериментальные результаты достаточно надежно отражают процесс распыления защитного покрытия фотопреобразователей и элементов конструкции СБ ионным потоком для натуральных условий, чему способствует наличие реально существующей вокруг КА собственной внешней атмосферы аппарата, приводящей к увеличению давления КА до  $(1,3 \cdot 10^{-4} - 1,3 \cdot 10^{-6})$  Па и способствующей приближению условий лабораторных исследований к условиям натуральных испытаний.

Полученные в экспериментах данные о пространственной структуре струи и излучения СПД позволяют выбрать компоновку СБ и ЭРД на КА, обеспечивающую их длительное совместное функционирование.

#### *Совместимость с радиосистемами КА*

В связи с тем, что плазменная струя СПД является одним из основных источников электромагнитных помех, были проведены исследования влияния работы ЭРД на передачу сигнала и надежность радиосвязи с КА.

В диапазоне длин волн  $\lambda = (0,01 - 10)$  м, который использовался в системах космической связи КА "Метеор" и "Метеор-Природа", на которых эксплуатировались ЭРДУ типа "ЭОЛ", было расчетным путем получено, что струя СПД мощностью 0,5 кВт может ослаблять радиосигналы до 10-20 дБ, вызвать паразитную НЧ модуляцию сигнала до (10 - 20) %, ухудшить соотношение сигнал/шум на входах приемников бортовой командной радиолинии (БКРЛ) и в радиолинии КА-Земля более, чем на порядок.

С целью исследования электромагнитных шумов, генерируемых СПД мощностью 0,4-0,5 кВт, на КА "Метеор-Природа" была проведена серия экспериментов по определению пространственного распределения интенсивности электромагнитных полей (ЭМП) в окрестности работающего двигателя в пределах азимутальных углов  $\varphi = +10^\circ \dots 40^\circ$ , отсчитываемых от оси струи [3].

Схема эксперимента представлена на рис. 4.

В экспериментах использовался специально разработанный анализатор электромагнитного поля с приемниками, работающими в диапазоне частот (15 - 20) кГц и (0,8 - 1,5) МГц, на которых в СПД в лабораторных условиях возникают различного рода колебания.

Приемные антенны бортовой командной радиолинии (БКРЛ)

А1, работающие в диапазоне (30 - 50) МГц, располагались на панелях СБ на расстоянии ~3 м от среза СПД. Результаты телеметрии уровня шумов на входах приемников БКРЛ (РЛ-11, РЛ-12) для одного из сеансов связи приведены на рис. 5. Чувствительность бортовых наземных приемных устройств была не хуже 1 - 5 мкВ. Эксперименты показали, что интенсивность шумового сигнала заметно изменяется в течение нескольких часов после включения СПД. Приближение антенны к границе струи, за счет перемещения панелей СБ, увеличивало интенсивность сигнала.

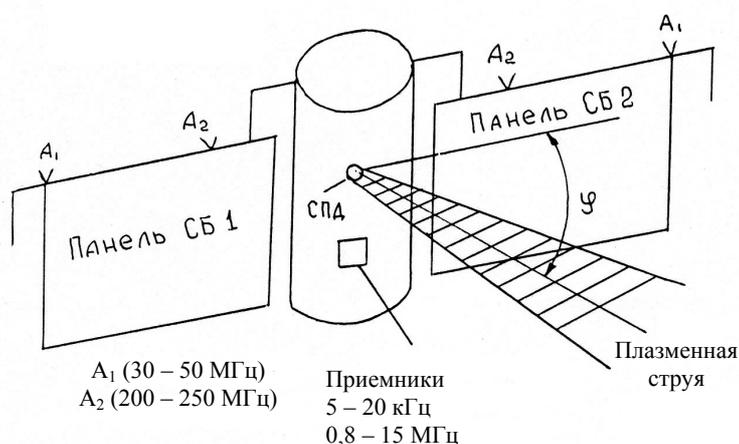


Рис. 4. Схема эксперимента

По результатам измерения интенсивности шумового сигнала было определено ухудшение отношения сигнал/шум на входе приемников БКРЛ. В случае, если антенна располагалась под углом к оси струи не меньше, чем  $35^\circ$ , то фактор шума ухудшался в 2-3 раза, при  $20^\circ$  в 3-5 раз, при пересечении струи от 10 до 30 раз.

Наличие плазмы, создаваемой СПД, влияло на прохождение радиоволны даже в диапазоне частот (200 - 250) МГц. Влияние было заметнее в том случае, если струя плазмы истекала в пространство вдоль линии связи между КА и Землей.

В целом, эксперименты показали, что истечение струи из СПД мощностью 0,4 - 0,5 кВт приводит к увеличению интенсивности электромагнитных полей в среднем до  $10^{-1}$  В/м (диапазон 5 - 20 кГц);  $5 \cdot 10^{-3}$  В/м (0,8 - 1,5 МГц);  $10^{-4}$  В/м (30 - 50 МГц) и  $5 \cdot 10^{-6}$  В/м (200 - 250 МГц).

Получено хорошее совпадение теоретических расчетов с результатами экспериментальных исследований. Данные об интенсивности и направленности электромагнитного излучения позволяют выбирать взаимное расположение ЭРД и приемо-передающих устройств, обеспечивающее надежную радиосвязь с КА. Эффективность работы ЭРД в составе КА существенно зависит от степени их интеграции с конструкцией аппарата. При этом важным моментом является знание микроатмосферы, в которой функционирует КА при работе ЭРДУ.

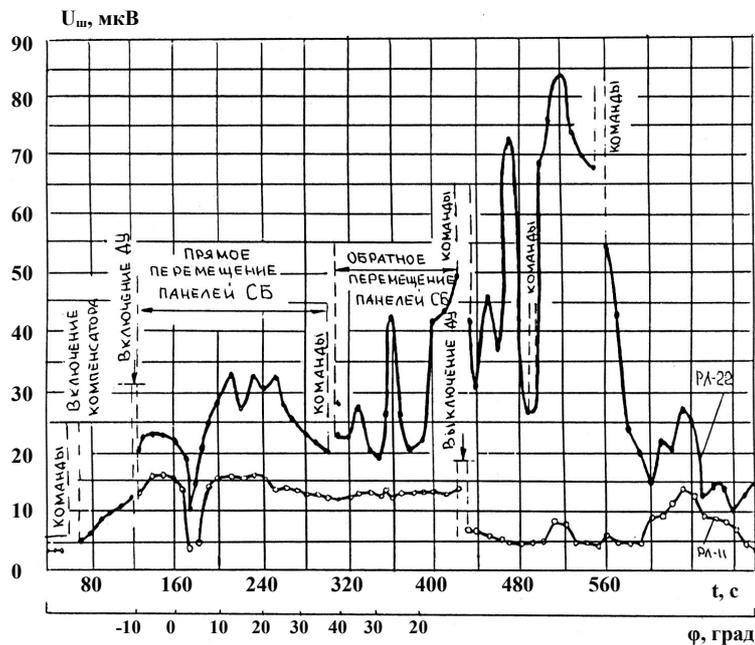


Рис. 5. Пространственное распределение интенсивности электромагнитного поля около спутника

#### Околоспутниковая среда

С этой целью было проведено измерение характеристик взаимодействия КА типа "Метеор-Природа", находящихся на орбитах высотой 850 – 900 км и наклоном 81 - 82°, с внешней средой при работе СПД мощностью 0,4 – 0,5 кВт. Измерение потоков ионов рабочего тела  $\text{Xe}^+$ , рассеянных при взаимодействии с магнитным полем и при взаимодействии с магнитным полем и ионосферной плазмой Земли и возвращающихся на КА, а также атмосферных

ионов осуществлялось с помощью специального анализатора состава окружающей среды [4].

Плотность атмосферы на высоте ~900 км в период умеренной солнечной активности составляла  $(1 - 3) \cdot 10^{-14}$  кг/м<sup>3</sup>. В период, близкий к максимальной солнечной активности, ее плотность достигала  $(2 - 4) \cdot 10^{-13}$  кг/м<sup>3</sup>.

Концентрация ионов ксенона  $\text{Xe}^+$  составляла  $(10^6 - 10^{10})$  м<sup>3</sup> при плотности ионного тока  $j_i = (10^{-7} - 10^{-9})$  А/м<sup>2</sup>, идущего на корпус. Основная доля  $\text{Xe}^+$  имела энергию  $(10 - 15)$  эВ, но наблюдались также ионы с большей энергией (до 30 эВ). Потенциал КА относительно космического пространства при неработающем СПД находился на уровне 5 В, а при включении двигателя снижался до 10 В. Потенциал плазменной струи относительно корпуса КА составлял +15 – 25 В.

В целом, полученные результаты свидетельствовали об отсутствии заметного влияния на КА работы СПД с уровнем мощности 0,5 кВт и суммарной длительностью в несколько сот часов и необходимости принятия специальных мер для обеспечения их совместного функционирования. При увеличении мощности СПД и длительности их работы проблема совместимости ЭРДУ и КА может стать более острой.

### Электронагревные двигатели

Использование в системе управления КА “Электро” (коррекция параметров орбиты и разгрузка двигателей-маховиков) ЭРДУ с ЭНД привело к необходимости проведения расчетного исследования степени влияния ЭНД на КА на стадии разработки аппарата и подготовки его к летно-конструкторским испытаниям (ЛКИ). Основные характеристики ЭНД: тяга  $F = 0,15$  Н; удельный импульс ~2700 Н·с/кг.

#### *Загрязнение КА*

ЭНД рассматриваются как один из основных источников формирования собственной внешней атмосферы КА [4] и, следовательно, могут явиться одним из потенциальных источников загрязнения поверхности аппарата продуктами истечения струи двигателя и вызвать снижение эффективности работы КА.

Образование пленки загрязнения конденсатом на поверхности КА, подверженной воздействию струи двигателя, определяется двумя одновременно проходящими процессами:

- притоком массы продуктов истечения, обусловленным воздействием струи на рассматриваемую поверхность;
- оттоком массы вследствие испарения образующейся на по-

верхности пленки конденсата под воздействием вакуума.

Таким образом, на поверхности КА будут конденсироваться только те компоненты продуктов истечения, для которых в течение времени функционирования аппарата первый процесс будет преобладать над вторым.

Процесс накопления  $i$ -го компонента продуктов истечения на поверхности описывается уравнением:

$$\frac{dm_{S_k}}{dt} = \sum_i q_{k_i}(t) - \Phi(m_{S_k})q_{k_{исп}}(t), \quad (1)$$

где индекс  $k$  относится к компоненту продуктов истечения;  $i$  - к двигателям ( $\sum_i$  - суммирование по всем двигателям);  $m_{S_k}$  - по-

верхностная плотность в рассматриваемой точке поверхности;  $q_{k_i}$  - поток массы  $k$ -го компонента при работе  $i$ -го двигателя;  $q_{k_{исп}}$  - массовая скорость испарения  $k$ -го компонента с единицы площади в рассматриваемой точке поверхности;

$$\Phi(m_{S_k}) = \begin{cases} 1, & \text{если } m_{S_k} > 0, \\ 0, & \text{если } m_{S_k} \leq 0. \end{cases}$$

Уравнение (1) в данном виде можно использовать в том случае, если известна реальная циклограмма работы ЭРДУ (т. е. точно известны моменты включения и выключения каждого двигателя), что часто сделать невозможно в случае двигателей ориентации, для которых бывают известны лишь примерная частота и длительность включений. В этом случае можно использовать уравнение (1) в виде:

$$\frac{dm_{S_k}}{dt} = \sum_i q_{k_i}(t) - q_{k_{исп}}(t). \quad (2)$$

С учетом (2) выражение для поверхностной плотности  $k$ -го компонента, осаждающегося за время  $0 \leq t \leq \tau$ , примет вид:

$$m_{S_k} = \sum_i \int_0^\tau q_{k_i}(t) dt - \int_0^\tau q_{k_{исп}}(t) dt = \sum_i q_k \Delta \tau_i - \int_0^\tau q_{k_{исп}}(t) dt, \quad (3)$$

где  $\Delta \tau_i$  суммарное время  $i$ -го двигателя за период времени  $0 \leq t \leq \tau$ , ( $\tau$  - время функционирования КА).

Значения потоков  $q_{ki}$  не зависят от времени и определяются из расчета параметров в поле течения струй ЭРДУ. Скорость испарения любого вещества с поверхности в вакуум, как известно, опре-

деляется выражением:

$$q_{k_{\text{исп}}} = \frac{P_k(T)}{\sqrt{2\pi \frac{R}{\mu_k} T_k}}, \quad (4)$$

где  $T$  - температура поверхности;  $P_k(T)$  - давление насыщенного пара  $k$ -го компонента при данной температуре поверхности;  $\mu_k$  - молекулярная масса  $k$ -го компонента;  $R$  - универсальная газовая постоянная.

Толщина пленки конденсата определяется из выражения

$$l = m_{S_k} / \rho_k,$$

где  $\rho_k$  - плотность  $k$ -го компонента в конденсированном состоянии.

Полная поверхностная масса, осевшая на поверхности КА, определяется суммированием по всем конденсируемым компонентам:

$$m_S = \sum_k m_{S_k}.$$

В результате расчетов полей течения в струях аммиачных ЭНД получены величины потоков  $\text{H}_2\text{O}$  на поверхность КА "Электро", которые по оценкам могут явиться основным источником загрязнения аппарата. Необходимо заметить, что аммиак, как рабочее тело ЭНД, перед заправкой системы хранения ЭРДУ проходит тщательную очистку, что практически исключает присутствие  $\text{H}_2\text{O}$  среди продуктов истечения двигателей. Однако для верхней оценки степени загрязнения КА при работе ЭНД целесообразно было провести расчеты с учетом пленки конденсата  $\text{H}_2\text{O}$ . Расчетным путем показано, что время существования пленки конденсата  $\text{H}_2\text{O}$  на поверхности КА и, в частности, на панелях СБ, может изменяться от единиц секунд до нескольких минут в зависимости от времени включения ЭРДУ.

Поскольку суммарное время работы ЭРДУ заметно меньше функционирования КА, то практически все время поверхность аппарата будет свободна от наличия конденсата воды.

#### *Словое воздействие*

Несмотря на малые плотности в районе расположения конструктивных элементов, большие скорости струйного газа и протяженность некоторых элементов КА (например панелей СБ) могут привести к появлению достаточно значительных по величине сил и моментов, которые необходимо учитывать в расчетах динамики аппарата и определении запасов рабочего тела. Элементы конструкции КА могут попадать в поле течения выхлопных струй ЭНД в

силу больших (практически до 180°) углов разворота струйного газа сопел двигателей.

Расчеты потерь тяги и возмущающих моментов проводились с учетом затенения одних элементов конструкций другими. Вторичными эффектами воздействия переотраженных от элементов конструкции продуктов работы ЭНД пренебрегалось. Геометрия аппарата аппроксимировалась набором 32 элементов, поверхность которых описывалась уравнениями 2-го порядка в местных системах координат, связанных с каждым элементом.

Для определения параметров в поле течения струй ЭНД использовалась методика, изложенная в [5], учитывающая влияние пограничного слоя на расширение струи двигателя в вакуум. Момент, создаваемый попаданием струи на площадку  $dS$  относительно  $(X_T, Y_T, Z_T)$ , как известно, равен:

$$d\vec{M}[\vec{R} \times d\vec{F}] = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ X_{S1} - X_{T1} & Y_{S1} - Y_{T1} & Z_{S1} - Z_{T1} \\ dF_x & dF_y & dF_z \end{vmatrix}, \quad (5)$$

где  $\vec{R}$  - плечо;  $dF_x, dF_y, dF_z$  - компоненты силы.

Компоненты момента  $dM$  с учетом силы давления  $P$ , направленной по нормали к поверхности  $\vec{N}_i$  и касательного напряжения  $\tau$  в направлении вектора  $\vec{T}$  определяются как:

$$\begin{aligned} dM_x &= [(Y_{S1} - Y_T)(-pN_{iz} + \tau T_z) - (Z_{S1} - Z_T)(pN_{iy} + \tau T_y)]dS; \\ dM_y &= [(Z_{S1} - Z_T)(-pN_{ix} + \tau T_x) - (X_{S1} - X_T)(pN_{iz} + \tau T_z)]dS; \\ dM_z &= [(X_{S1} - X_T)(-pN_{iy} + \tau T_y) - (Y_{S1} - Y_T)(pN_{ix} + \tau T_x)]dS. \end{aligned} \quad (6)$$

Суммарные моменты равны:

$$M_x = \sum_K \int \int_S dM_x; \quad M_y = \sum_K \int \int_S dM_y; \quad M_z = \sum_K \int \int_S dM_z.$$

Получено, что максимальные значения моментов, действующих на КА "Электро" при работе отдельных ЭНД не превышают:  $|M_x| < 5,6 \cdot 10^{-3}$  Н·м,  $|M_z| < 2,26 \cdot 10^{-3}$  Н·м, что составляет не более 5% от величины управляющих моментов.

В случае, если ось выходной струи двигателя ориентации параллельна плоскости СБ, может наблюдаться увеличение возмущающего момента  $|M_y| \geq 7,8 \cdot 10^{-2}$  Н·м и снижение (в 3 раза и бо-

лее) эффективности управляющего момента. Однако незначительным изменением положения двигателей (поворот оси двигателя на 10...15°) можно исключить нежелательный эффект.

Результаты летных испытаний показали необходимость учета при определении потерь тяги и возмущающих моментов коэффициентов аккомодации нормальной и тангенциальной составляющей импульса струи, что и было в дальнейшем сделано.

В целом и использование расчетной модели дает возможность определять взаимное расположение ЭРД и их элементов конструкции КА, позволяющее избежать потери тяги и снизить до минимума возмущающие моменты.

В заключении автор приносит глубокую благодарность С.Н. Асхабову, А.И. Козлову, Г.Г. Шишкину за помощь в проведении экспериментальных и расчетных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование воздействия струи и теплового излучения электроракетного двигателя на солнечные батареи космических аппаратов /С.Н. Асхабов, А.И. Козлов, В.П. Ходненко и др.// М.: Космические исследования. Т. XXVI. Вып. 5. 1988.
2. Основные результаты космических испытаний ЭРДУ с СПД ("ЭОЛ-2") на ИСЗ "Метеор-Природа" /А.И. Морозов, Ю.В. Трифонов, В.П. Ходненко и др.// М.: Тезисы доклада на IV Всесоюз. конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. 1978.
3. Исследование электромагнитной спутниковой среды, создаваемой бортовым плазменным холловским ускорителем / В.П. Ходненко, Г.Г. Шишкин // М.: Тезисы доклада на V Всесоюз. конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. 1982.
4. Y.R. Rylov, I.A. Perkov, V.P. Khodnenko. Change in the spacecraft environment with an electric thruster in operation Proc. Second European Spacecraft Propulsion Conference, 27-29 May. 1997.
5. Собственная внешняя атмосфера КА "Электро" и способы снижения ее воздействия/ В.П. Ходненко, М.А. Мельниченко// М.: Труды ВНИИЭМ. Гео-стационарный метеорологический космический аппарат "Электро". Т 98. 1998.