

ИНДЕКС УДК 533.5

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ОТ СВА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ КОРАБЛЕЙ И МОДУЛЕЙ МКС

Ю.И. Герасимов¹, А.Н. Крылов¹, А.О. Куриленок¹, Л.В. Мишина¹, С.Ф. Наумов¹,
В.Г. Приходько², С.П. Соколова¹, В.Н. Ярыгин², И.В. Ярыгин²

1 – Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева, г. Королев

2 – Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

Andrey.N.Krylov@rsce.ru

Аннотация

Проведены исследования деградации термооптических характеристик покрытий внешних элементов Международной космической станции, вызванных выносом загрязняющих фракций через дренажные устройства негерметичного агрегатного отсека Служебного модуля. Приведены результаты исследования загрязнений образцов в съемных возвращаемых кассетах и на фотографиях рефлекторов антенн транспортных кораблей серий «Прогресс» и «Союз». Получены зависимости для оперативного мониторинга уровней загрязнения продуктами сгорания топлива реактивных двигателей внешних элементов космических аппаратов. Приведены результаты численных исследований функций пространственного распределения потоков загрязняющих фракций от сопел дренажных устройств.

THE INVESTIGATION RESULTS OF OWN ATMOSPHERE CONTAMINATION EFFECT ON STRUCTURAL MATERIALS AND THERMO CONTROL SURFACES OF ISS VEHICLES AND MODULES

The investigations of thermo-optical characteristics degradation of external surfaces of International Space Station caused by contamination fractions exhaust through venting holes on Instrumental Compartment of Service Module have been carried out. The investigation results of samples contamination in removable cassettes and analysis of photos of antennas' reflectors of space vehicles "Soyuz" and "Progress" are presented. The criteria for on-line monitoring of spacecrafts surfaces contamination level by unburned fuel-oxidizer products of thrusters are obtained. The results of computational analysis of space distribution of contamination fluxes from venting nozzles are presented.

Список сокращений

СВА - собственная внешняя атмосфера;
ЛКВ - легко конденсирующиеся вещества;
МКС - Международная космическая станция;
СКЗ - система контроля загрязнений;
КЭ - космический эксперимент;
СМ - служебный модуль;
АО - агрегатный отсек;
РС - Российский сегмент;
ЭВТИ - экранно-вакуумная тепловая изоляция;
ДО±К двигатель ориентации по крену;
СКК - съемная кассета-контейнер;
ПНС - продукты неполного сгорания;
НДМГ - несимметричный диметилгидразин;
ТГК - транспортный грузовой корабль;
ТПК - транспортный пилотируемый корабль;

1 Введение

Космические корабли и орбитальные станции окружены собственной внешней атмосферой (СВА), которая формируется за счет газовой выделения из конструкционных материалов, выбросов газов и жидкостей из дренажных систем, а также выбросов из сопел жидкостных ракетных двигателей ориентации и маневрирования продуктов сгорания топлива. Компоненты СВА, относящиеся к легко конденсирующимся веществам (ЛКВ), осаждаются на внешних элементах космических объектов, вызывают изменение рабочих характеристик материалов и покрытий (цвет, оптические коэффициенты терморегулирующих покрытий, пропускающая способность стекол иллюминаторов и объективов и пр.). Полет Международной космической станции (МКС) сопровождается систематическим мониторингом уровней загрязнения ее поверхностей и элементов конструкции компонентами СВА. Для этого используются специальные средства штатной системы контроля загрязнения (СКЗ) в виде съемных кассет с образцами материалов и покрытий элементов МКС, возвращаемых на Землю после их длительного экспонирования на внешней поверхности станции, фото и видео информация, которая регулярно поступает от экипажей станции. Учитываются также результаты, полученных при проведении космических экспериментов (КЭ), в которых используются сходные средства диагностики, например «Кромка 1» [1].

Такой подход позволил выявить аномалию в уровнях загрязнения некоторых внешних элементов служебного модуля (СМ) и транспортных кораблей, пристыкованных к его агрегатному отсеку (АО). Это выразилось в сильной степени загрязнения образцов в съемных кассетах системы СКЗ, экспонировавшихся около дренажного окна на цилиндрической части АО, и в изменении цвета изначально белых покрытий элементов конструкций на торце АО (в зоне установки дренажных сопел), и на пристыкованных к АО кораблях.

В статье представлены:

1. Результаты исследований изменения оптических коэффициентов ряда терморегулирующих покрытий на образцах после их длительного экспонирования в съемных кассетах штатной системы СКЗ МКС.
2. Результаты анализа загрязнения поверхностей антенн системы причаливания кораблей «Союз», «Прогресс», состыкованных с АО СМ, после их отстыковки через 2-6 месяцев совместного полета. Данные получены с использованием фотографий, сделанных космонавтами в сеансах расстыковки кораблей.
3. Результаты численных расчетов, в которых были определены функции пространственного распределения выбросов ЛКВ из окон и дренажных клапанов АО СМ.

2 Исходная информация

2.1 Геометрия объектов

Основным модулем Российского сегмента (РС) МКС (рис.1), является Служебный модуль.

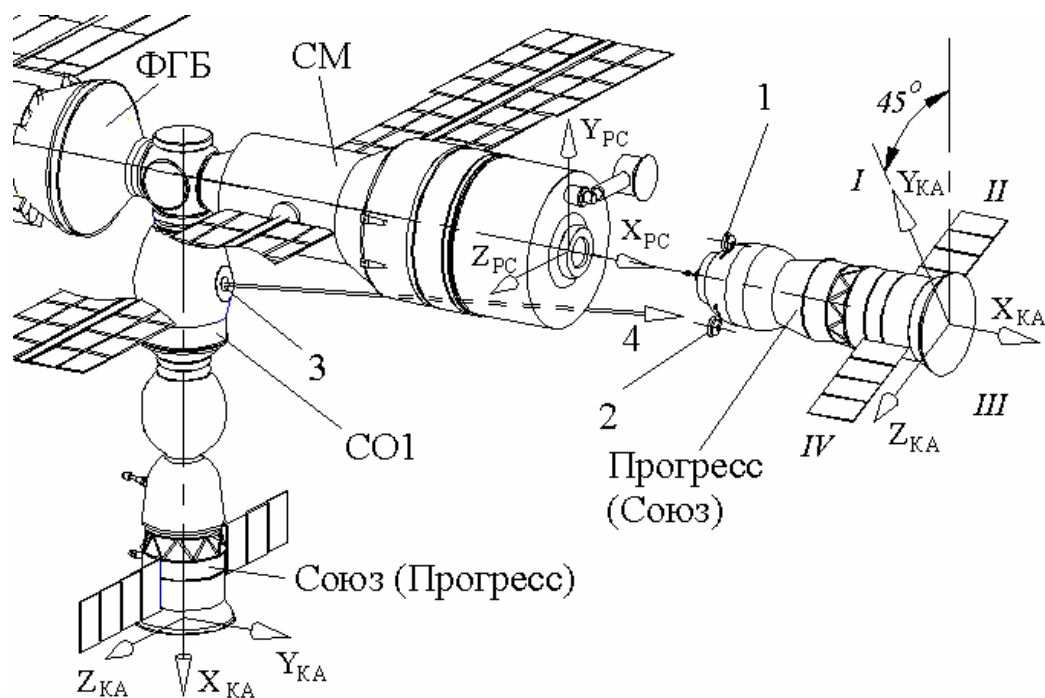


Рис.1 Корабли и модули Российского сегмента МКС (фрагмент)

СМ состоит из герметичной обитаемой части и негерметичного агрегатного отсека. АО расположен в кормовой части СМ. Отсек имеет внешний диаметр 4,1 м и предназначен для размещения баков и магистралей компонентов объединенной двигательной установки, баллонов системы хранения газов и герметичных приборных контейнеров служебных систем.

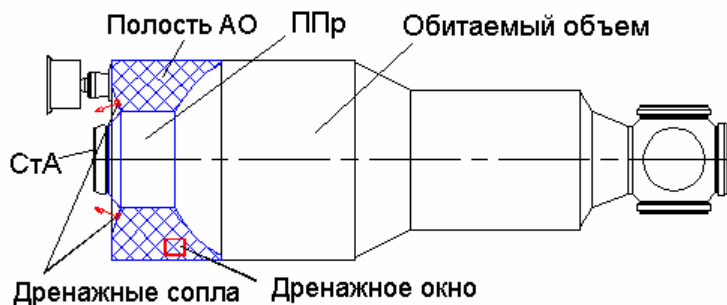


Рис.2 Геометрия СМ и полости АО

В центральной осевой части АО расположена переходная проставка диаметром 2.0 м, присоединенная к герметичному рабочему отсеку СМ. На внешней части переходной проставки, вынесенной за торец АО расположен стыковочный агрегат, к которому причаливают пилотируемые и грузовые корабли.

На боковой поверхности АО расположено прямоугольное дренажное окно с размерами 230×245 мм, на котором установлена решетка типа «жалюзи». Торцевой экран закрыт донным экраном, выполненным из мата экранно-вакуумной тепловой изоляции (ЭВТИ). В донном экране по окружности диаметром 2.37 м установлено десять дренажных устройств – дренажные сопла. Взаимное положение рефлекторов антенн транспортных кораблей относительно дренажных сопел АО показано на рис.3.

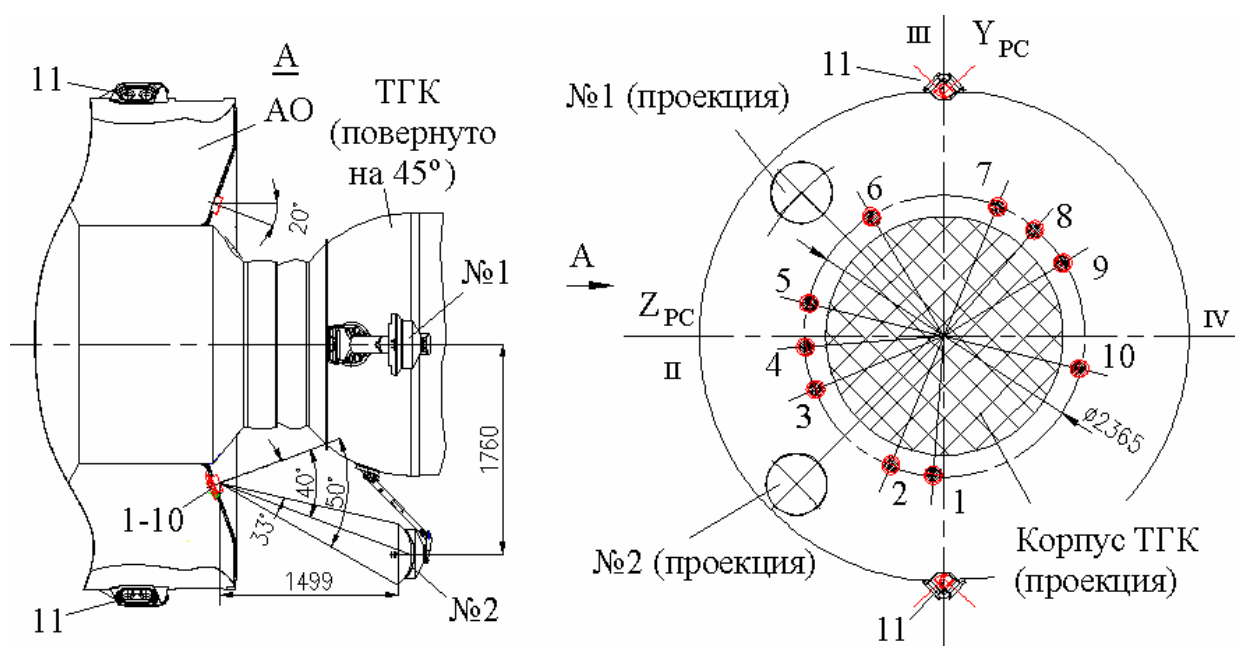


Рис.3 Взаимное положение антенн №1 и №2 транспортного корабля относительно дренажных сопел АО СМ (1-10); 11 – двигатели ДО±К

По внешнему диаметру АО в плоскостях I и III установлены блоки двигателей ориентации по крену (ДО±К), цифра 11 на рис.3. Сопла этих блоков утоплены в полость надстройки, связанной с полостью АО, рис.4.

Свободный объем полости АО составляет около 8-10 м³.

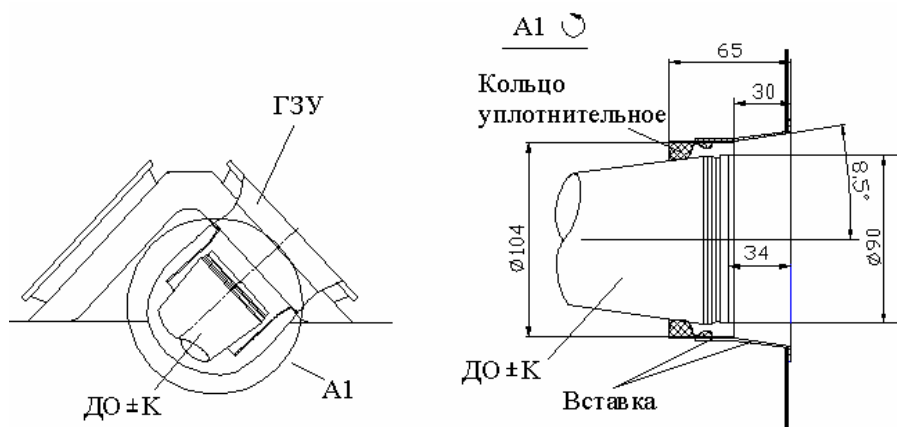


Рис. 4 Схема установки сопел двигателей в блоках ДО±К

2.2 Штатные средства системы СКЗ, схема установки и результаты

Штатными средствами регистрации системы контроля загрязнения СКЗ являются съемные кассеты-контейнеры (СКК). Каждая СКК состоит из двух створок с размерами 180×240 мм, которые шарнирно соединены друг с другом двумя петлями. В створках устанавливались наборы образцов конструкционных материалов и внешних покрытий, используемых в конструкциях космических аппаратов. Стандартные размеры образцов равны 30×30 мм.

При установке в рабочее положение, рис.5, створки кассеты разворачивались в петлях относительно друг друга на угол 90°. Плоскость одной створки устанавливалась вдоль ко-

роткой (230 мм) стороны окна на расстоянии ~20 мм. Плоскость второй створки занимала место на расстоянии ~160 мм от длинной (245 мм) стороны дренажного окна.

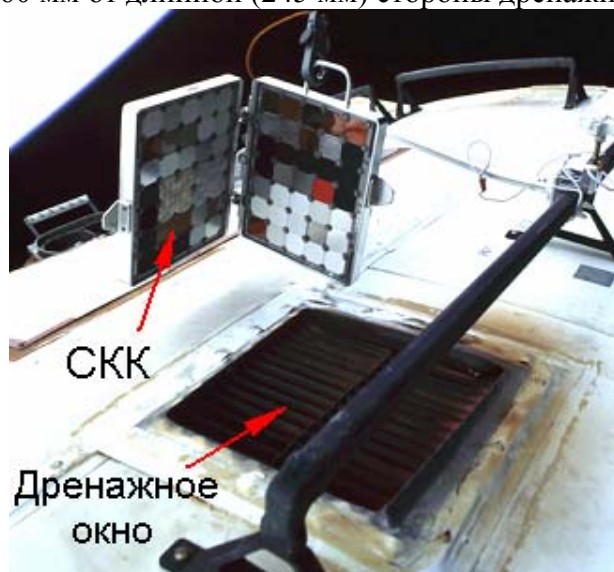


Рис. 5 Кассета СКК№1-СМ в рабочем положении (исходное состояние образцов)

Периоды экспонирования кассет на внешней поверхности модулей МКС составляли от 400 до 756 суток. На рис.6 показано состояние поверхностей образцов кассеты СКК№1-СМ после возвращения на Землю. Здесь видно, что поверхность образцов покрыта слоем осажде- ний желто-коричневого цвета, который особенно проявился на образцах с исходным белым цветом.

До и после полета проводилось взвешивание образцов и измерения значений термоопти- ческих коэффициентов их поверхностей.

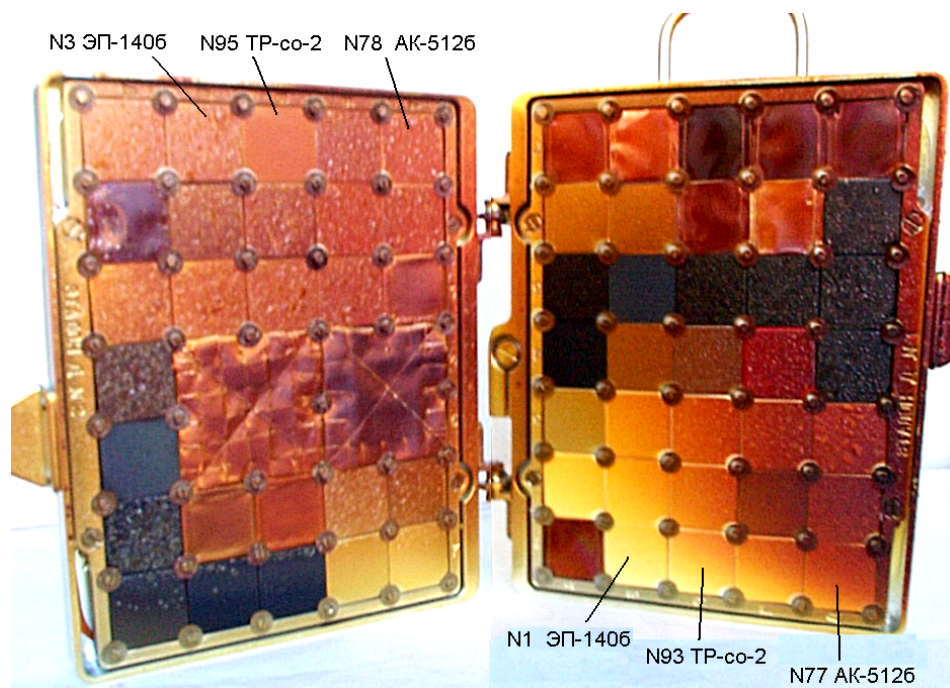


Рис. 6 Вид образцов на СКК№1-СМ после экспонирования 756 суток

Измерения интегрального коэффициента поглощения солнечной радиации A_S до и после летных испытаний проводились в лабораторных условиях с помощью накладного фотометра ФМ-59 отечественного производства в диапазоне длин волн от 300 до 2400 нм (относительные измерения). Результаты измерений значений A_S для образцов с различными покрытиями белого цвета из кассет №1 и №3 приведены в табл. 1

Таблица 1

Изменение A_S образцов материалов после ЛИ в составе кассет СКК

Наименование покрытия	№ образца	A_S до ЛИ	A_S после ЛИ	ΔA_S	Кассета
АК-512 белая	№77	0.28	0.64	0.36	СКК№1-СМ
АК-512 белая	№78	0.28	0.65	0.37	СКК№1-СМ
ТР-со-2	№93	0.16	0.45 – 0.51	0.29 – 0.35	СКК№1-СМ
ТР-со-2	№95	0.16	0.51	0.35	СКК№1-СМ
ЭП-140 белая	№3	0.31	0.65	0.34	СКК№1-СМ
АК-573 белая	№41	0.32	0.64	0.32	СКК№1-СМ
АК-573 белая	№44	0.32	0.70	0.38	СКК№1-СМ
АК-512 белая	№88	0.28	0.51	0.23	СКК№3-СМ
АК-512 белая	№89	0.28	0.45	0.17	СКК№3-СМ
ТР-со-2	№98	0.16	0.42	0.26	СКК№3-СМ
АК-573 белая	№50	0.33	0.51	0.18	СКК№3-СМ

Измерения значений спектрального коэффициента отражения R_λ до и после летных испытаний проводились на спектрофотометре LPSR фирмы AZTek (USA) в интервале длин волн 250-2800 нм (абсолютные измерения). Графики изменения значений спектрального коэффициента R_λ от значений длины волны для покрытий АК-512 белая и ТР-со-2 приведены на рис. 7 и 8.

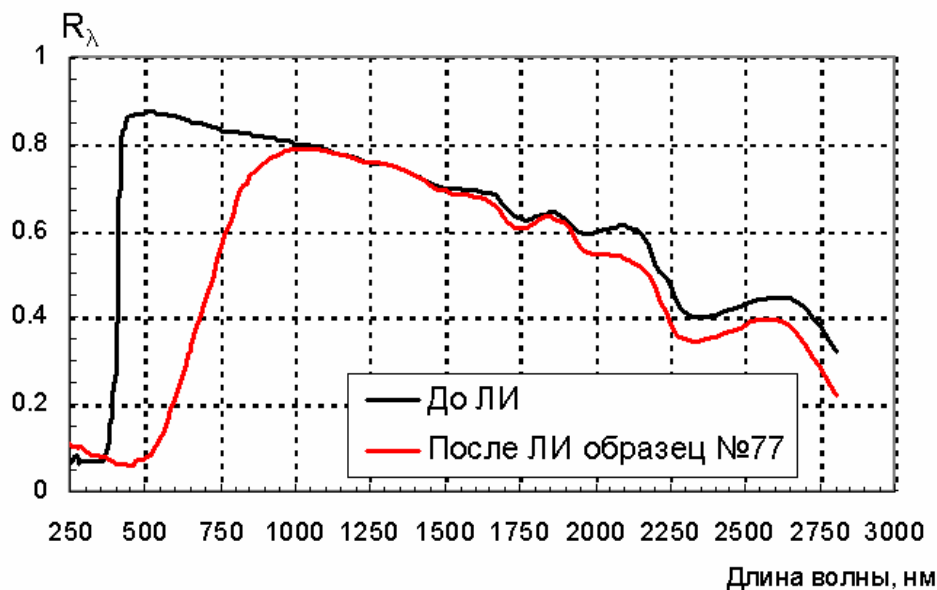


Рис. 7. Спектральная отражательная способность эмали АК-512 белая до и после летных испытаний в составе СКК№1-СМ

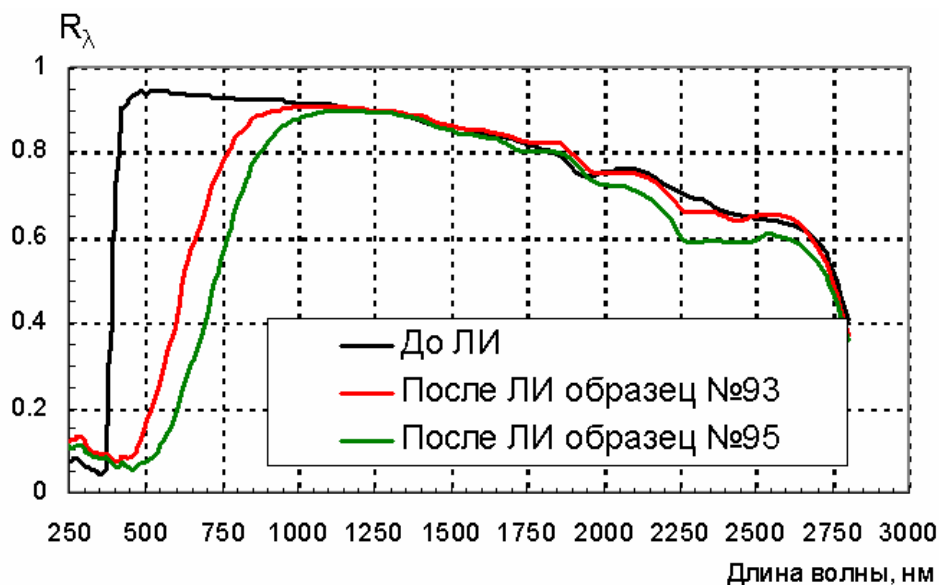


Рис.8. Спектральная отражательная способность покрытия ТР-со-2 до и после летных испытаний в составе СКК№1-СМ

Как видно из представленных рисунков, с появлением налета загрязнений на белых покрытиях их спектральная отражательная способность значительно снизилась в УФ и видимой области спектра, что повлияло на уменьшение, в целом, интегрального коэффициента отражения R_λ . Это привело к увеличению коэффициента поглощения A_S , поскольку для непрозрачных материалов выполняется соотношение: $A_S = 1 - R_\lambda$.

Для взвешивания образцов использовались лабораторные аналитические весы марки АДВ-200 с погрешностью измерений ± 0.0001 г. Перед измерениями образцы выдерживались в эксикаторе с постоянной влажностью 55% в течение 3 суток. Измерения проводились при температуре окружающей среды 23°C . Изменение (прирост) массы ΔM отдельных образцов достигало ~ 35 мг.

Проведены исследования химического состава вещества, осевшего на образцах с использованием комплекса неразрушающих спектральных методов – рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФС), отражательной ИК спектроскопии, а также сканирующей электронной микроскопии и локального рентгеновского микроанализа.

Спектры рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и данные локального рентгеновского микроанализа показывают, что осадки, наряду с обычными углеродистыми и кремнийсодержащими компонентами, типичными для загрязнений поверхностей космических аппаратов, содержат также азотсодержащие компоненты. Среди них надежно идентифицирован главный компонент - нитратная (или нитритная) соль 1,1-диметилгидразиния. В спектрах рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии она дает хорошо различимые сигналы катионов 1,1-диметилгидразиния и анионов азотной (или азотистой) кислоты. Именно солевая форма этого компонента придает ему нелетучесть в условиях высокого вакуума. Сделано однозначное заключение о том, что исследуемые вещества в осадках являются продуктами неполного сгорания (ПНС) топлива ДО СМ (НДМГ) в окислительной среде (N_2O_4). Подробно описание методов исследований и их результаты приведены в [2].

При проведении послеполетного анализа проведена обработка фотографических изображений загрязненных и чистых контрольных образцов по методике получения тарировочных зависимостей, необходимых для обработки данных по загрязнению невозвращаемых элементов космических объектов.

Использован метод микроденситометрирования, разработанный в ИТ СО РАН в рамках проведения модельных исследований выбросов капельной фракции ПНС из сопел ДО и КЭ «Кромка 1» [1]. Ниже приводятся основные положения этого метода:

а) Из исходного изображения исследуемой поверхности «вырезаются» полосы шириной от 5 до 15 пикселей и сохраняются в виде отдельных графических файлов.

б) Каждый сохраненный файл в графическом редакторе конвертируется из 24-битного цветного изображения в 8-битное изображение «оттенки серого».

в) С помощью разработанной программы проводится обработка сохраненных файлов с 8-битным изображением вырезанных полосок. Программа усредняет интенсивность окраски полоски по ширине (по 5-15 пикселям) и сохраняет полученные значения интенсивности окраски J_w (в условных единицах) в отдельном файле в виде таблицы «координата – интенсивность окраски».

Установлена следующая размерность границ диапазона условных единиц:

- $J_w=0.0$ – начало отсчета (белая поверхность);
- $J_w=1.0$ – черный цвет.

Проведено микроденситометрирование фотографий с изображением загрязненных и чистых контрольных образцов (J_0). Примеры такой обработки изображений приведены на рис.9.

В работе [1, 3] для покрытий типа TP-co-12 и АК-5126 была определена линейная зависимость между приростом интенсивности окраски $\Delta J = J_w - J_0$, получаемой по результатам микроденситометрирования сканированных изображений загрязненных образцов, и значениями ΔA_S (J_0 – фоновый уровень, измеряемый на контрольных образцах, не подвергнутых воздействию ПНС).

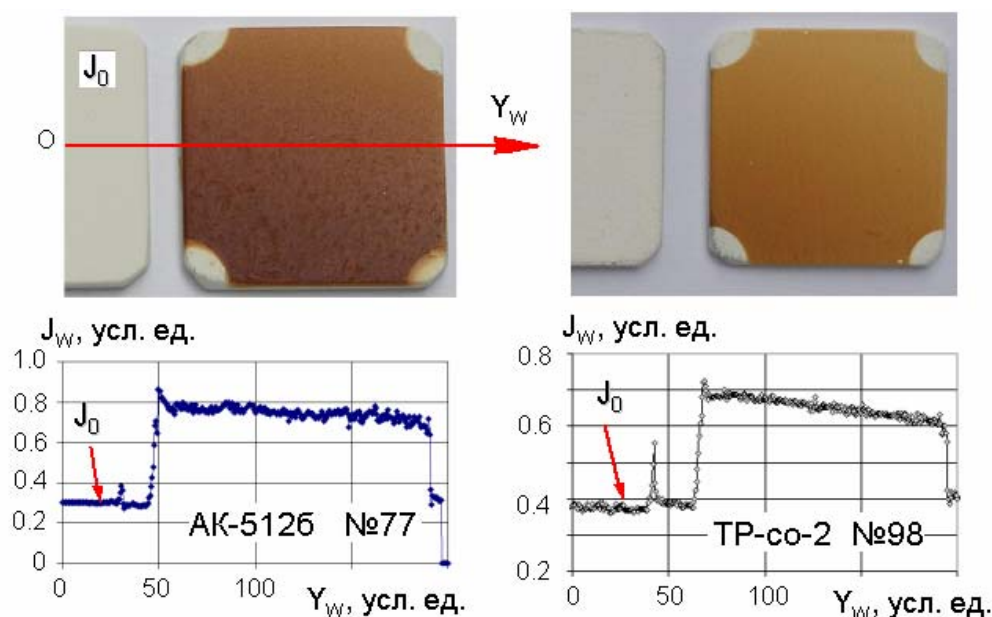


Рис. 9 Результаты микроденситометрирования контрольных и загрязненных образцов с покрытиями АК-5126 и TP-co-2 вдоль линии симметрии Y_w .

Зависимость, отражающая с погрешностью $\sim 10\%$ результаты всех этапов эксперимента КЭ «Кромка 1» показана на рис.10 и имеет вид

$$\Delta J = 1.333 \cdot \Delta A_S \quad (1)$$

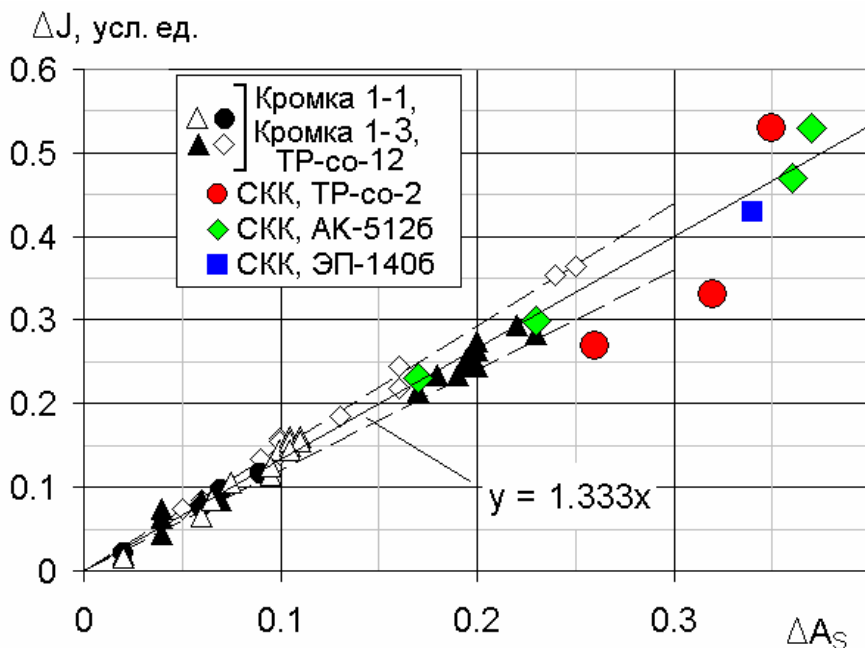


Рис. 10 Зависимость между приростами ΔA_s и ΔJ для белых покрытий типа TP-co-12, TP-co-2, АК-5126 и ЭП-1406

На этом же рисунке приведены данные, полученные при исследовании образцов СКК№1-СМ и СКК№3-СМ. Видно, что характер зависимости не изменился, а полоса разброса данных увеличилась до значения ~20%.

На рис.11 показано изменение значений ΔJ (степень потемнения) загрязненных образцов в зависимости от поверхностной концентрации ($\text{кг}/\text{м}^2$) устойчивого осадка ПНС ΔM .

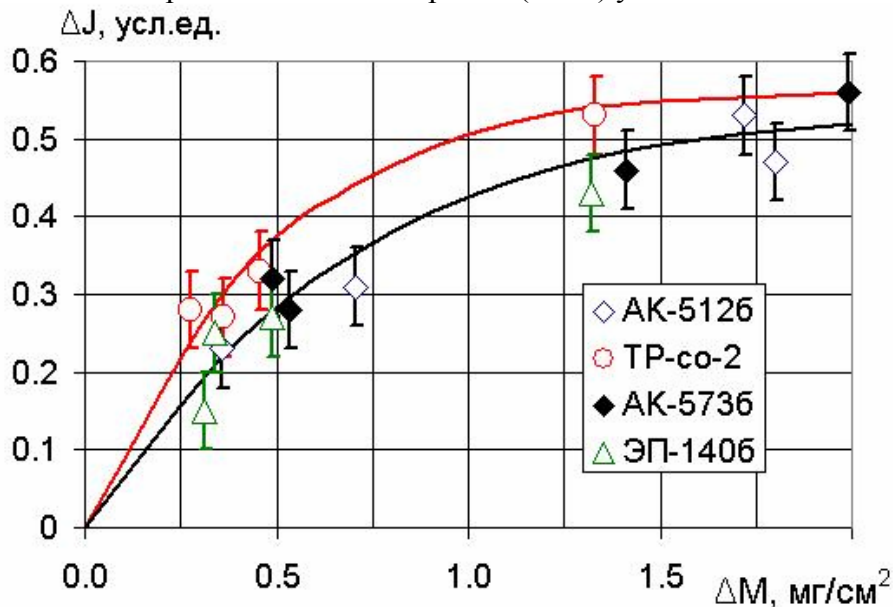


Рис. 11 Изменение степени потемнения загрязненных образцов в зависимости от поверхностной концентрации осадка ПНС.

Здесь можно выделить следующие результаты:

- данные, полученные при работе с «гладкими» эмалевыми покрытиями на основе акриловой смолы +TiO₂ (АК-5126, АК-5736 и ЭП-1406) с некоторым разбросом хорошо группируются в единую зависимость, а результаты, полученные при измерениях на шероховатых

образцах покрытий на основе $ZnO+K_2SiO_3$ (TP-co-2) лежат немного выше первой зависимости;

- обе зависимости при значениях ΔM превышающих 0.5 мг/см^2 , отклоняются сторону от линейных и монотонно стремятся к предельным величинам $\Delta J \approx 0.5-0.6$, такой характер зависимостей имеет сходство с известной функцией логарифма почернения фотографических пленок при сильной степени засветки, поэтому при значениях $\Delta J > 0.5 \text{ мг/см}^2$ погрешность определения значений $\Delta M(\Delta J)$ сильно возрастает.

Приведенные на рис. 10 и 11 графики позволяют по качественным фотографиям элементов космических аппаратов, полученным в космосе, определять для однотипных покрытий количественные параметры степени их загрязнения осадками ПНС и изменение значений A_s .

2.3 Привлеченные результаты регистрации уровней загрязнения

Важными источниками информации о степени загрязнения внешних элементов являются фотографии, сделанные экипажами МКС через иллюминаторы станции и во время выходов в открытый космос.

Анализ полученных фотографий позволил установить факт загрязнения белых поверхностей антенн (цифры 1 и 2 на рис.1) системы автоматической стыковки транспортных грузовых кораблей (ТГК) типа «Прогресс М» и транспортных пилотируемых кораблей (ТПК) «Союз ТМА» после их полета в составе МКС в течение от 40 до 200 суток в состыкованном положении с АО СМ. В качестве примера, на рис.12 показана фотография ТПК «Союз ТМА-16», сделанная из иллюминатора стыковочного отсека СО1 при расстыковке корабля с АО СМ после 115 суток совместного полета.

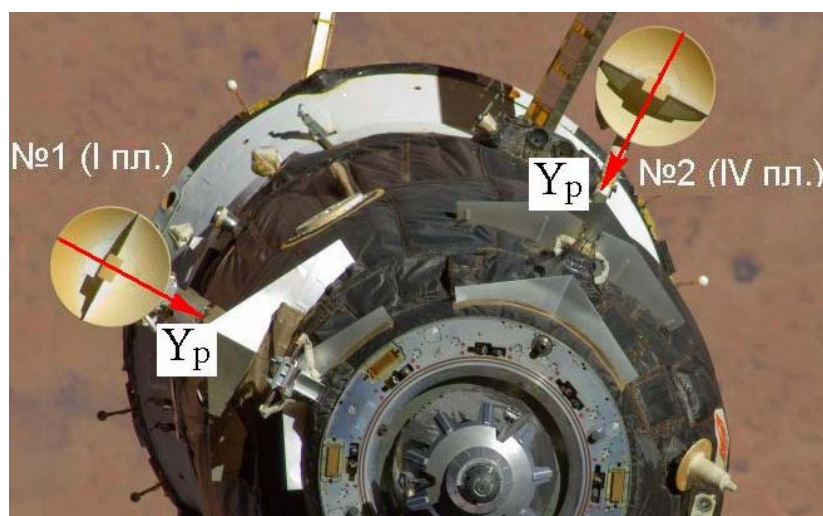


Рис.12 Загрязнение рефлекторов антенн системы автоматической стыковки (№1 и №2) ТПК «Союз ТМА-16» Корабль находился на АО СМ 115 суток

Возможность получения фотографий транспортных кораблей в циклах при стыковках-расстыковках с АО СМ появилась после появления в составе МКС стыковочного отсека СО1 (октябрь 2001 г.), у которого из иллюминатора 3 (рис.1) просматривается пространство за кормовой частью СМ. С этого момента до конца 2010 года реализовано 29 циклов стыковок-расстыковок. В состыкованном положении корабля с СМ из иллюминатора стыковочного отсека СО1 можно видеть только 20% поверхности антенн №1 и №2, т.к. остальная часть их поверхности экранируется корпусом АО. Полные фотографии антенн ТГК и ТПК можно получить только в процессе стыковки-расстыковки когда, расстояние между плоскостями сты-

ка АО и корабля составляет 10 - 12 м. При этом расстояние от иллюминатора 3 по линии визирования 4 (рис.1) до антенн составляет ~25 м. При фотографировании экипажи пользовались аппаратами с объективами, имеющими фокусное расстояние не менее 400 мм.

Качество и информативность фотографий зависит от условий освещенности объектов съемки, которые на момент проведения расстыковки не регламентируются. Поэтому за весь период полета СМ удалось получить ограниченный объем качественных фотографий, отражающих состояние поверхностей антенн (для восьми сеансов), рис.13.

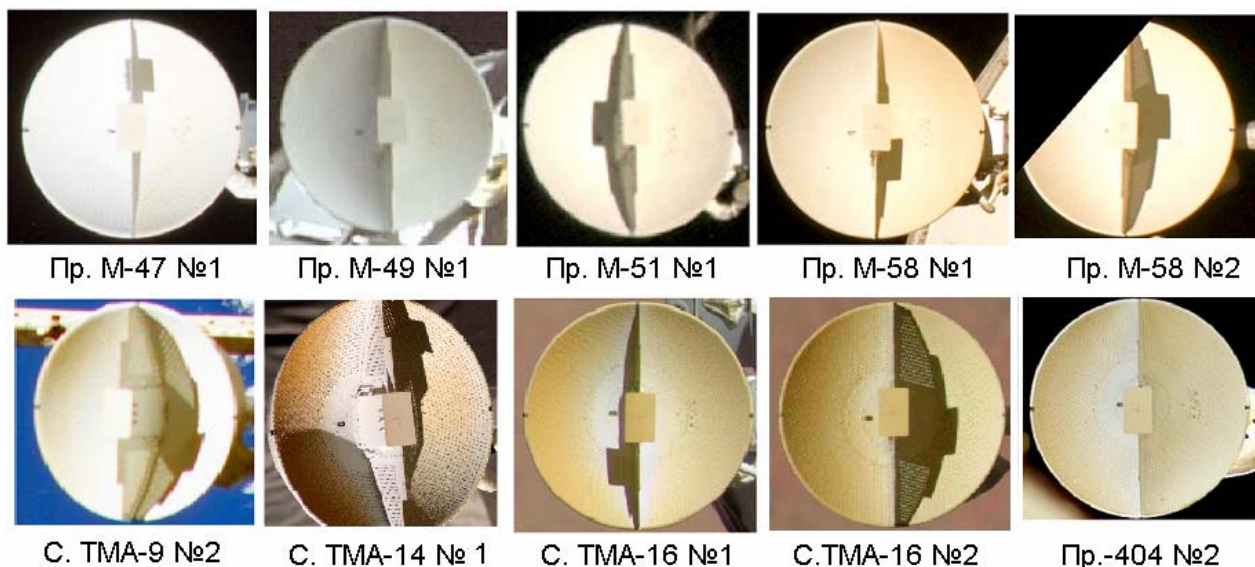


Рис.13 Фотографии антенн, сделанные при расстыковках кораблей от АО СМ

Проведен комплексный анализ возможных причин приводящих к загрязнению антенн транспортных кораблей, расположенных на АО СМ. Было сделано заключение о том, что загрязнение антенн и образцов в кассетах СКК имеют одну и ту же причину, связанную с выносом молекулярной фракции ПНС из полости АО. На кассетах СКК и на антеннах осаждаются ПНС, вылетающие из единого объема полости АО, соответственно, через дренажное окно в цилиндрической части отсека и через дренажные сопла на его торце. О том, что мы имеем дело с осадками ПНС, указывают результаты анализа состава осадений на образцах СКК.

Наиболее вероятной причиной попадания ПНС в полость является недостаточная герметизация технологического зазора между стенками внешнего кожуха сопла (коническая поверхность) и цилиндрической части вставки в схеме установки сопел ДО±К, показанной на рис.4. Здесь уплотнительное кольцо выполнено из скатки ткани, изготовленной из кремнеземного волокна. Такое кольцо не обладает свойствами восстановления формы после механических деформаций. Поэтому между его поверхностью и стенкой кожуха сопла возможно образование зазоров. При работе двигателей блоков ДО±К около стенки вставки возникает возвратное течение газовой фракции продуктов сгорания топлива. Через образовавшиеся зазоры в системе «стенка кожуха сопла – уплотнительное кольцо» продукты сгорания могут затекать в полость АО, увлекая с собой жидкую фракцию ПНС, выносимую на кромку сопла по его стенке.

В блоках ДО±К установлены двигатели с тягой ~130 Н. Основные циклограммы работы ДО±К включают в себя многочисленные импульсы в длительностью 100 мс, а средние за цикл работы длительности импульсов составляют 250-500 мс. При таких режимах работы массовая доля жидкой фракции ПНС, выносимая на кромку сопла составляет ~1% от расхода компонентов топлива. За 10 лет эксплуатации СМ через двигатели блоков ДО±К израсходо-

вано около 16000 кг топлива, см. рис.14. Если рассматривать вариант полного отсутствия уплотнительных колец, то верхнее значение массы ПНС, проникших в полость АО, составит 160 кг. Реальное значение этого параметра оценивается нами величиной 20-40 кг.

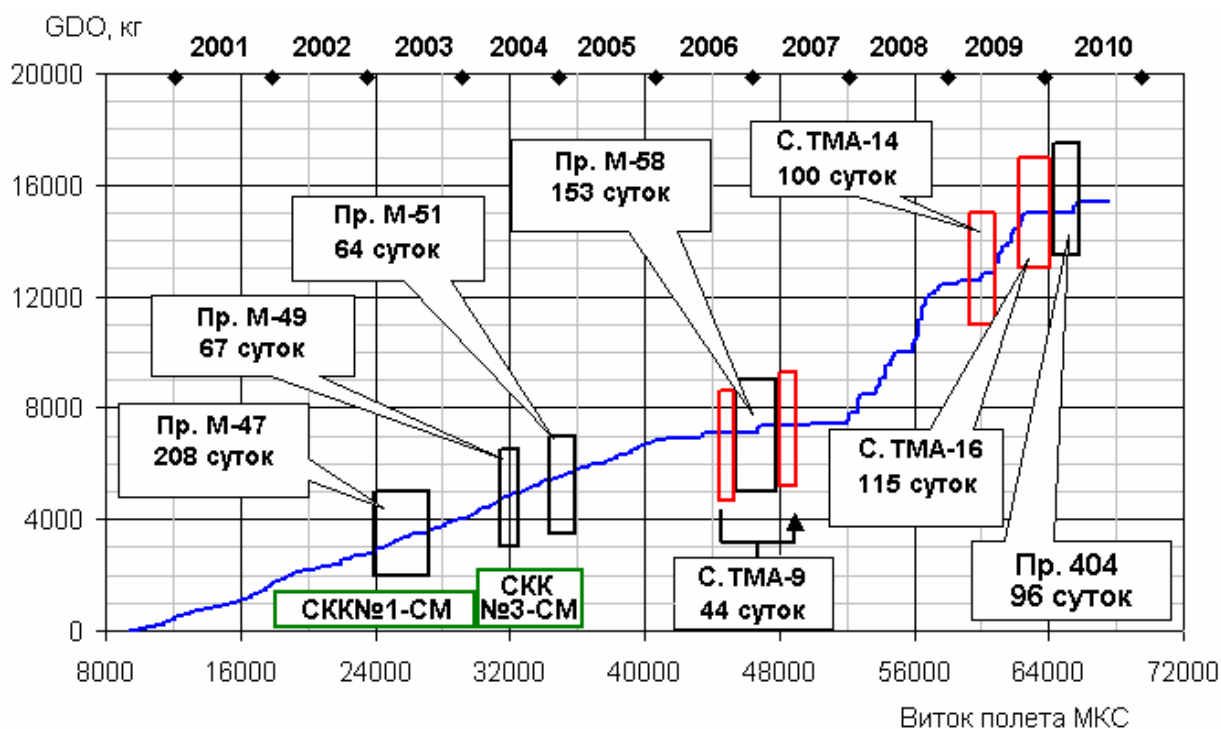


Рис.14. График расхода топлива через двигатели крена СМ, последовательность и длительности экспонирования кассет СКК и полетов транспортных кораблей на АО СМ

Последовательность и длительности полетов кораблей на АО СМ показаны на рис.14.

Сопоставление данных, приведенных на рис. 13 и 14, указывает на то, что загрязнение антенн стало проявляться через четыре года после начала эксплуатации СМ в составе МКС (на стыке 2004 и 2005 гг.). При этом наблюдается увеличение уровня загрязнения антенн по мере увеличения времени полета МКС, длительности полета корабля в ее составе на АО СМ и интенсивности расхода топлива.

Количественные параметры загрязняющего осаждения на рефлекторах антенн получены с использованием методики, разработанной по результатам КЭ «Кромка 1» [3], с учетом тарировочных зависимостей, определенных при анализе данных, полученных в результате экспериментов с кассетами СКК№1-СМ и СКК№3-СМ. Здесь было использовано то обстоятельство что, элементы рефлекторов антенн покрыты эмалью АК-512б, которая тестировалась на образцах, установленных в кассетах СКК№1-СМ и СКК№3-СМ.

2.4 Обработка и анализ данных по загрязнению рефлекторов антенн

Определены функции распределения загрязнения рефлекторов антенн, методом микроденситометрирования сканированных фотографий их поверхности вдоль оси симметрии Y_p , лежащей в плоскости стабилизации корабля I (для антенны №1) или IV (для антенны №2) и ориентированной к оси $X_{КА}$ корабля, т.е. вдоль оси $Y_{КА}$ или $Z_{КА}$, см. рис.12 на основе описанной выше методики, разработанный в ИТ СО РАН.

На рис. 15 приведены характерные функции распределения вдоль оси Y_p интенсивности потемнения окраски изображений антенн транспортных кораблей, установленных по оси $+Z_{КА}$ (по IV плоскости). Из полученных распределений удалены значения, полученные в зо-

нах, расположенных в областях за центральной стойкой (кронштейном) блока излучателей, в которые падает тень от лучей Солнца.

Вид полученных распределений позволил сделать следующие заключения:

- максимумы функций (J_m) реализуются, как правило, на левой границе, в окрестности значений координаты $Y_p=0$;

- минимумы функций, которые с некоторой погрешностью были приняты как фоновые значения (J_0 на рис.9) наблюдаются при значениях $Y_p=200-220$ мм, эта зона в значительной мере защищена от молекулярных потоков ПНС, вылетающих из дренажных сопел кронштейном блока излучателей (кронштейн выполнен из листа алюминия и имеет систему сквозных отверстий);

С учетом сказанного выше результаты микроденситометрирования были представлены в нормированном виде как зависимости от Y_p текущих значений параметра

$$\Delta J / \Delta J_m = (J_w - J_0) / (J_m - J_0) \tag{2}.$$

В таком представлении на рис.16 приведены результаты микроденситометрирования фотографий антенн №1 (по I пл. КА).

Можно отметить, что в левой части графика $Y_p < 200-220$ мм, все результаты, представленные в форме (2) описываются единой зависимостью. Такой же зависимостью описываются данные, полученные при $Y_p < 200-220$ мм по фотографиям антенны №2.

В правой части рисунка $Y_p > 300$ мм, который относится к нижней части рефлектора (ближней к корпусу корабля), данные, представленные в форме (2) ведут себя произвольным образом.

Значения максимальных уровней поверхностной концентрации загрязняющей фракции DM_{max} на рефлекторах антенн ($Y_p=0$) приведены в табл. 2. Эти данные определены по нижней зависимости на рис.11 (покрытие АК-512б) с использованием результатов микроденситометрирования фотографий антенн представленных в виде $\Delta J = \Delta J_m = (J_m - J_0)$.

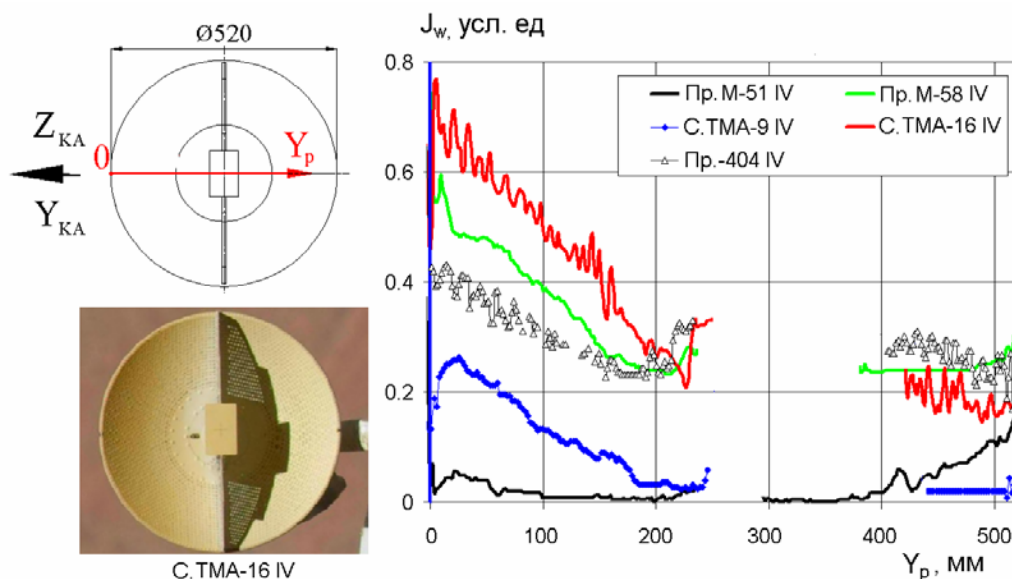


Рис. 15 Результаты микроденситометрирования изображений рефлекторов антенн №2 транспортных кораблей, стыковавшихся с АО СМ.

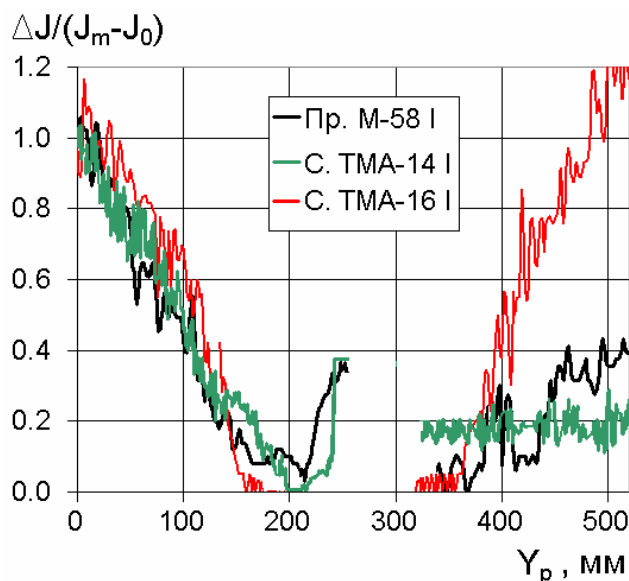


Рис.16 Нормированные функции потемнения окраски антенн №1 (по I пл. КА)

Таблица 2

Максимальные расчетные уровни поверхностной концентрации загрязняющего осадка на рефлекторах антенн

№ п/п	Название транспортного корабля	Длительность полета на АО СМ, Dt,сутки	DM _{max} , мг/см ²	
			Антенна №1	Антенна №2
1	Прогресс М-47	208	0.15	0.043
2	Прогресс М-49	67	Нет фото	0.25
3	Прогресс М-51	64	Нет фото	0.12
4	Прогресс М-58	153	0.35	0.48
5	Союз ТМА-9	44	Нет фото	0.2
6	Союз ТМА-14	100	1.3	Нет фото
7	Союз ТМА-16	115	0.25	0.95
8	Прогресс №404	96	Нет фото	0.35

Среднесуточные за полет приросты поверхностной концентрации осадка на рефлекторах антенн в точках максимума определяются по данным табл.2 как $dM_C = DM_{max} / Dt$. Расчетные значения dM_C для полетов кораблей с порядковыми номерами табл.2 приведены на рис.17.

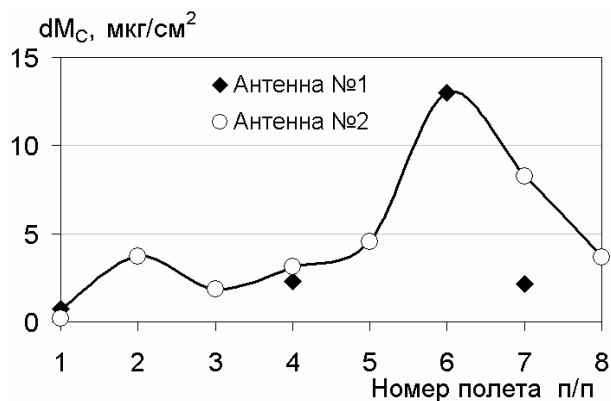


Рис. 17 Среднесуточные за полет приросты поверхностной концентрации осадка на рефлекторах антенн в точках максимума ($Y_p=0$).

3 Численные исследования закономерностей выноса ПНС из полости АО

3.1 Решение обратной задачи

Практический интерес представляет вопрос о виде функции пространственного распределения молекулярного потока ПНС вылетающего из дренажного сопла на донном экране АО. Была сформулирована задача определения вида этой функции в следующей постановке:

Имеются:

1. Результаты микроденситометрирования фотоизображений в виде функций изменения значений параметра DJ (или DM) по поверхности рефлектора вдоль оси симметрии Y_p .
2. Информация о геометрии поверхности рефлектора - координаты элементарных площадок и положение в пространстве их нормалей.
3. Предполагаемые источники загрязнения, из которых ПНС приходят к поверхности рефлектора антенны. С учетом экранирующего эффекта, создаваемого корпусом корабля, для антенны №1 это дренажные сопла с порядковыми номерами 2-9 (см. рис. 3) и сопла с номерами 1-5, 10 для антенны №2. Известны координаты установки дренажных сопел и ориентация их продольных осей, рис. 3.

4. Данные о конструктивном исполнении дренажного сопла приведены на рис.18. Устройство состоит из цилиндрического выходного сопла и крышки в виде тарелки, закрепленной посредством трех стоек на фланце сопла с проходным зазором равным 20 мм.

Необходимо определить вид функции распределения потока массы ПНС в поле за срезом дренажного сопла $F_c = F_c(\theta, R = const)$, использование которой при суммировании осадков ПНС на поверхности рефлектора от всех источников, выделенных в пункте 3, приводит к результатам пункта 1. При этом принимается, что искомая функция определяется при реперном значении $R=R_0=1.5$ м, изменение потока массы в поле течения меняется пропорционально $1/R^2$, а массовая концентрация осаждаемой фракции зависит от косинуса угла между линией тока (вектор R на рис.18) и нормалью к элементарной площадке на поверхности рефлектора (угол φ).

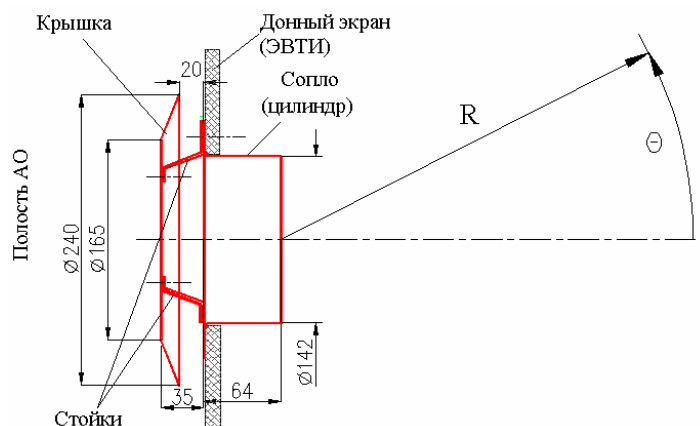


Рис. 18 Конструкция дренажного сопла, координаты полярной системы поля течения потока ПНС

Отметим диапазоны значений полярного угла θ , в которых лежат поверхности рефлекторов антенн. Точки с координатами $Y_p=0$ (верхний край рефлектора) обеих антенн видны из центров дренажных сопел под углами θ в диапазоне от 48 до 53° относительно их продольных осей. Точки на нижних краях рефлекторов $Y_p=520$ мм видны из сопел при значениях углов θ от 31 до 42° . Центры рефлекторов ($Y_p=260$ мм) расположены в диапазоне углов θ от 39 до 45° . Таким образом, решением сформулированной обратной задачи можно определить искомые функции $F_C = F_C(\theta, R = const)$ в диапазоне углов θ , который ограничен значениями 31° и 53° .

Результатами серии численных решений определен набор функций $F_C(\theta)$, при использовании которых, вид расчетных зависимостей $dM_C \sim F_C(\theta) \times \cos(\varphi) / R_w^2$ (где R_w - расстояние от среза сопла до площадки на поверхности рефлектора) хорошо согласуются с данными, полученными при обработке фотографий $DJ(Y_p)$. Вид полученных функций $F_C(\theta)$ приведен на рис.19.

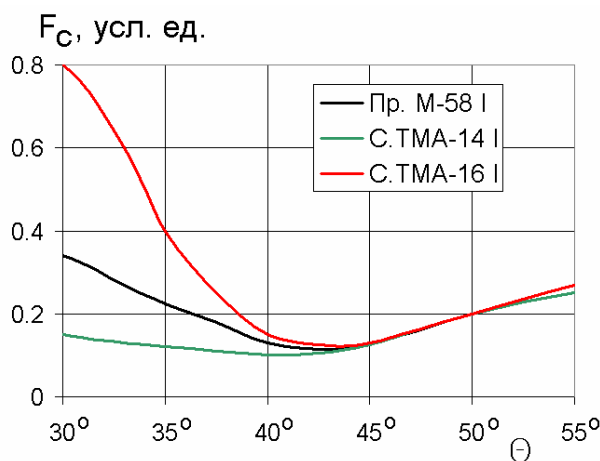


Рис. 19 Функции пространственного распределения потока массы ПНС в поле за срезом дренажного сопла

Полученные результаты позволяют выдвинуть гипотезу о том, что суммарная за время полета функция $F_C(\theta)$ суммируется из функций, определяемых различными физическими

процессами переноса молекулярного потока ПНС. Например, это может быть проявлением истечения газа из полости АО, которое реализуется в течение двух – четырех часов после завершения цикла работы двигателей. Вторым загрязняющим фактором может являться процесс постепенного переиспарения массы ПНС с поверхностей внутреннего объема АО с последующим выносом ПНС на внешние поверхности конструкции дренажного сопла. Время протекания этого процесса от начала до выхода молекул ПНС за срез сопла может достигать нескольких месяцев. С учетом данных о расходе топлива через ДО±К, можно сделать предварительное заключение о том, что этот процесс является доминирующим при формировании функции распределения $F_c(\theta)$ в периферийной части поля течения ($\theta > 45^\circ$).

3.2 Результаты расчетов

Для подтверждения полученных данных была проведена серия расчётов массопереноса в зоне установки антенн.

Проведен расчет потоков массы на поверхности антенны методом угловых коэффициентов с учетом затенения элементами конструкции. Для источника газовой выделености принят диффузный закон распределения потоков массы по углу. Коэффициент прилипания загрязнителя принят равным 1. При этом скорость осаждения на поверхность может быть рассчитана по формуле:

$$\dot{M} = \dot{M}_0 \times Vf \quad (3)$$

где: \dot{M}_0 - скорость газовой выделености (кг/(м²·сек)), \dot{M} - скорость осаждения на поверхности, Vf - угловой коэффициент, под которым видна газовой выделяющая поверхность из точки наблюдения.

В качестве источников газовой выделености рассматривались поверхность защитной крышки и внутренняя боковая поверхность сопла. На эти поверхности молекулы ПНС осаждаются в процессе их испарения с внутренней поверхности донного экрана, рис. 20. Рассмотрены два расчетных варианта.

Первый расчетный вариант - поверхность донного экрана около дренажного сопла загрязнена равномерно, рис. 20а. Во втором варианте предполагается, что вследствие неких объективных факторов, вокруг дренажных устройств реализуется картина неравномерного загрязнения поверхности донного экрана, например, из-за направленного движения переиспаряющегося молекулярного потока внутри полости АО от зон установки блоков ДО±К. Схема переиспарения для этого расчетного варианта показана на рис. 20.

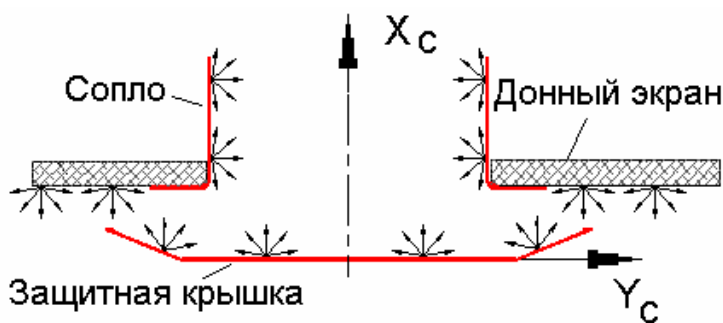


Рис. 20

Результаты расчетов в виде распределений значений угловых коэффициентов Vf на внутренних поверхностях защитной крышки и сопла для этих вариантов показаны на рис. 21.

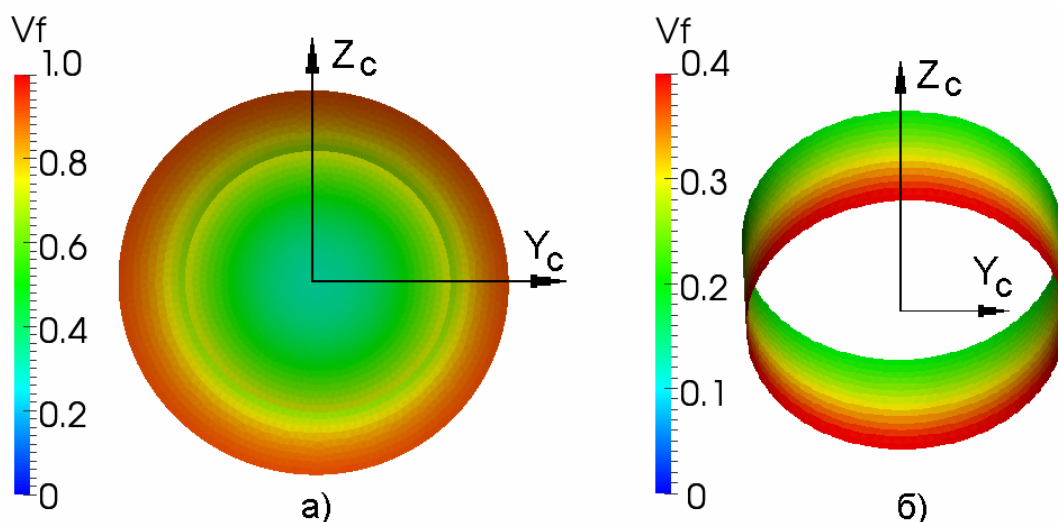


Рис.21

Функции изменения угловых коэффициентов Vf для единичных площадок на дуге окружности радиуса $R=1500$ мм в зависимости от полярного угла θ (рис.18), в квадранте между осями X_c и Y_c приведены на рис.22.

Скорость газовыделения \dot{M}_0 в (3) существенно зависит от температуры поверхности. Значения температуры цилиндра сопла и защитной крышки по времени полета отличаются друг от друга, поверхность защитной крышки за полостью цилиндра практически не освещается лучами Солнца, а боковая стенка сопла бывает освещена Солнцем в течение $\sim 1/2$ времени полета на освещенной части орбиты. Исходя из этого, суммарная функция углового распределения молекулярного потока ПНС за срезом дренажного сопла (в условных единицах) может быть определена как сумма функций 1 и доли функции 2, которая определяется весовым коэффициентом $K_{кр}$. Семейство таких функций, нормированных значениями сумм, полученных при значениях $\theta=60^\circ$, показано на рис. 22б.

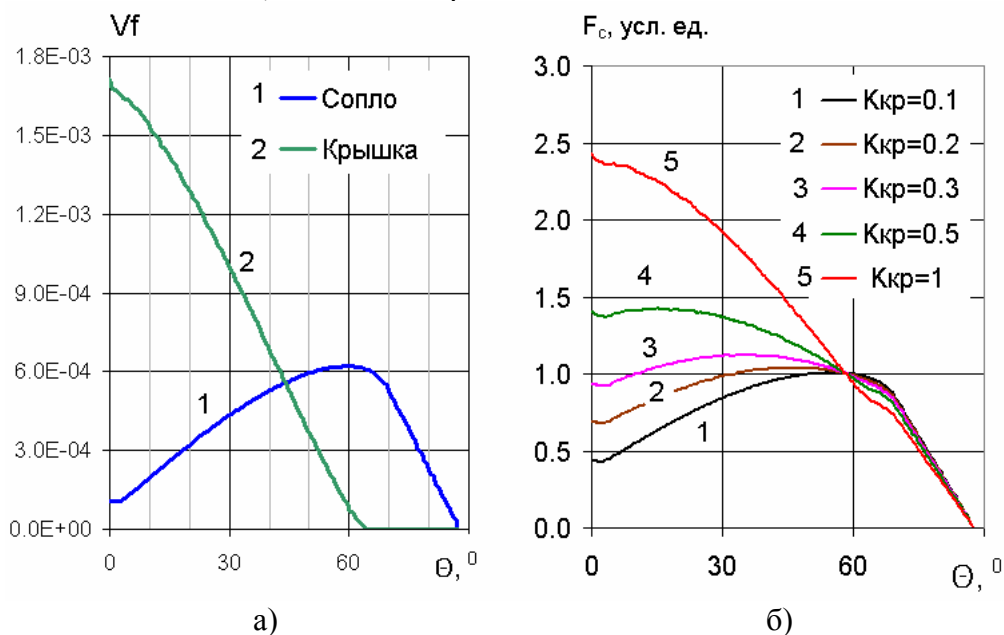


Рис.22.

Видно, что качественное согласование вида суммарной функции с результатами, приведенными на рис. 19 имеет место только в диапазоне углов θ от 43° до 55° только при значении весовой доли скорости газовыделения с поверхности крышки $K_{кр}=0.1$ по отношению к скорости газовыделения с поверхности стенки сопла $K_c=1.0$. На рис. 23 приведены результаты расчета уровней осаждения массы ПНС на антенне №1 (I пл.) корабля «Союз ТМА-14» с использованием функций рис. 22а и коэффициентов при скоростях газовыделений $K_{кр}=0.1$, $K_c=1.0$.

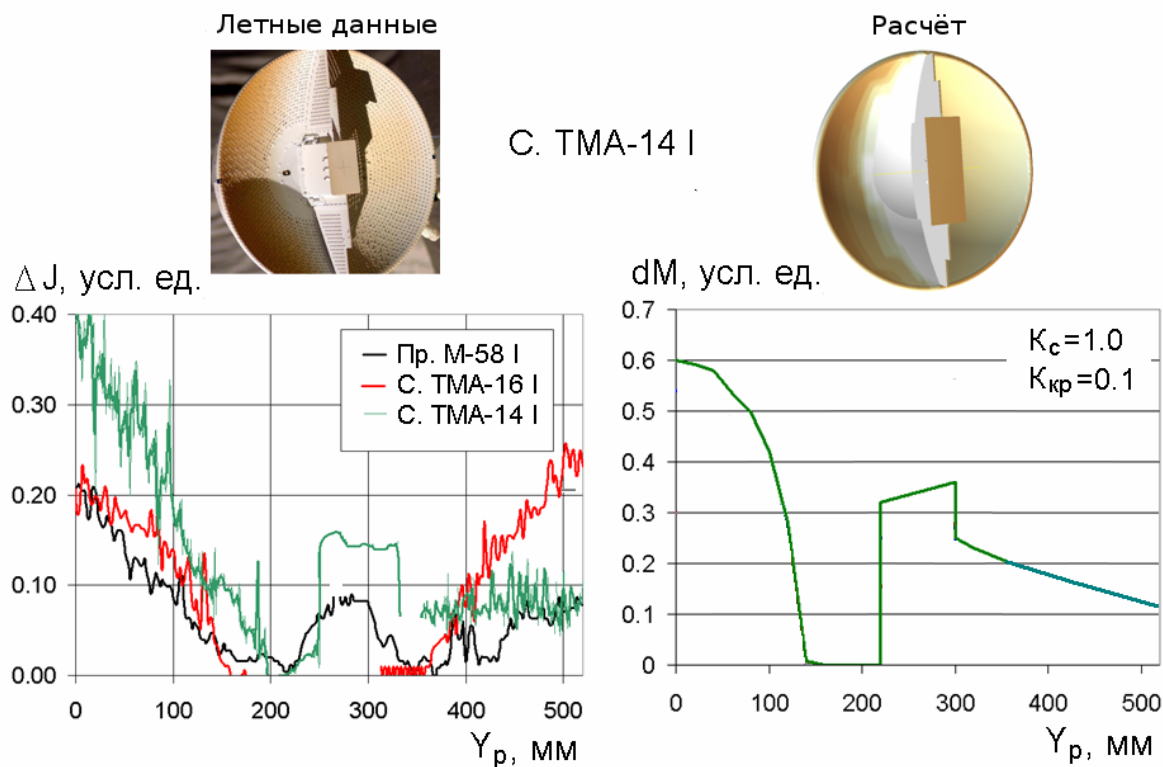


Рис.23

Наблюдается качественное соответствие характера распределения загрязнений dM , с функцией $\Delta J(\theta)$ в верхней части рефлектора $Y_p < 250$ мм (диапазоне углов $\theta = 43^\circ - 55^\circ$), и различие в характере изменения экспериментальной и расчетной функций в нижней части поверхности рефлектора. Это указывает на то, что использованная расчетная модель, не полностью отражает физическую картину процесса выноса молекулярного потока ПНС через дренажные сопла и требует уточнения.

4 Заключение

Проведены исследования загрязняющего воздействия потока продуктов неполного сгорания топлива двигателей ориентации МКС, выносимого через дренажные устройства из негерметичного агрегатного отсека на материалы и покрытия внешних элементов космических объектов. Исследования проведены с использованием оборудования штатной системы контроля загрязнений МКС и фотоизображений транспортных кораблей, полученных в космосе.

Получены зависимости для оперативного мониторинга уровней загрязнения продуктами сгорания топлива реактивных двигателей внешних элементов космических аппаратов.

Проведением численных исследований, получены функции пространственного распределения потоков загрязняющих фракций, вылетающих из сопел дренажных устройств.

Литература

1. Герасимов Ю.И., Крылов А.Н., Ярыгин В.Н. и др. Газодинамические аспекты проблемы загрязнения Международной космической станции. 2. Натурные эксперименты. ТиА, том 10, №4, Новосибирск, 2003.
2. V.E. Skurat, I.O. Leipunsky, A.N. Jigach, N.G. Beriozkina, P.A. Pshechenkov, A.V. Naumkin, I.O. Volkov, V.A. Borisov, S.F. Naumov, S.P. Sokolova, A.I. Kuriljonok, PD-2 Contaminations of Outer Surfaces of International Space Station Studied by Non-Destructive Techniques. ICPMSE-10J, Okinawa, Japan, 12-17 June, 2011 International Space Conference on "Protection of Materials and Structures from the Space Environment"
3. Герасимов Ю.И., Ярыгин И.В. методология исследований в космосе параметров выбросов загрязняющих фракций из двигателей ориентации орбитальных станций, оперативного и после-полетного анализа их результатов. Хим. физика. 2008. Т. 27. № 10, с. 35-43.

Статья поступила в редакцию 7 апреля 2011 г.