

З а щ и т а ОТ РАКЕТНЫХ ВЫХЛОПОВ

Оказывается, даже в вакууме космонавты могут пострадать от токсического воздействия вредных выхлопов двигателей. Какие физические явления лежат в основе происходящих процессов и как защитить космическую станцию от космической грязи? Решение этих проблем потребовало фундаментальных исследований газодинамической структуры течения вакуумных струй

Космический аппарат на орбите необходимо постоянно поддерживать в определенном положении относительно Земли и Солнца. Эта задача решается с помощью системы ориентации, куда входят двигатели управления и ориентации. Сейчас для этих целей применяются жидкостные ракетные двигатели малой тяги, топливом которых являются самовоспламеняющиеся компоненты – амил (азотный тетраоксид) и гептил (несимметричный диметилгидразин).

Высокая температура сгорания топлива (около 3000 °С) требует защиты стенок двигателя и сверхзвукового сопла от продуктов горения, для чего используется пристенная жидкостная пленка из того же топлива (в основном гептила). Двигатели работают в импульсном режиме: при включении сверхзвуковая горячая струя газов, выбрасываемая из сопла, создает тягу для ориентации космического аппарата в заданном положении. Таким образом, работа двигателей ориентации сопровождается периодическим выбросом в космос как сгоревших, так и несгоревших, в том числе капельных, фракций топлива.

Элементы конструкции, оказавшиеся в выхлопном факеле двигателя, подвергаются значительному тепловому, силовому и физико-химическому воздействию. Кроме того, продукты неполного сгорания топлива оседают на поверхности корабля и могут попадать на скафандры космонавтов при выходе их в открытый космос. Из-за токсичности самого топлива они представляют собой большую опасность для людей при попадании их внутрь космического аппарата.

До недавнего времени основное внимание уделялось тепловому и силовому воздействию струй двигателей. Проблема загрязняющего воздействия выхлопных струй впервые возникла при эксплуатации космической станции «Мир» во время проведения эксперимента «Двигон» в 1998 г. Тогда и было установлено наличие загрязнений на различных участках внешней поверхности станции. Однако особое внимание этому вопросу стали уделять после создания Международной космической станции (МКС). Проблема оказалась настолько серьезной, что для космонавтов были разработаны специальные конкретные меры предосторожности при работе в открытом космосе.

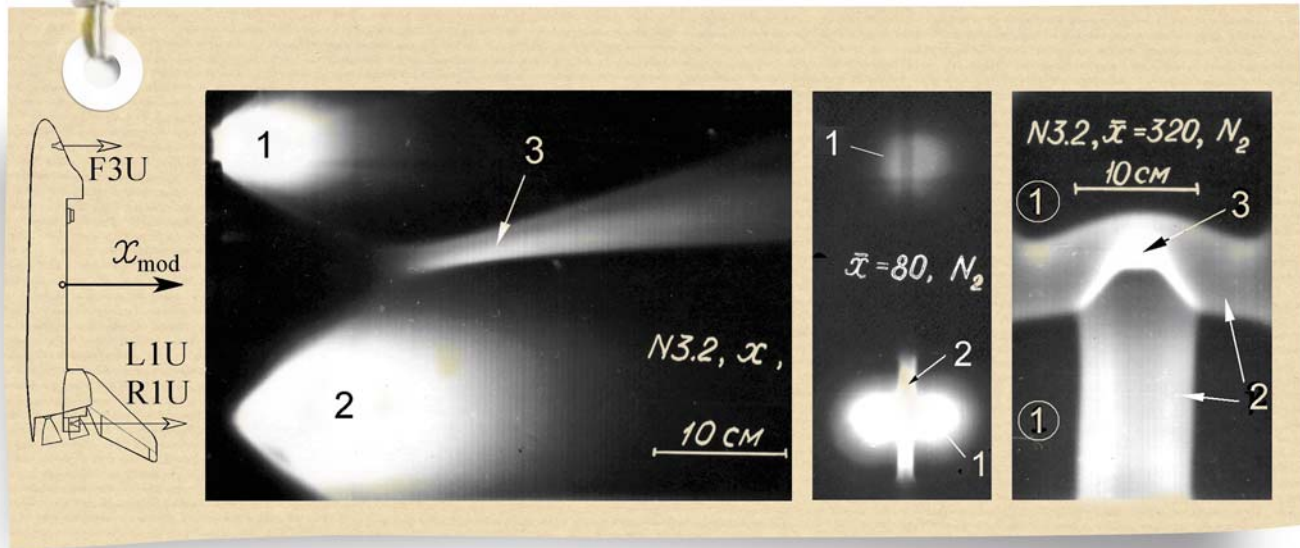
В земном вакууме

Рассчитать теоретически воздействие струй двигателей управления на прилегающие элементы конструкции космического аппарата невозможно – для этого требуется экспериментальное моделирование в вакуумных камерах. К выполнению этих работ в конце 1970-х гг. активно подключился новосибирский Институт теплофизики СО РАН им. С. С. Кутателадзе. Основным заказчиком выступила Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королева.



ЯРЫГИН Вячеслав Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией молекулярной газодинамики Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор 140 печатных работ и 5 патентов

Ключевые слова: МКС, система ориентации, ракетные двигатели, загрязнение, газовые потоки в вакууме, космические эксперименты.
Key words: International Space Station, orientation system, rocket engines, gas streams in vacuum, space experiment



Что такое разреженный газ, и чем он отличается, например, от привычного атмосферного воздуха?

Известно, что воздух состоит из смеси молекул азота и кислорода, которые постоянно движутся и сталкиваются между собой. Путь, проходимый молекулой от одного столкновения до другого, называется длиной свободного пробега молекул. Для воздуха при нормальных условиях (обычном атмосферном давлении и комнатной температуре) эта величина очень мала и составляет примерно $7 \cdot 10^{-8}$ м. Однако на высоте, где летают спутники (300 км от поверхности Земли), она составляет более 1 км!

Поэтому в обычном атмосферном воздухе летательный аппарат размером около 10 м будет испытывать многочисленные столкновения с молекулами воздуха, а на высоте 300 км, соответственно, – очень редкие. Отношение средней длины свободного пробега молекул к характерному размеру тела принято называть числом Кнудсена (Kn). Таким образом, разреженными считаются течения газа, для которых число Kn $\gg 1$, а обычными – при Kn $\ll 1$.

Динамика разреженных газов начала формироваться как самостоятельный крупный раздел физической механики сравнительно недавно – в послевоенные годы под влиянием интересов авиационной и ракетно-космической промышленности. И уже в середине 1960-х гг. в ней выделились новые перспективные направления исследований с практическими приложениями в технологической сфере. Сюда можно отнести изучение релаксационных процессов и их роли в формировании градиентных течений в соплах и струях двигателей, неравновесных химических и плазмохимических реакций, процессов образования и испарения аэрозолей и т. д.

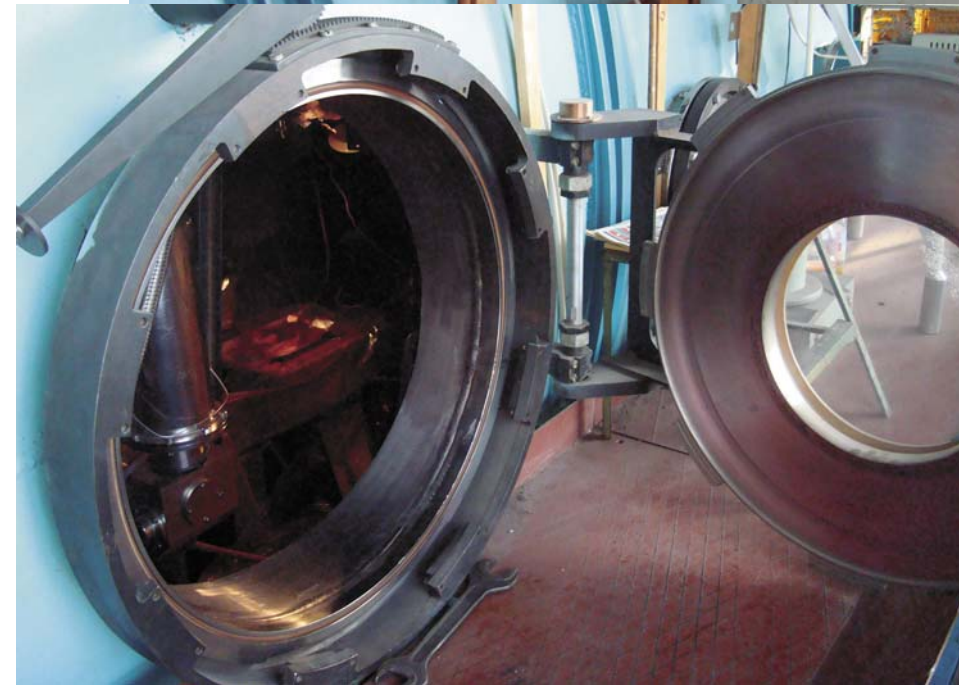
В ИТ СО АН СССР в 1980 г. в модельных экспериментах в вакуумной камере было исследовано истечение газовых струй из сопел управляющих двигателей американского многоразового транспортного космического корабля «Space Shuttle».

Электронно-пучковая визуализация в различных сечениях (яркость пропорциональна плотности газа)

В то же время нужно подчеркнуть, что несмотря на появление новых проблем и задач в связи с бурным освоением воздушно-космического пространства, до сих пор сохранили свое значение и традиционные для динамики разреженных газов направления, занимающиеся проблемами теплофизического и аэрогазодинамического обоснования конструкции летательных аппаратов.

Формирование научной тематики и самих научных коллективов первых институтов Сибирского отделения Академии наук, включая Институт теплофизики, пришлось на время первых космических полетов. При его формировании была поставлена задача создания базы крупномасштабных вакуумных газодинамических установок с широкими функциональными возможностями для развития исследований в этой области.

Уже в 1964 г. вошла в строй первая вакуумная установка ВС-2, на которой были отработаны основные принципиальные вопросы получения и диагностики сверхзвуковых течений разреженного газа. В 1973 г. заработал вакуумный газодинамический комплекс, состоящий из четырех газодинамических стендов различного назначения, включая генератор молекулярного пучка, а в 1985 г. – крупномасштабная вакуумная газодинамическая установка «Викинг» объемом около 150 м³

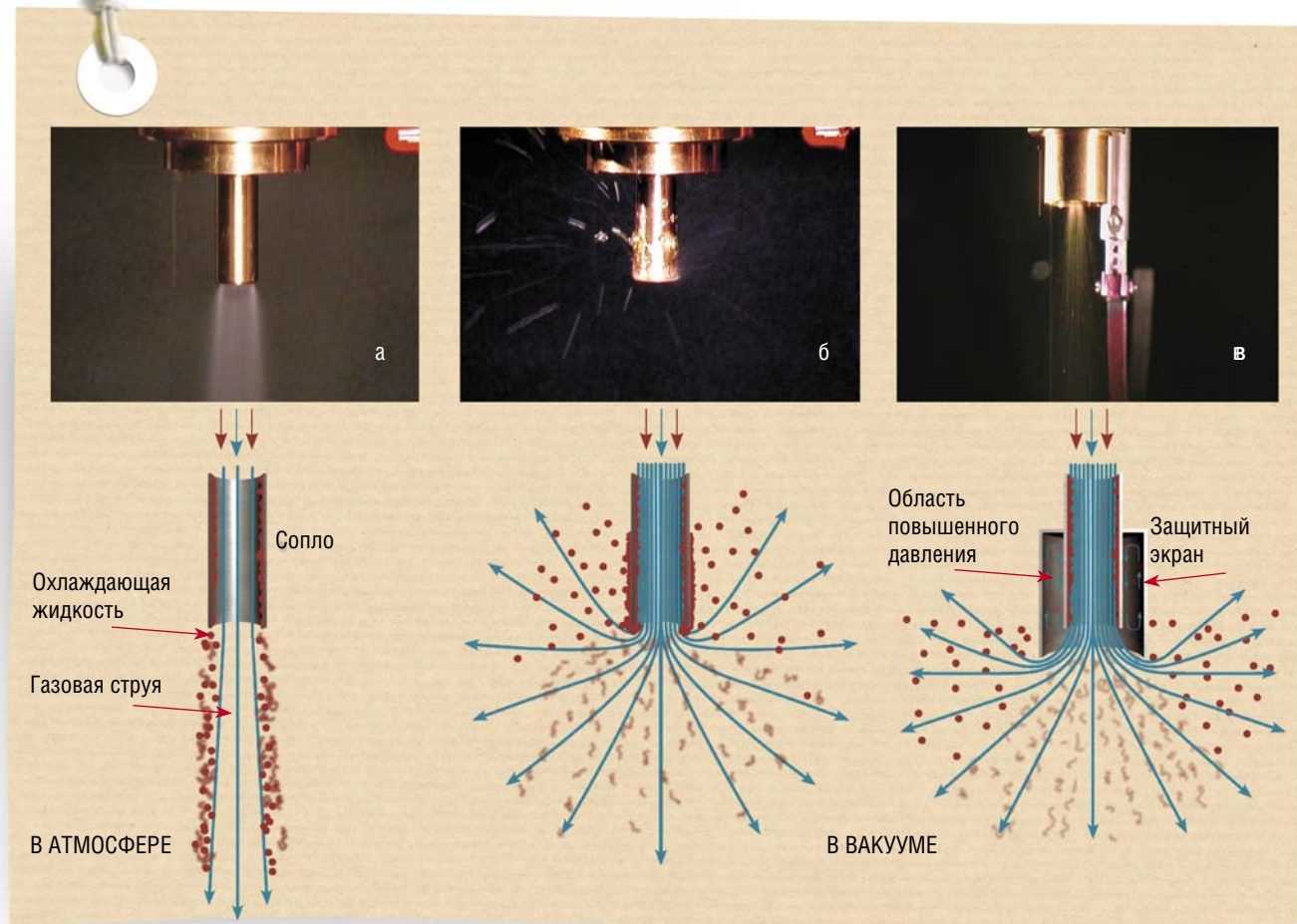


Крупнейшая вакуумная установка «Викинг» Института теплофизики СО РАН имеет диаметр более 4 м и длину около 12 м. Здесь проводят опыты по истечению газа в космический вакуум (давление $P < 10^{-6}$ атм)

Сначала исследования проводились на уже существовавших вакуумных стендах и касались в основном моделирования силового и теплового воздействия факелов двигателей. Основопологающим для модельных экспериментов стал проведенный ранее в институте цикл фундаментальных исследований по влиянию неравновесных процессов на характер сверхзвукового струйного расширения атомарных и молекулярных газов в вакууме.

Оказалось, что при определенных условиях именно неравновесные процессы (такие как гомогенная конденсация и колебательная релаксация) определяют газодинамическую структуру течения вакуумных струй. Этот экспериментально обнаруженный факт и был положен в основу нового подхода к моделированию струй двигателей.

Были успешно проведены исследования по моделированию струй двигателей космических кораблей типа



«Прогресс», модулей орбитальной станции «Мир», ракетно-космического комплекса «Энергия-Буран» и др. Введенная в строй в 1985 г. в ИТ СО АН СССР крупномасштабная вакуумная газодинамическая установка «Викинг» существенно расширила возможности проведения фундаментальных и прикладных исследований в потоках разреженного газа. Именно на этой установке и были впоследствии проведены исследования по загрязнению МКС.

Струя падает назад

Особенность струйного истечения газов и жидкостей из звукового либо сверхзвукового сопла в вакуум состоит в том, что выходящий из сопла газ расширяется во все стороны, в том числе и назад: предельный угол расширения струи относительно оси сопла превышает 90°. Именно такие «обратные» потоки возникают при работе на орбите системы ориентации космических аппаратов. Однако если давление в пространстве, куда истекает струя, равно атмосферному, то никаких обратных потоков не возникает.

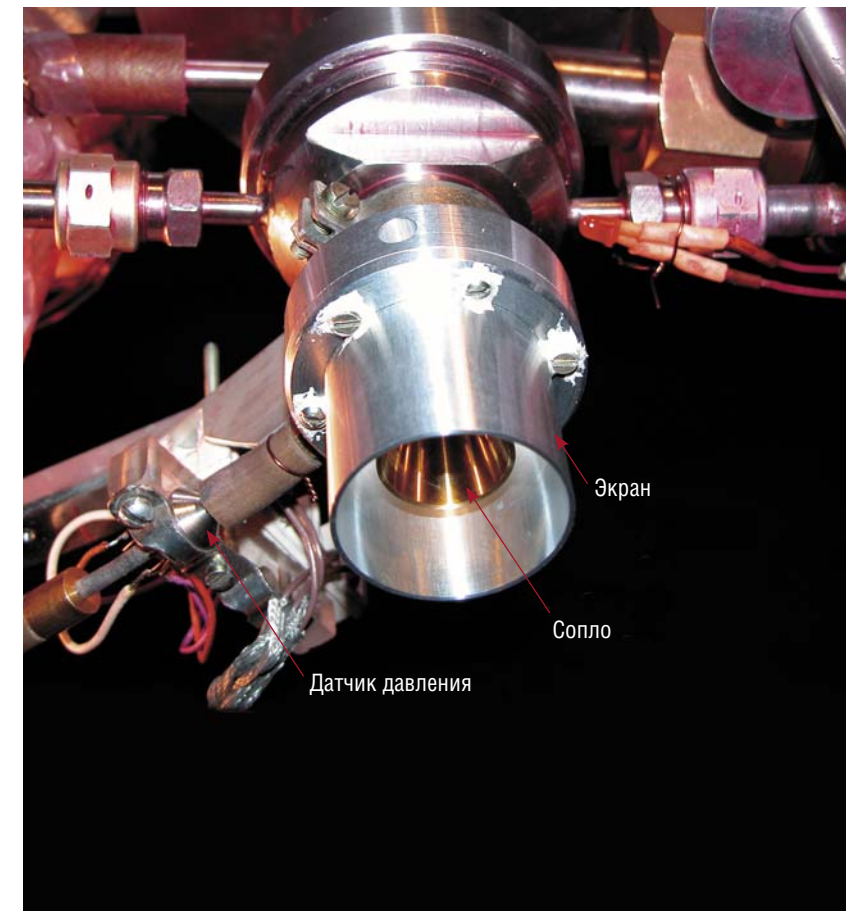
Истечение пристенной пленки охлаждающей жидкости с газовым потоком из сопла двигателя кардинально зависит от давления в окружающей среде.

В атмосфере наблюдается привычная картина: капельки очень слабо отклоняются от направления струи (а), но при истечении в вакуум брызги летят практически во все стороны, загрязняя внешнюю поверхность сопла (б). При наличии же защитного экрана в пространстве между ним и соплом возникает область повышенного давления, препятствующая обратному газожидкостному потоку (в)

Еще более удивительно при истечении в вакуум ведет себя пристенная пленка жидкости, используемая для охлаждения стенок сопла. Для выяснения деталей этого процесса были поставлены эксперименты по совместному истечению газа из трубки с пристенной пленкой жидкости в атмосферных условиях и в вакуум (где давление в миллион раз меньше атмосферного), при этом все остальные параметры экспериментов оставались неизменными.

В проекте Международной космической станции (МКС) участвуют 16 стран. Первый модуль – российский сегмент «Заря» был выведен на орбиту 20 ноября 1998 г., а через два года там появились первые космонавты. Сегодня МКС – это космический аппарат массой 350 т, длиной 58 м, шириной 45 м (с фермами – 73 м) и высотой 27 м. Период обращения вокруг Земли примерно 1,5 часа. В ясную погоду в вечерние и утренние часы ее можно наблюдать невооруженным глазом

Защитные экраны производства РКК «Энергия» были установлены на сопла двигателей системы ориентации служебного модуля Международной космической станции



Результаты экспериментов оказались весьма показательными. При истечении в атмосферу наблюдалась обычная газожидкостная струя, в то время как при истечении в вакуум пристенная пленка на выходной кромке трубки разворачивалась на 180° и начинала двигаться по наружной поверхности трубки в обратном направлении, преодолевая даже действие силы тяжести! Далее пленка распадалась, создавая поток капель на присопловую поверхность.

Столь необычное поведение пристенной пленки жидкости на выходной кромке трубки вызвано наличием вышеупомянутого «обратного» газового потока, который не дает жидкости двигаться вперед, как это имеет место при истечении в атмосферу.

Грязь не пройдет!

Таким образом, относительно простой эксперимент позволил объяснить причину возникновения обратных потоков капель топлива, которые приводят к загрязнению поверхности космической станции при работе двигателей системы ориентации. Дальнейшее, как говорится, было делом техники.

Специалисты института предложили устанавливать на выходную часть сопла двигателей специальные защитные устройства – экраны. Чтобы экспериментально проверить эффективность такой «простой» защиты, исследователям понадобилось создать новые методы диагностики газочапельных потоков в вакууме (такие как визуализация структуры течения, пространственного распределения капель и т.д.).

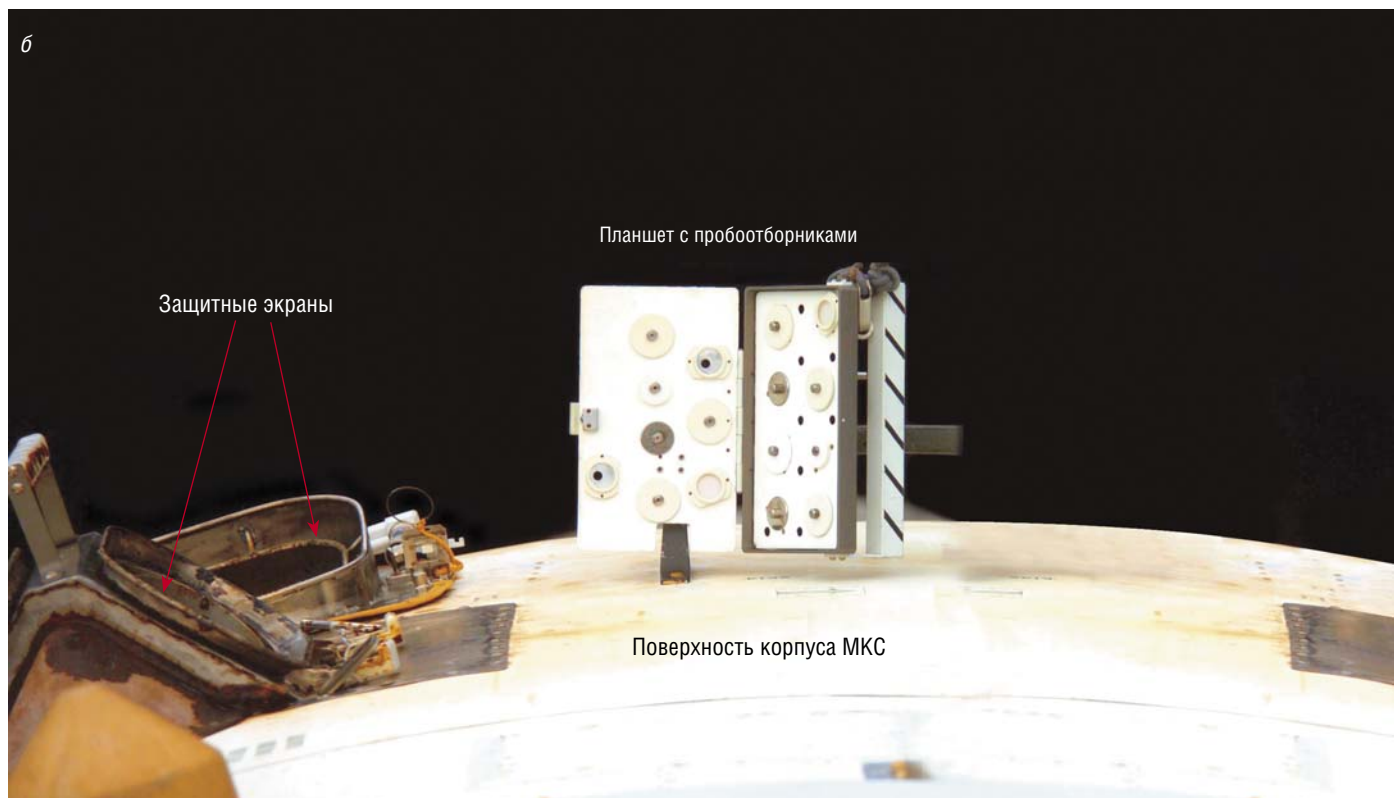
С использованием этих методов был выполнен цикл экспериментальных исследований на установке «Викинг», позволивший обосновать и разработать рекомендации специалистам РКК «Энергия», которые занялись непосредственным проектированием и производством защитных устройств для двигателей различных блоков МКС.

Защитные экраны были доставлены на МКС, где в январе 2002 г. космонавты Ю. Онуфриенко и Д. Берш установили их на двигатели ориентации служебного модуля во время выхода в открытый космос.

Проверка эффективности работы защитных устройств в условиях реального полета стала одной из главных задач космического эксперимента «Кромка-1», стартовавшего на борту МКС еще с середины 2001 г.



В космическом эксперименте «Кромка-1» исследовали влияние защитного экрана на распространение «грязи» (веществ, образующихся при сгорании топлива) вдоль поверхности корпуса МКС: а – до установки экранов; б – после установки экранов на сопла двигателей системы ориентации



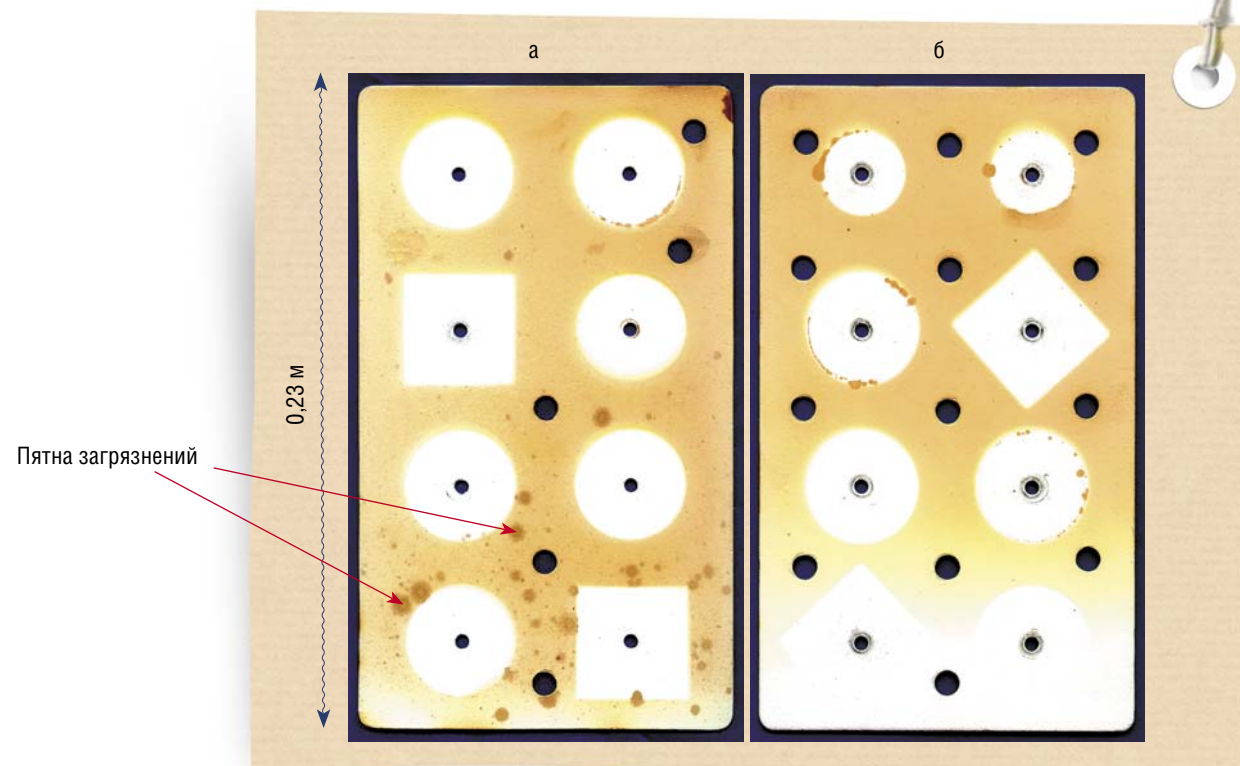
В рамках программы эксперимента вблизи двигателей устанавливались планшеты с образцами различных материалов, на которые и осаждались загрязняющие фракции. Эксперимент был повторен дважды: до установки защитных экранов на сопла и после установки. Затем планшеты были демонтированы и возвращены на Землю для тщательного исследования.

Простое визуальное обследование планшетов показало, что защитные экраны с честью справились с задачей. В нижней части «контрольных» образцов имелись довольно многочисленные следы темных капель, в то время как на планшетах, смонтированных после установки защитных устройств, подобные следы отсутствовали. Дальнейшие исследования планшетов с целью определения химического состава капель и получения количественных данных по загрязнению подтвердили первоначальные выводы.

Таким образом, результаты натурных исследований, проведенных непосредственно в космосе, полностью совпали с результатами модельных экспериментов в вакуумных камерах ИТ СО РАН. И дело не только в успешном решении проблемы загрязнения МКС токсичными выбросами, хотя это очень важно. Многолетние контакты ученых с ведущими специалистами-практиками стимулировали появление новых программ фундаментальных исследований, новых методов диагностики, подтолкнули развитие экспериментальной базы.

А что же космос? В 2013–2016 гг. на МКС планируется новый космический эксперимент «Астра-3» с целью исследования динамики загрязняющего воздействия собственной внешней атмосферы станции на элементы внешних поверхностей, и ИТ СО РАН снова приглашен в нем участвовать.

Эффективность работы защитных экранов на сопла двигателей системы ориентации оценивалась по состоянию планшетов, установленных в непосредственной близости от них на корпусе МКС. Планшеты находились в открытом космосе в течение нескольких месяцев. Оказалось, что нижняя, примыкающая к поверхности корпуса станции сторона планшетов, установленных после монтажа защитных насадок, оставалась практически чистой (б), а при отсутствии экранов она покрывалась пятнами загрязнений. Снимок сделан после возвращения на Землю и отсоединения «пробоотборников»



Литература

Ребров А.К., Ярыгин В.Н. Вакуумная газодинамическая установка с электродуговым подогревом газа // 1967. ТВТ. № 1. С. 182–183.
 Кутателадзе С.С., Ярыгин В.Н., Ребров А.К. Некоторые проблемы молекулярной газодинамики // Вестн. АН СССР. 1984. № 4. С. 79–85.
 Ребров А.К., Ярыгин В.Н. Молекулярная газодинамика и неравновесные процессы // ТИА. 1997. Т. 4, № 2. С. 171–179.
 Gerasimov Yu. I., Yarygin V. N. Problems of Gas-Dynamical and Contaminating Effect of Exhaust Plumes of Orientation Thrusters on Space Vehicles and Space Stations // Proc. 25th Int. Symp. Raref. Gas Dyn. (RGD25). St.-Petersburg, Russia, 2007. P. 805–811.
 Афанасьев И. Коварная «Кромка» // Новости космонавтики. 2004. Т. 14. № 4 (255). С. 15–16.
 Герасимов Ю.И., Мишина Л.В., Приходько В.Г., Ярыгин В.Н. Способ защиты поверхности космического аппарата от загрязнения, образующегося при дренаже гидравлических магистралей и работе ракетных двигателей, и устройство для его осуществления // Патент РФ №2149807 от 24.05.1999.
 Герасимов Ю.И., Крылов А.Н., Соколова С.П. и др. Газодинамические аспекты проблемы загрязнения Международной космической станции. Часть 2. Натурные эксперименты // ТИА. 2003. Т. 10. № 4. С. 575–586