

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РАДИАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЯХ И ПРОГНОЗИРОВАНИИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Часть 2. ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ «КОСМОТЕСТ»

А.С. Смолянский, С.С. Липов, Д.В. Никитин

В настоящее время всё большую актуальность приобретает проблема моделирования воздействия космического вакуума на материалы КА, прогнозирования нежелательных последствий и разработки методов защиты от загрязнения поверхности КА продуктами газовой выделения (ГВ) материалов наружных поверхностей и негерметичных отсеков КА.

Процессы газовой выделения и сублимации материалов в вакууме приводят к образованию около космического аппарата (КА) газового облака, на которое воздействуют гравитационные силы, давление света, сила аэродинамического торможения и т.д. Это облако, в состав которого входят также твердые частицы, отрывающиеся от поверхности аппарата, продукты выхлопа двигателей, газы и твердые частицы, попадающие в космическое пространство из внутренних отсеков КА за счет утечек, при шлюзовании и пр., принято называть собственной внешней атмосферой (СВА) космического аппарата.

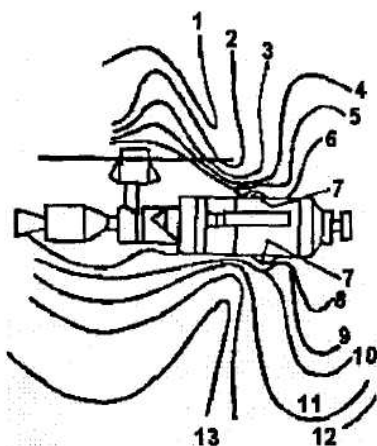


Рисунок 1 – Распределение плотности собственной атмосферы в пространстве около орбитальной космической станции "Скайлэб" в установившемся состоянии, кг/м^3 : 1 - $3 \cdot 10^{-10}$; 2 - $6 \cdot 10^{-10}$; 3 - $1 \cdot 10^{-9}$; 4 - $1,8 \cdot 10^{-9}$; 5 - $3 \cdot 10^{-9}$; 6 - $6 \cdot 10^{-9}$; 7 - $1 \cdot 10^{-8}$; 8 - $6 \cdot 10^{-9}$; 9 - $3 \cdot 10^{-9}$; 10 - $1,8 \cdot 10^{-9}$; 11 - $1 \cdot 10^{-9}$; 12 - $6 \cdot 10^{-10}$; 13 - $3 \cdot 10^{-10}$

Часть газовых частиц СВА возбуждается и ионизуется солнечным ультрафиолетовым излучением и корпускулярными потоками, подобно тому, как это происходит в ионосфере Земли. Из-за наличия СВА давление в непосредственной близости от КА может значительно (иногда на несколько порядков) превышать давление в окружающем космическом пространстве.

Под действием внешних сил облако СВА обычно приобретает вытянутую форму. На низких орбитах основной внешней силой является сила аэродинамического торможения, и облако СВА вытянуто в направлении, противоположном вектору скорости КА. На высотах в десятки тысяч километров и при межпланетных полетах доминирующую роль играют силы давления солнечного света и солнечного ветра. Реальное пространственное распределение плотности СВА в окрестности КА имеет сложный характер и в значительной степени определяется геометрией КА, расположением источников утечки, характеристиками и расположением материалов на поверхности и т.д. На рис. 1 показано распределение плотности СВА в пространстве около орбитальной космической станции (ОКС) "Скайлэб" в установившемся состоянии, когда начальная дегазация станции уже закончилась и нет возмущающих выбросов - выключены двигатели коррекции, закрыты шлюзовые камеры и т.п. Плотность атмосферы Земли на высоте полета станции составляет около $4 \cdot 10^{-12} \text{ кг/м}^3$.

Для американской орбитальной станции "Скайлэб" в установившемся состоянии непрерывные потери массы составляли 10^{-4} кг/с . Из этого количества $2 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$ приходилось на утечки из гермоотсеков (что за сутки составляло 1,7 кг) и 10^{-5} кг/с - на утечки ракетного топлива через клапаны двигателей. Остальные массопотери были обусловлены в основном сублимацией различных неметаллических материалов, которых насчитыва-

лось порядка 200, а суммарная площадь их составляла около 23000 м².

Воздействие СВА на материалы и элементы аппаратуры сводятся в основном к следующим эффектам:

- а) загрязнению поверхности осаждающимися продуктами СВА;
- б) увеличению светового фона в окрестности КА за счет рассеяния света на частицах СВА и люминесцентного свечения;
- в) возрастанию токов утечки в открытых высоковольтных устройствах и снижению их электрической прочности за счет ухудшения вакуума.

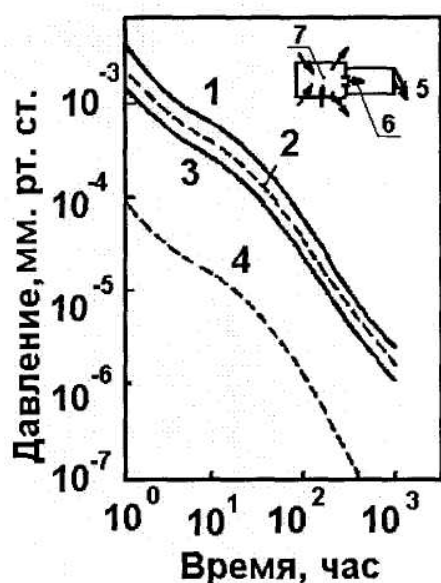


Рисунок 2 – Полное давление в отсеке с измерительной аппаратурой 7 и в районе телескопа 6 при открытом люке 5: 1 - в отсеке 7 с закрытым люком; 2 - в районе телескопа 6, люк закрыт; 3 - в отсеке 7; 4 - в районе телескопа, люк открыт

Загрязнение отрицательно влияет, прежде всего, на оптические поверхности КА: иллюминаторы, линзы телескопов и астронавигационных приборов, а также на солнечные батареи, терморегулирующие покрытия и т.д. Чувствительны к загрязнению и многие другие элементы аппаратуры КА - плазменные зонды, детекторы заряженных частиц малой энергии, коммутирующие устройства и пр.

Осадок продуктов СВА состоит главным образом из органических веществ с высоким молекулярным весом. Источниками таких веществ на КА являются продукты сгорания топлива двигателей, краски, электроизоляционные материалы, резина и т.д.

Загрязнение оптических элементов изменяет их характеристики пропускания и отра-

жения, создает дополнительное рассеяние света на оптических поверхностях [1-6]. Указанные факторы могут приводить к существенному ухудшению параметров оптических приборов и даже к полному выходу приборов из строя, как это, например, произошло с бортовым спектрометром на метеорологическом искусственном спутнике Земли (ИСЗ) "Нимбус-IV".

Во время первого пилотируемого полета к Луне на КА "Аполлон-8" уже через несколько часов после старта было обнаружено загрязнение наружной поверхности иллюминаторов. А на четвертые сутки полета, когда корабль находился уже на окололунной орбите, три из пяти иллюминаторов оказались сильно загрязненными, что мешало наблюдениям.

Подобные явления характерны и для долговременных орбитальных космических станций (ОКС). На некоторых участках поверхности станции "Скайлэб" после 120 суток полета плотность массы осажденных продуктов СВА превышала 50 мкг/см², что соответствует толщине слоя 0,2-0,3 мкм.

Скорость образования загрязняющих пленок от СВА на чувствительных поверхностях, как правило, имеет вид, представленный на рис. 3. Эта зависимость получена с помощью методики кварцевого резонатора во время полета американского ИСЗ "СКАТХА".

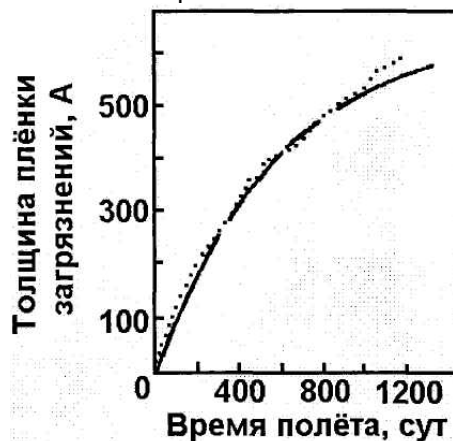


Рисунок 3 – Скорость образования загрязняющих пленок на чувствительных поверхностях под действием собственной атмосферы

Влияние СВА КА на открытые бортовые высоковольтные устройства, для которых космический вакуум служит естественной электроизоляцией, проявляется прежде всего через повышение давления в промежутках между электродами. При этом в высоковольтных промежутках могут происходить электрические пробой, что является аварийным режимом. Но даже если пробой не про-

исходят, в высоковольтных устройствах при ухудшении вакуума увеличиваются токи утечки и возникают кратковременные электрические разряды - так называемые микроразряды, что также нарушает нормальную работу устройств и создает электромагнитные помехи для бортовой электронной аппаратуры. Такие явления наблюдались на ОКС "Скайлэб", особенно в первые дни ее полета, когда скорость газовой выделенности была высока. Отметим, что нарушения в работе высоковольтных и других электротехнических устройств на борту КА могут возникать и за счет осаждения на изоляторы проводящих пленок загрязнений.

Одним из методов защиты чувствительных элементов КА от загрязнения является рациональный выбор материалов КА на стадии проектирования, правильное их сочетание в элементах конструкции КА. Очевидно, получение реалистичных оценок ГВ столь значительного количества материалов (более 200), применяемых в конструкции КА, невозможно без широкомасштабного использования информационных технологий.

Одним из направлений деятельности лаборатории МИККП является проведение исследований и выдача рекомендаций о технической пригодности различных материалов к применению на борту КА.

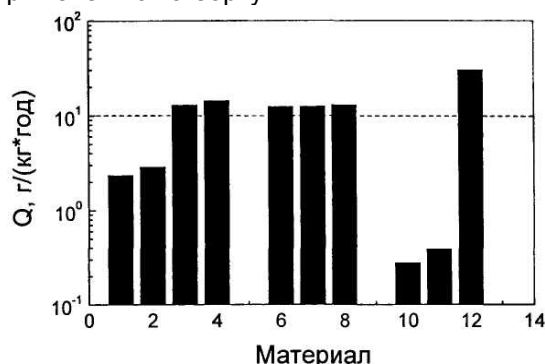


Рисунок 4 – Радиационное газовыделение клеевых материалов в расчете на килограмм материала после одного года эксплуатации на орбите GEO при толщине защиты 0,01 г/см²: 1 - герметик «Эластосил»; 2 - клей БФ-4; 3 - клей ВК-9; 4 - клей ВТ-25-200; 5 - клей ГИПК-2312; 6 - клей К-153; 7 - клей К-300-61; 8 - клей К-400; 9 - клей КВК-68; 10 - клей ПУ-2А; 11 - клей ТМ-60; 12 - клей ХВК-2А; 13 - клей КТ-30. Штриховая линия соответствует максимально допустимой величине радиационного газовыделения, удовлетворяющей требованиям стандарта ASTM E 595-77/84/90

Первый шаг при решении задачи определения величины ГВ (или потерь массы) и со-

става продуктов ГВ материалов, требующих обоснования для использования в КА по критерию ГВ, состоял в установлении химического состава материалов, используемых в КА. Основной вклад в ГВ вносят неметаллические материалы. Как правило, неметаллические материалы, применяемые в конструкции КА, - различные клеи, герметики, полимерные материалы, стеклопластики и т.д., - представляют собой многокомпонентные системы, состоящие из органического связующего, наполнителя, различных технологических добавок (пластификаторы, антипирены, антиоксиданты, стабилизаторы и проч.). Воздействие космического вакуума, ионизирующих излучений стимулирует процессы выделения продуктов радиационной деструкции, "выпотевания" технологических добавок и примесей из матрицы неметаллических материалов. Поэтому для определения величины ГВ и состава продуктов ГВ необходимо наличие максимально достоверной информации о химическом составе и структуре материалов, которые предполагаются использовать в КА.

На втором этапе решения рассматриваемой задачи была произведена оценка термического и радиационно-индуцированного ГВ на основании известных данных о ГВ конкретных материалов, а также данных, полученных при изучении ГВ облученных органических материалов, применяемых в качестве компонентов при изготовлении материалов, требующих получения обоснования для эксплуатации в КА. При проведении моделирования ГВ материалов с использованием известной информации о ГВ компонентов материалов предполагалось: а) наполнитель не влияет на развитие процессов ГВ материала; б) процессы ГВ в различных составляющих материала развиваются независимо друг от друга. В рамках таких условий можно считать, что ГВ материала будет суммой ГВ отдельных его компонентов. Расчеты были проведены для радиационной обстановки, соответствующей пребыванию КА на орбите GEO - это геостационарная орбита, величина среднегодовой дозы, поглощенной материалами КА при толщине защиты 0,01 г/см², составляет 55 Мрад.

Используя данные библиографической БД и БД "Радмат", где содержатся значения радиационно-химических выходов и состава продуктов радиационной деструкции органических материалов, были рассчитаны, с помощью специально составленной программы, величины ГВ материалов в течение года пребывания на орбите. На рис. 4 приведены ре-

зультаты подобных расчетов для ряда клеевых материалов.

В результате сопоставления расчетной величины ГВ с требованиями стандарта ASTM E 595-77/84/90 была осуществлена первичная отбраковка клеевых материалов, рекомендуемых к применению в КА. Было заключено, что материалы №№ 3,4, 6-8, 12 не могут быть рекомендованы к применению в КА из-за высоких потерь массы. Аналогичный анализ был проведен и для других классов материалов.

На третьей стадии анализа был осуществлен прогноз природы продуктов ГВ, способных адсорбироваться на оптических поверхностях КА в процессе орбитального полета. С этой целью был проанализирован состав продуктов радиационного ГВ неметаллических материалов, планируемых к применению на борту КА. Этот анализ был осуществлен с помощью библиографической БД и БД "Радмат". В результате проведенного анализа удалось выделить около 30 веществ, входящих в состав продуктов радиационного ГВ неметаллических материалов. В число рассматриваемых веществ входят водород, оксид и диоксид углерода, метан и проч. Далее, с помощью уравнения Клаузиуса-Клапейрона, были рассчитаны температуры конденсации рассматриваемых веществ в области температур и давлений, соответствующих условиям эксплуатации КА (рис. 5).

Показано, что основными химическими веществами, образующими плёнку загрязнений на чувствительных поверхностях КА, могут быть пластификаторы. На этом основании было предложено исключить из списка материалов, рекомендуемых к применению в КА, химические вещества, содержащие значительные концентрации пластификатора (прежде всего, - это поливинилхлорид (ПВХ)).

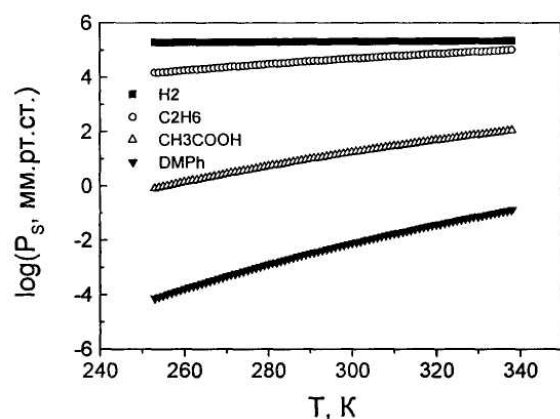


Рисунок 5 – Изменение давления паров водорода, этана, уксусной кислоты и диметилфталата в области температур от -20 до +65°C

С другой стороны было обнаружено, что газообразные продукты радиационной деструкции неметаллических материалов, применяемых на борту КА, практически не конденсируются на поверхности КА. Поэтому был сделан вывод об отсутствии необходимости проведения термовакuumных испытаний рассматриваемых материалов в условиях воздействия ионизирующих излучений.

Таким образом, даже «примитивное» использование информационных «технологий» при анализе материалов, рекомендуемых к применению в КА, позволило осуществить предварительную разбраковку материалов, составить следующие Перечни материалов:

- разрешённых к применению в качестве материалов внешней поверхности и негерметизируемых отсеков КА;
- не рекомендуемых к применению на внешней поверхности и в негерметизируемых отсеках КА;
- требующих проведения дополнительных термовакuumных испытаний с целью установления закономерностей ГВ и обоснования вывода о технической возможности применения на борту КА.

Необходимо отметить высокий экономический эффект (более чем 2 000 000 (Два миллиона) рублей) от применения вновь разрабатываемой методологии анализа материалов космического назначения, основанной на использовании СИС «Космотест». Можно ожидать, что величина итогового экономического эффекта будет ещё более высокой, так как именно загрязнение поверхности КА часто является одной из основных причин, определяющих ресурс КА

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нусинов М.Д. Воздействие и моделирование космического вакуума. – М.: Машиностроение, 1982. – 176 с.
2. Vanderschmidt G.F., Simons J.C. Material Sublimation and Surface Effects in High Vacuum // in: First Symposium. Surface Effects on Spacecraft Materials. Held at Palo Alto, California May 12 and 13, 1959 / ed. by Francis J. Clauss. – New York: John Wiley & sons, Inc., 1960. – P. 247-262.
3. Matacek G.F. Vacuum Volatility of Organic Coatings // in: First Symposium. Surface Effects on Spacecraft Materials. Held at Palo Alto, California May 12 and 13, 1959 / ed. by Francis J. Clauss. – New York: John Wiley & sons, Inc., 1960. – P. 263-285.