

УДК 533.27

В. А. Шувалов¹, В. Г. Тихий², Л. П. Потапович²,
А. И. Приймак¹, Н. И. Письменный¹, Г. С. Кочубей¹

¹Інститут технічної механіки Національної академії наук і Національного космічного агентства України, Дніпропетровськ

²Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпропетровськ

Молекулярное загрязнение поверхностей КА при термостатировании и выведении космической головной части ракеты-носителя на орбиту

Надійшла до редакції 14.04.06

Розроблено розрахунково-експериментальні процедури для інженерних оцінок рівнів чистоти поверхонь і маси молекулярного забруднення КА при термостатуванні космічної головної частини ракети-носія «Дніпро» повітрям високого тиску і на етапі виведення космічної головної частини на орбіту. Показано, що при термостатуванні космічної головної частини повітрям чистоти класу 5000 молекулярне забруднення поверхонь КА відповідає рівням $A/65 \leq \xi \leq A/25$, а на етапі виведення на орбіту маса часток конденсованої фази легких сполук на поверхнях КА за 930 с польоту лежить у межах $0.333 \leq M_{\Sigma} \leq 2.690$ мг/м², що не гірше від рівня чистоти $\xi \leq A/3.6$ за стандартом MIL STD 1246 С.

ВВЕДЕНИЕ

Задача контроля и обеспечения заданного уровня чистоты поверхностей КА актуальна не только для условий эксплуатации на орбите, но и для этапов предстартовой подготовки и выведения космической головной части (КГЧ) ракеты-носителя на орбиту. Задача по сути является составной частью проблемы обеспечения длительной эксплуатации КА.

Есть прямая связь между уровнем молекулярного загрязнения и точностью реализации научно-технических программ, измерений, сроком и качеством функционирования бортовой аппаратуры и систем КА [14]. Молекулярное загрязнение поверхностей КА формируется на этапе наземной подготовки, при выведении и эксплуа-

тации КА на орбите. Загрязнение поверхностей КА на этапах предварительной подготовки, термостатирования и выведения КГЧ на орбиту может существенно изменить термооптические характеристик материалов, элементов конструкций бортовых систем. Следствием этого является ухудшение рабочих характеристик систем терморегулирования, солнечных отражателей и теплового баланса в целом. Загрязнение на поверхности солнечных батарей (СБ) — одна из причин уменьшения электрической мощности СБ; слои молекулярного загрязнения на поверхностях оптических систем вносят погрешности, существенно ослабляют сигналы датчиков — уменьшают сроки активной эксплуатации КА на орбите [12]. Эффективный контроль загрязнения, прогнозирование и обеспечение требуемого

уровня чистоты поверхностей элементов конструкций и бортовых систем является одним из элементов, определяющих ресурс, сроки активной эксплуатации КА на орбите.

Практически нет стандартизованных методик и процедур оценивания уровней молекулярного загрязнения поверхностей КА. Расчетно-экспериментальные оценки, как правило, основаны на интуиции исследователя.

Цель работы — разработать расчетно-экспериментальные процедуры оценки загрязняющего воздействия космической головной части ракеты-носителя «Днепр» на КА при термостатировании и выведения КГЧ на орбиту, дать инженерные оценки уровней чистоты поверхностей КА на основе стандартов MIL STD 1246 C, ECSS-Q-70-01A [13, 14].

СТРУКТУРА КОСМИЧЕСКОЙ ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ «ДНЕПР»

Основными источниками загрязнения поверхностей КА, установленного в КГЧ ракеты-носителя (РН) «Днепр», являются:

- воздух системы термостатирования высокого давления (подается во внутренний объем КГЧ). Вместе с воздухом могут подаваться твердые частицы и масло в виде аэрозолей и паров;
- лакокрасочные покрытия и клеящиеся пленки на внутренних поверхностях головного обтекателя (ГО).

Схема размещения КА и структура КГЧ ракеты-носителя «Днепр» показана на рис. 1.

Для термостатирования КГЧ используется воздух класса чистоты ISO 6.7 по ISO 14644-1 ($N_c \approx 5000$ по FED-STD-209E [13]). Воздух из системы термостатирования подается в ГО распылением через 16 форсунок. Поверхности 5, 6 и 7 КА «омываются» воздухом сверху вниз. Выход термостатирующего воздуха — в нижней части ГО.

Внутренняя поверхность оболочки ГО (диаметр $D = 3000$ мм, $h_1 = 5250$ мм) покрыта эмалью ЭП-525, нанесенной при изготовлении РН около 20 лет назад. Эмаль ЭП-525 — суспензия пигментов Cr_2O_3 в растворе эпоксидной смолы Э-41 и смеси органических растворителей: 50 %-го раствора гексаметилендиамина в

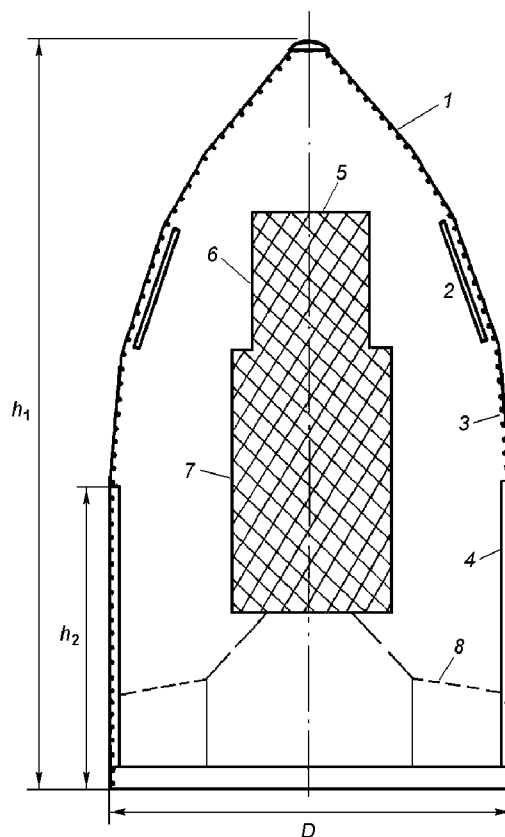


Рис. 1. Структура КГЧ ракеты-носителя «Днепр»: 1 — ГО, 2 — система термостатирования воздухом высокого давления, 3 — эмаль ЭП-525, 4 — «сэндвич», 5, 6, 7 — поверхности КА, 8 — дренажное устройство

этиловом спирте и смеси из ацетона (30 %), ксилола (40 %), бутилацетата (30 %) в этиловом спирте.

В нижней части КГЧ (высота $h_2 = 1380$ мм) на краску нанесена липкая лента марки НИИКАМ-ПМ-ОА-Л, изготовленная на основе металлизированной полиимидной пленки — «сэндвич».

Стравливание воздуха в атмосферу, вакуумирование объема КГЧ в полете осуществляется через дренажные отверстия и дренажное устройство, выполненное из фильтрующего материала марки ФПП-15-1.5(0.6) — слой ультратонких волокон диаметром 1.5 мкм, нанесенных на марлевую подложку из клееного полотна (общая площадь около 1.5 м^2).

МОЛЕКУЛЯРНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ
КА ПРИ ТЕРМОСТАТИРОВАНИИ КОСМИЧЕСКОЙ
ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ

Для термостатирования КГЧ используется воздух класса чистоты $N_c = 5000$ согласно классификации международного стандарта ISO14644-1 и Федерального стандарта США FED STD 209E. Предельное содержание частиц в 1 м^3 воздуха может быть определено по формуле [14]

$$N_{\text{пр}} = 35.31 N_c (0.5 \text{ мкм} / r)^{2.2}, \quad (1)$$

где N_c — класс чистоты воздуха, r — размер частиц в мкм.

В работе [14] установлено, что число частиц размером не менее r , осевших на 0.1 м^2 площади за время t (сут) при нормальном падении, равно $N = c p N_c^\beta t$, где $N_c = N_c (0.5 \text{ мкм} / r)^{2.2}$, $c = 1.076$, p — функция скорости потока воздуха, β — показатель степени.

Для оценки уровня чистоты поверхности X_1 (согласно классификации MIL STD 1246C) как функции числа частиц, осевших на горизонтальную плоскость $\theta = 0^\circ$ (θ — угол между внутренней нормалью к элементу поверхности \mathbf{n} и вектором скорости потока термостатирующего воздуха \mathbf{U}_∞), и времени t может быть использовано соотношение [14]

$$\lg N(r) = 0.926 \lg(r X_1) \lg(X_1 / r) + \lg(\lg X_1 / \lg r). \quad (2)$$

При скорости потока воздуха $U_\infty \geq 0.45 \text{ м/с}$ принято $p = 578$. Для РН «Днепр» $U_\infty \geq 3.5 \text{ м/с}$, для РН «Зенит» — от 1.5 до 2.0 м/с. Для частиц размером $R \geq 5 \text{ мкм}$ в работе [14] получена эмпирическая оценка $\beta = 0.773$. С другой стороны, согласно [13] число частиц, осевших на единицу площади за $t = 1$ сут для $N_c = 100 \dots 10000$ пропорционально $0.069 N_c^{0.72}$ ($\beta = 0.72$).

Расчет значений X_1 ($r, t = 1, p = 578$) показал, что при неопределенности выбора β между 0.72 и 0.773 погрешность величины X_1 не превышает 5 %.

Влияние угла атаки θ иллюстрирует рис. 2. Значение $\theta = 0$ соответствует горизонтальной плоскости, $\theta = 90^\circ$ характеризует обтекание вертикальной, а $\theta = 180^\circ$ — подветренной поверхности. Представленная на рис. 2 зависимость

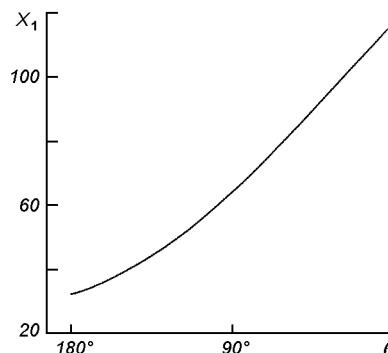


Рис. 2. Зависимость уровня чистоты X_1 элемента обтекаемой поверхности КА от угла атаки θ в потоке термостатирующего воздуха класса чистоты $N_c = 5000$

$X_1(\theta)$ свидетельствует, что наихудший уровень чистоты поверхности КА при термостатировании КГЧ РН «Днепр» потоком воздуха класса чистоты $N_c = 5000$ равен $X_1 \approx 120$.

В соответствии с MIL STD 1246C число частиц, осевших на единицу площади поверхности (0.1 м^2) за сутки, может быть определено из соотношения (2) при $t = 1$ сут, толщина слоя загрязнения, сформированного частицами размера $r_i \leq r \leq r_{i+1}$ — по формуле

$$l_\Sigma = \int_0^\infty n(r) \frac{\pi r^3}{6} dr \approx \frac{1}{6} \sum_{i=0}^{k-1} \pi \left(\frac{r_i + r_{i+1}}{2} \right)^3 \int_{r_i}^{r_{i+1}} n(r) dr = \\ = \frac{1}{6} \sum_{i=0}^{k-1} \pi \left(\frac{r_i + r_{i+1}}{2} \right)^3 N(r_i \leq r \leq r_{i+1}) = \sum_{i=0}^{k-1} l_i, \quad (3)$$

а фактор загрязнения OF ($\text{мм}^2/\text{м}^2$) — площадь единицы поверхности, покрытой частицами размера $r_i \leq r \leq r_{i+1}$, — из соотношения

$$OF = \int_0^\infty n(r) \frac{\pi r^2}{4} dr = \\ = \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\pi (r_i + r_{i+1})^2}{4} N(r_i \leq r \leq r_{i+1}) = \sum_{i=0}^{k-1} S_i, \quad (4)$$

где $n(r)$, м^{-3} — плотность вероятности того, что частица имеет размер r , $N(r_1 \leq r \leq r_2)$, м^{-2} — число частиц с размерами между r_1 и r_2 на единицу поверхности, l_i , нм — толщина слоя

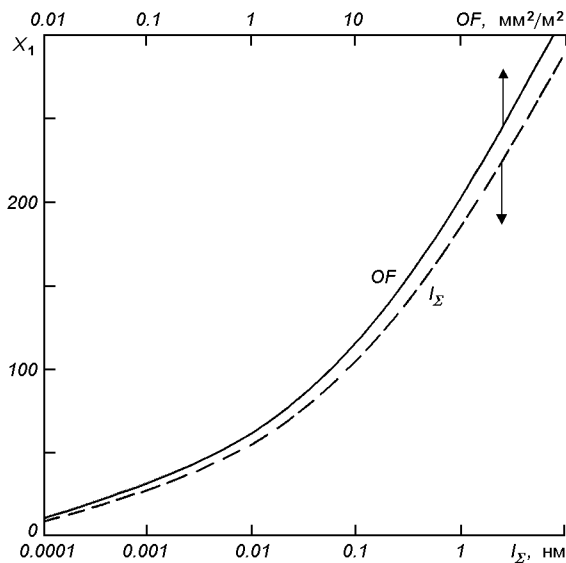


Рис. 3. Расчетные зависимости фактора загрязнения поверхности космического аппарата OF и толщины слоя загрязнения l_Σ от уровня чистоты X_1

загрязнения, сформированного частицами размера $r_i \leq r \leq r_{i+1}$, l_Σ , нм — толщина слоя загрязнения, сформированного частицами всех размеров (k сортов), S_i , мм²/м² — площадь покрытия частицами размера $r_i \leq r \leq r_{i+1}$.

Масса загрязнения M_Σ , кг/м² на обтекаемой поверхности определится по формуле

$$M_\Sigma = \rho l_\Sigma, \quad (5)$$

где ρ , кг/м³ — плотность осевшего вещества.

Расчетные зависимости $OF(X_1)$ и $l_\Sigma(X_1)$ для $r_i = 0.001 \dots 1000$ мкм представлены на рис. 3. Значения $M_\Sigma(X_1)$ при $\rho = 0.9$ г/см³ (масло), а также уровни молекулярного загрязнения A по MIL STD 1246C [14] приведены на рис. 4. Уровню чистоты поверхности $X_1 \approx 120$ ($t = 1$ сут, $\theta = 0$, масло) соответствует уровень молекулярного загрязнения по MIL STD 1246C — $A/65$: $M_\Sigma \approx 0.16$ мг/м², $l_\Sigma \approx 0.18$ нм, $OF \approx 11.7$ мм²/м².

С другой стороны по формуле [13] упрощенные оценки для воздуха класса чистоты $N_c = 5000$ дают значение $OF \approx 0.069 N_c^{0.72} \approx 31.8$ мм²/м², что соответствует уровню чистоты поверхности $X_1 \approx 150$ и толщине слоя

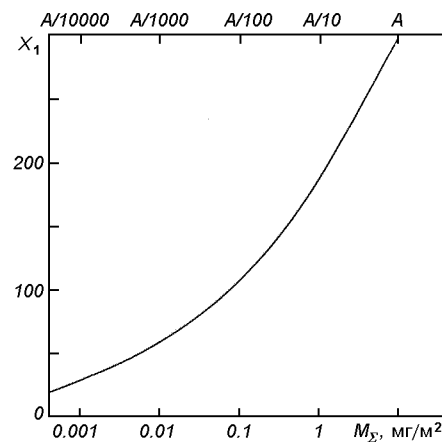


Рис. 4. Зависимость массы слоя загрязнения M_Σ и уровней молекулярного загрязнения A (по MILSTD1246C) от уровня чистоты поверхности X_1

загрязнения $l_\Sigma \approx 0.43$ нм, массе слоя загрязнения $M_\Sigma \approx 0.4$ мг/м² (масло) и уровню $A/25$ молекулярного загрязнения MIL STD 1246C [14] (рис. 3 и 4).

Таким образом, применение процедур, основанных на MIL STD 1246C [13, 14], дает предельные значения для уровня чистоты поверхности $120 \leq X_1 \leq 150$; толщины слоя загрязнения $0.18 \leq l_\Sigma \leq 0.43$ нм, массы загрязнения (масло) $0.16 \leq M_\Sigma \leq 0.4$ мг/м², что соответствует уровню молекулярного загрязнения поверхностей КА $A/65 \leq \xi \leq A/25$ при термостатировании КГЧ воздухом класса чистоты $N_c = 5000$.

Измерения на орбите свидетельствуют, что слой загрязнения $l_\Sigma \leq 1.5$ нм вызывает пренебрежимо малые изменения коэффициентов пропускания и отражения в диапазоне длин волн λ_γ от 0.28 до 2.0 мкм [6].

Наличие тонких пленок молекулярного загрязнения $l_\Sigma \approx 10$ нм (уровень A) дает пренебрежимо малый эффект для поверхностей теплового контроля и солнечных батарей КА [12, 14]. Оптические поверхности более восприимчивы к загрязнению. Молекулярное загрязнение осаждается не в виде отдельного слоя, а в виде отдельных молекул, кластеров, молекулярных образований. Это характерно по крайней мере

для первых 100 монослоев ($l_{\Sigma} < 10$ нм). Если молекулы, кластеры непрозрачны в оптическом диапазоне длин волн (например масло), то преобладающим эффектом для потери потока энергии электромагнитного излучения является рассеяние, особенно для видимого и УФ-диапазонов ($\lambda_v = 0.2...0.7$ мкм, где λ_v — длина волны электромагнитного излучения).

Для рассеяния на частицах характерны три области [7].

1. Коротковолновая, когда размер частицы r много больше длины волны электромагнитного излучения (приближение геометрической оптики, $r/\lambda_v \gg 1.0$). В этом случае

$$\frac{\Pi_r}{\Pi_i} \sim \frac{\sigma}{\sigma_m} \approx 1.0,$$

где Π_r — плотность потока рассеянной энергии электромагнитного излучения, Π_i — плотность потока падающей энергии, σ — эффективный поперечник рассеяния электромагнитного излучения частицей (ЭПР), $\sigma_m = \pi r^2/4$ — геометрическое приближение ЭПР частицы (сфера).

2. Резонансная область рассеяния, когда размер частицы сравним с длиной волны ($r/\lambda_v \approx 1$). Для сферы

$$\Pi_r/\Pi_i \sim \sigma/\sigma_m \approx U(r/\lambda_v),$$

где $U(r/\lambda_v)$ — осциллирующая функция, принимающая значения от 10^{-4} до 3.6, когда $0.1 \leq r/\lambda_v < 4$ [7, 14].

3. Длинноволновая область (рэлеевское рассеяние), когда $r/\lambda_v \ll 1.0$

$$\Pi_r/\Pi_i \sim \sigma/\sigma_m \approx 9(\pi r/\lambda_v)^4.$$

Для частиц с характерным размером r от 0.1 до 1000 мкм в видимой и УФ-части спектра реализуется коротковолновое рассеяние (приближение геометрической оптики). Для частиц размером от 0.001 до 0.01 мкм в оптическом диапазоне длин волн — рэлеевское (длинноволновое) рассеяние.

Фильтр тонкой очистки системы термостатирования воздухом высокого давления с эффективностью 99.99999 % экранирует термостатируемый объем КГЧ РН «Днепр» от частиц размером $r \geq 0.01$ мкм. Молекулярное загрязнение формируют частицы размером от 0.001 до

0.01 мкм. Для этих частиц при $t = 1$ сут из выражений (4) и (5) следует $l_{\Sigma} \leq 6.4 \cdot 10^{-6}$ нм и $M_{\Sigma} \leq 5.8 \cdot 10^{-6}$ мг/м² (масло). Максимальные потери потока энергии электромагнитного излучения видимого и УФ-спектров ($0.2 \leq \lambda_v \leq 1.0$ мкм) меньше чем 0.0055, т. е. молекулярным загрязнением такого уровня на оптических поверхностях КА можно пренебречь.

МОЛЕКУЛЯРНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ КА ПРИ ВЫВЕДЕНИИ КОСМИЧЕСКОЙ ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ НА ОРБИТУ

В полете при выведении КГЧ на орбиту оболочка ГО нагревается до температуры около 130°. Расчетная циклограмма изменения температуры оболочки ГО за 930 с полета представлена на рис. 5 (кривая 1). Динамику процессов в объеме КГЧ характеризуют два явления: газовыделение летучих компонентов при термической деструкции лакокрасочных и органических материалов и покрытий внутренних поверхностей КГЧ и вакуумирование объема через дренажную систему и негерметичности отсеков ГО. Процедура физического моделирования динамики процесса газовой выделенности в объеме КГЧ включает несколько этапов — моделирование динамики изменения давления, исследование процессов потери массы органическими материалами КГЧ вследствие их термической деструкции и конденсация летучих фракций на холодных поверхностях КА.

Условиями физического моделирования процессов газовой выделенности в объеме КГЧ и термической деструкции органических материалов являются следующие.

1. $P_0^{(H)} \approx P_0^{(M)}$ — равенство давлений в объеме в момент начала процесса термической деструкции органических материалов.

2. $T_W^{(H)}(t_H) \approx T_W^{(M)}(t_M)$ — равенство температур оболочки ГО (Al) в полете и металлической подложки образца (Al) в модельном эксперименте.

3. $V_p^{(M)}/V_{0\Sigma}^{(M)} \approx V_{ГЧ}^{(H)}/V_{0\infty}^{(H)}$ — равенство относительного рабочего объема $V_p^{(M)}$ к объему ресивера $V_{0\Sigma}^{(M)}$ (бустерная емкость) в модельном эксперименте (индекс «М») и объема КГЧ — $V_{ГЧ}^{(H)}$ к объему пространства $V_{0\infty}^{(H)}$, прилегающего к КГЧ

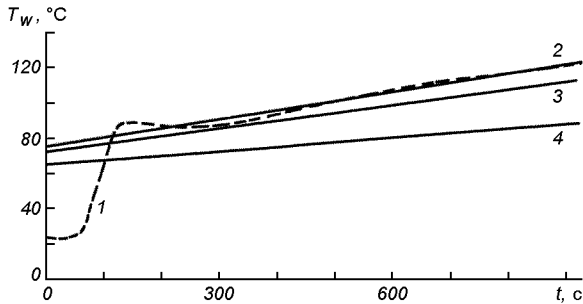


Рис. 5. Температурные циклограммы материалов КГЧ за 930 с: 1 — ГО, 2 — подложка (Al), 3 — эмаль ЭП-525, 4 — липкая лента НИИКАМП-ПМ-ОА-Л (образец «сэндвич»)

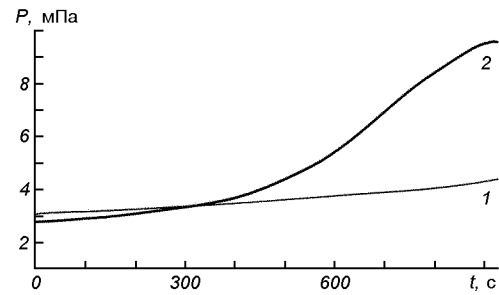


Рис. 6. Изменение парциального давления летучих компонентов продуктов термодеструкции органических материалов в условиях модельного эксперимента: 1 — эмаль ЭП-525, 2 — «сэндвич»

в условиях полета (индекс «Н»).

4. $g_M(t_M) \approx g_H(t_H)$ — равенство удельных потоков газовой фазы, испаряющейся в единицу времени с единицы поверхности при термодеструкции органических материалов.

Экспериментальные исследования проводились на плазмогазодинамическом стенде ИТМ. Образцы испытываемых материалов размером 65×65 мм — эмаль ЭП-525 на алюминиевой подложке и «сэндвич» закрепляли на поверхности термостата с омическим подогревом, помещенного в вакуумированный отсек объемом $V_p^{(M)} \approx 0.0144$ мм³. Отсек посредством вакуумпровода соединен с ресивером (бустерная емкость) объемом $V_{0\Sigma}^{(M)} \approx 7.5$ м³. В ресивере с помощью высокопроизводительной безмасляной системы откачки поддерживалось постоянное давление на уровне 100 мкПа.

Испытываемые образцы дренированы миниатюрными термопарами хромель-копель диаметром около 0.1 мм.

На рис. 5 представлены циклограммы изменения температур компонентов образцов за 930 с. Кривая 2 — циклограмма $T_w^{(M)}(t_M)$ алюминиевой подложки образца, 3 — эмаль ЭП-525, 4 — пленка НИИКАМП-ПМ-ОА-Л (образец «сэндвич»). Приведенные циклограммы изменения температуры образцов свидетельствуют, что условие 2 выполняется при $t \geq 200$ с ($t_H = t_M$). Условие 3 выполняется, если принять, что линейные размеры пространства, прилегающего к КГЧ $V_{ГЧ}^{(H)} \approx 20.28$ м³, на порядок превосходят линейные размеры ГО. По оценкам изменения

давления воздуха в объеме КГЧ в полете и результатам измерения парциальных давлений в модельном эксперименте (рис. 6) началу процесса газовыделения (вследствие термодеструкции органических материалов) соответствует $P_0^{(H)} \approx P_0^{(M)} \sim 3$ мПа ($t_{0M} \approx 200$ с).

Из условия равенства удельных потоков массы материала, испаряющегося за время Δt в модельном эксперименте и в полете, следует

$$Q_H = Q_M \frac{A_H \cdot \Delta t_H}{A_M \cdot \Delta t_M}$$

Здесь Q_j — поток продуктов газовой фазы испаряющегося материала ($j = H, M$), A_H, A_M — площади покрытия поверхности КГЧ и образца соответственно. С учетом условия для проводимости вакуумпровода [10]: $U_H = Q_H / \Delta P_H$ или $U_H = Q_H / P_H$ ($P_H \gg P_{0\Sigma}$, $P_{0\Sigma}$ — давление в бустерной емкости или окружающем КГЧ пространстве) следует

$$P_H = \frac{Q_H}{U_H} \approx P_M \frac{U_M}{U_H} \cdot \frac{A_H}{A_M} \cdot \frac{\Delta t_H}{\Delta t_M}$$

Для давления в объеме КГЧ с учетом неоднородности покрытия внутренних поверхностей ГО получим

$$P_\Sigma^{(H)} \approx \left(P_{кр}^{(M)} \cdot \frac{A_{кр}^{(H)}}{A_{кр}^{(M)}} + P_{сд}^{(M)} \cdot \frac{A_{сд}^{(H)}}{A_{сд}^{(M)}} \right) \cdot \frac{U_M}{U_H} \cdot \frac{\Delta t_H}{\Delta t_M}$$

или

$$P_\Sigma^{(H)} \approx \gamma_{кр} \cdot P_{кр}^{(M)} + \gamma_{сд} \cdot P_{сд}^{(M)}, \quad (6)$$

где

$$\gamma_{\text{кр}} = \frac{U_M}{U_H} \cdot \frac{A_{\text{кр}}^{(H)}}{A_{\text{кр}}^{(M)}} \cdot \frac{\Delta t_H}{\Delta t_M},$$

$$\gamma_{\text{сд}} = \frac{U_M}{U_H} \cdot \frac{A_{\text{сд}}^{(H)}}{A_{\text{сд}}^{(M)}} \cdot \frac{\Delta t_H}{\Delta t_M},$$

индексы «кр» и «сд» относятся к покрытию из эмали ЭП-525 и покрытию «сэндвич». При выполнении четырех условий моделирования соотношение (6) характеризует динамику изменения давления в объеме КГЧ при термодеструкции органических материалов внутренних поверхностей ГО в полете.

Оценки $P_{\Sigma}^{(H)}$ проведены для вязкостного и молекулярного (как предельных) режимов вакуумирования объема КГЧ. Величина U_M определена опытным путем по контролируемому натекающему азота в рабочий отсек методом постоянного давления [4, 10] — $U_M \approx 0.0309 \text{ м}^3/\text{с}$. Проводимость КГЧ U_H определялась как сумма проводимостей дренажных отверстий ГО и устройства 8 на рис. 1: $U_H \approx \mu_{\text{др}} U_{\text{др}} + \mu_{\text{ф}} U_{\text{ф}}$. Для перепада давления на фильтре $\Delta P \leq 5.8 \text{ Па}$ коэффициент расхода принят равным $\mu_{\text{ф}} \approx 0.0032$. Для дренажных отверстий и щелей КГЧ $\mu_{\text{др}} \approx 1.0$. Оценки выполнены для средних за $\Delta t \approx 930 \text{ с}$ значений парциальных давлений в модельном эксперименте $P_{\text{кр}}^{(M)} \approx 3.76 \text{ мПа}$ и $P_{\text{сд}}^{(M)} \approx 5.72 \text{ мПа}$ (рис. 6). При $A_{\text{кр}}^{(H)} \approx 22.5 \text{ м}^2$ и $A_{\text{сд}}^{(H)} \approx 13.0 \text{ м}^2$ условиям модельного эксперимента соответствует среднее суммарное давление в КГЧ $P_{\Sigma}^{(H)} \approx 0.389 \text{ Па}$ за $\Delta t \approx 930 \text{ с}$.

Основными компонентами газовой смеси, образующейся при нагревании отвержденных эпоксидных и фенольных смол до температуры 102 и 132 °С, являются тяжелые углеводороды с массовыми числами $m \approx 80, 82$ и 84 [1, 11]. Поэтому при расчетах $\lambda_{\text{ср}}$ использовались значения критического диаметра молекул тяжелых углеводородов из [5, 9]. Экспериментальные исследования общей потери массы образцов органических материалов и массы конденсированной фазы (КФ) летучих соединений газовой выделения проводились с применением методик и требований стандарта ECSS-Q-70-01A [13].

Для снижения уровня газовой выделения на практике проводится термовакуумная обработка (ТВО) узлов КГЧ — экспозиция при температуре +60° в течение 48 ч. В модельном экспери-

менте ТВО включала экспозицию испытываемых образцов в течение 48 ч при температуре +60° и давлении 1 мПа.

Доля конденсируемой фазы продуктов газовой выделения эмали ЭП-525 составила: без ТВО — 0.024 % или $\mu_{\text{кф}} \approx 22.08 \text{ мг/м}^2$ и 0.02 % после ТВО ($\mu_{\text{кф}} \approx 18.41 \text{ мг/м}^2$). Для покрытия «сэндвич» соответственно — 0.114 % без ТВО ($\mu_{\text{кф}} \approx 95.17 \text{ мг/м}^2$) и 0.062 % после ТВО ($\mu_{\text{кф}} \approx 53.66 \text{ мг/м}^2$). Согласно стандарту ECSS-Q-70-01A уровень КФ из материалов для космического применения не должен превышать 0.1 %. Приведенные данные по сути характеризуют минимальные и максимальные плотности потоков КФ с поверхности КГЧ.

При среднем давлении в рабочем объеме КГЧ $P_{\Sigma}^{(H)} \approx 0.389 \text{ Па}$ для характерных размеров элементов конструкции КА и ГО рис. 1 (нижний параллелепипед — высота 1.8 м, в основании квадрат со стороной 1.1 м; верхний параллелепипед — высота 0.97 м, в основании квадрат со стороной 0.9 м; расстояние между стенками ГО и поверхностями КА около 0.95 м) число Кнудсена принимает значения $0.001 \leq \text{Kn} \leq 0.1$. Согласно [3] это соответствует режиму течения со скольжением — диффузной модели переноса частиц КФ в объеме КГЧ.

Для приближенной оценки осаждения потоков КФ газовой выделения органических материалов КГЧ на поверхности КА может быть использовано решение задачи о диффузии потока частиц через слой вещества толщиной L (воздух между стенками ГО и поверхностями КА) [2, 8]. Предполагается, что частицы КФ рассеиваются только внутри слоя воздуха, а отклоненный поток уходит из рассматриваемого объема вследствие соударений КФ с молекулами воздуха. Реализуется стационарный режим.

Масса частиц КФ, осевших на поверхности 5, 6, 7 (рис. 1) КА площадью A_i за время Δt при термодесорбции их с поверхности КГЧ площадью A_k , определится выражением

$$M_{\Sigma_i} = \frac{\sum M_k^{(\text{КФ})} A_k}{A_i} f_i(\text{Kn}_i), \quad (7)$$

где $M_k^{(\text{КФ})}$ — поток массы КФ продуктов газовой выделения с поверхности КГЧ площадью A_k за $\Delta t \approx 930 \text{ с}$.

В приближении плоского слоя толщиной L для функции $f_i(Kn_i)$ могут быть использованы решения [2]

$$f_{1i}(Kn_i) = \frac{1}{1 + Kn_i^{-1}} = \frac{1}{1 + L_i/\lambda_{кФ}} \quad (8)$$

или

$$f_{2i}(Kn_i) = \frac{1}{1 + \frac{4}{15} \frac{1}{BKn_i}} = \frac{1}{1 + 0.316L_i/\lambda_{кФ}}, \quad (9)$$

где $B = 38/45$ для многоатомных молекул КФ [8].

В приближении цилиндрического слоя между стенками ГО и поверхностями КА решение для функции $f_i(Kn_i)$ может быть представлено в виде [8]

$$f_{3i}(Kn_i) = \frac{1}{1 + 4/(15BKn_i) \ln R_K^{(\GammaЧ)}/R_i^{(КА)}} \approx \frac{1}{1 + 0.316 \lambda_{кФ}/R_i^{КА} \ln R_K^{(\GammaЧ)}/R_i^{(КА)}}. \quad (10)$$

Здесь $R_i^{(КА)}$ — характерный размер облучаемого элемента конструкции КА, $R_K^{(\GammaЧ)}$ — характерный размер облучающего элемента конструкции КГЧ. Предполагается, что $R_i^{(КА)} < R_K^{(\GammaЧ)}$ и $T_W^{(КА)} < T_W^{(\GammaЧ)}$. Рассчитанные с использованием формул (7)—(10) значения массы частиц КФ, осевших на поверхностях 5, 6, 7 КА (рис. 1) за 930 с при выведении КГЧ на орбиту приведены в таблице.

При расчетах в $f_{3i}(Kn_i)$ для $R_i^{(КА)}$ использовались значения эквивалентных радиусов — оснований элементов конструкции КА (верхнего и нижнего параллелепипедов).

Приведенные в таблице значения $M_{\Sigma i}$ свидетельствуют, что максимальные и минимальные

Масса M_{Σ} частиц КФ, осевших на поверхностях КА за 930 с при выведении КГЧ на орбиту

i	$M_{\Sigma i}, \text{ мг/м}^2$					
	$i = 5$		$i = 6$		$i = 7$	
	min	max	min	max	min	max
1	0.333	0.404	0.487	0.584	0.349	0.552
2	1.040	1.251	0.1386	1.663	0.949	1.501
3	—	—	0.908	1.0911	1.705	2.690

уровни молекулярного загрязнения поверхностей КА за 930 с полета из-за термодеструкции органических материалов КГЧ лежат в пределах от 0.333 до 2.690 мг/м², что не хуже уровня чистоты A/3.6 стандарта MIL STD-1246C [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны расчетно-экспериментальные процедуры для инженерных оценок уровня чистоты и массы слоя молекулярного загрязнения поверхностей КА на этапах термостатирования КГЧ воздухом высокого давления заданного класса чистоты и выведения КГЧ на орбиту. Процедуры разработаны на основе и с применением методик и требований стандартов MIL STD-1246C и ECSS-Q-70-01A. Показано, что при термостатировании КГЧ ракеты-носителя «Днепр» воздухом класса чистоты $N_c = 5000$ предельные значения рассматриваемых параметров составляют: уровень чистоты поверхностей КА $120 \leq X_1 \leq 150$, толщина слоя загрязнения (масло) $0.18 \leq l_{\Sigma} \leq 0.43$ нм, масса слоя загрязнения (масло) $0.16 \leq M_{\Sigma} \leq 0.4$ мг/м², что соответствует уровню молекулярного загрязнения поверхностей $A/65 \leq \xi \leq A/25$ согласно стандарту MIL STD-1246C. Масса частиц КФ, осевших на поверхностях КА вследствие термодеструкции органических материалов и покрытия поверхностей ГО за 930 с полета при выведении КГЧ на орбиту, лежит в пределах $0.333 \leq M_{\Sigma} \leq \leq 2.69$ мг/м², что не хуже уровня чистоты $\xi \leq A/3.6$ в соответствии с MIL STD-1246C.

1. Бишоп У. Ф., Минкович У. Дж. Скорость разложения фенольной смолы // Ракетная техника и космонавтика.—1973.—11, № 4.—С. 27—34.
2. Бойд Дж., Уотсон К., Уэлч Дж. Физическая теория газовой динамики. — М.: Мир, 1968.—556 с.
3. Девиен М. Течение и теплообмен разреженных газов. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1962.—187 с.
4. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. — М.: Мир, 1964.—716 с.
5. Жирифалько Р. Статистическая физика. — М.: Мир, 1976.—530 с.
6. Климук П. И., Забелина И. А., Гоголев В. А. Визуальные наблюдения и загрязнение оптики в космосе. — Л.: Машиностроение, 1983.—220 с.
7. Кобак В. О. Радиолокационные отражатели. — М: Сов. радио, 1975.—248 с.
8. Кошмаров Ю. А., Рыжов Ю. А. Прикладная динамика

- разреженных газов. — М.: Машиностроение, 1977.— 184 с.
9. Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. А. Н. Равделя, А. М. Пономаревой. — Л.: Химия, 1983.—232 с.
10. Кучеренко Е. Т. Справочник по физическим основам вакуумной техники. — Киев: Вища шк., 1981.—264 с.
11. Нейман М. Б., Кварская Б. М., Стрижкова А. С. и др. О механизме термической деструкции отвержденных эпоксидных смол // Докл. АН СССР.—1960.—135, № 5.—С. 1147—1149.
12. Шувалов В. А., Кочубей Г. С., Приймак А. И., Письменный Н. И. Потери мощности солнечных батарей высокоорбитальных космических аппаратов из-за воздействия околоспутниковой среды // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 4.—С. 39—49.
13. ECSS-Q-70-01 A-2002. Space product assurance. Cleanliness and contamination control.
14. Tribble A. C., Boyadjian B., Davis J., et al. Contamination control engineering design guidelines for the aerospace community // NASA Contractor Report.—1996.— N 4740.—126 p.

MOLECULAR CONTAMINATION OF SPACECRAFT SURFACES IN THERMOSTATIC CONTROL AND ORBITAL INJECTION OF LAUNCH VEHICLE NOSE CONE

V. A. Shuvalov, V. G. Tykhyy, L. P. Potapovych, A. I. Priymak, N. I. Pismennyi, G. S. Kochubey

We developed calculation and experimental procedures for engineering evaluation of surface roughness levels and mass of spacecraft molecular contamination level in thermostatic control of the Dnepr LV's nose cone by high-pressure air and in orbital injection of the space head module. It is shown that spacecraft surface molecular contamination corresponds to $A/65 \leq \xi \leq A/25$ levels in thermostatic control of the space head module by air of a purity class of 5000, and the particle mass of condensed phase of volatile compounds deposited on spacecraft surfaces during 930 seconds of flight is within $0.333 \leq M_{\Sigma} \leq 2.690 \text{ mg/m}^2$ in orbital injection, which is not worse than a purity level of $\xi \leq A/3.6$ according to the MILSTD 1246C standard.