

УДК 629.764:628.5

Л. П. Потапович¹, В. Г. Тихий¹, А. М. Потапов¹,
Л. П. Семенов², С. А. Засуха²

¹Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпропетровськ

²Національне космічне агентство України, Київ

Обеспечение чистоты запускаемых космических аппаратов: разработка требований по чистоте и методы контроля

Надійшла до редакції 10.04.07

Проведено аналіз можливих негативних впливів забруднень на дію систем і приладів космічних апаратів. Представлено систему вимог до чистоти виробів ракетно-космічної техніки на різних стадіях їхнього виготовлення та експлуатації у залежності від їхнього призначення та особливості конструкції. Описано методики контролю всіх параметрів чистоти, які підлягають нормуванню, наведено деякі результати контролю.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимым условием выпуска изделий ракетно-космической техники на современном мировом уровне, а также высокого качества пусковых услуг при коммерческих запусках является обеспечение высокого уровня чистоты выпускаемых изделий. Это вызвано переходом к негерметичному исполнению конструкции космических аппаратов (КА), увеличению сроков их службы на орбите. Обеспечение высокого уровня чистоты необходимо для успешной реализации большинства космических программ, поскольку наличие загрязнений, даже минимальных, может существенно ухудшить характеристики приборов и систем космического аппарата.

Загрязнения в виде газовой выделений и сублимации материалов в вакууме, твердых частиц, отрывающихся от поверхности ракеты-носителя и космического аппарата, продуктов выхлопа двигателей, газов и твердых частиц, образующихся при срабатывании пиросредств, приводят

к образованию около КА газового облака. На него воздействуют гравитационные силы, давление света, сила аэродинамического торможения. Это облако принято называть собственной внешней атмосферой (СВА) космического аппарата.

Рассеяние света на отдельных крупных частицах СВА было замечено Ю. А. Гагариным при первом же полете космического корабля «Восток». Однако физического истолкования этого явления тогда не было. Первое сообщение о таких частицах сделал американский астронавт Дж. Гленн в 1962 г. В дальнейшем все советские и американские космонавты наблюдали частицы, яркость которых была сравнима с блеском наиболее крупных звезд. Кроме того, космонавты сообщали о трудностях наблюдения звезд в дневное время и о загрязнении оптических поверхностей (иллюминаторов), что в значительной мере объясняется наличием СВА вокруг космического корабля [4].

На основании таких наблюдений появились работы [3], в которых указаны размеры отдель-

ных видимых частиц, частиц в облаке, динамика их движения относительно КА на расстояниях больше размеров корабля, возможные источники образования атмосферы вокруг КА, мощность этих источников. Однако все эти работы опирались на субъективные наблюдения космонавтов. Объективные абсолютные измерения светового фона в окрестности КА были предприняты впервые в 1968 г. с борта космических станций «Зонд-5, -6, -8» с помощью автоматического фотометра. Прибор регистрировал световые импульсы при работе двигателей ориентации станции, а также измерял световой фон вокруг станции. Данные с прибора при помощи телеметрии передавались на Землю. Обработка данных автоматического фотометра показала, что он зарегистрировал рассеяние света большого числа отдельных довольно крупных частиц.

Со временем вопросу изучения загрязнений космических объектов посвящались уже целые программы. Так, на орбитальной космической станции «Скайлэб» был поставлен ряд экспериментов по определению внешних загрязнений. В процессе экспериментов было установлено [2], что основными источниками загрязнений внешних поверхностей космической станции «Скайлэб» долгоживущими осадками служили продукты газовой выделений неметаллических покрытий и продукты выхлопа ракетных двигателей. На станции имелось около 195 различных неметаллических материалов, подвергавшихся действию вакуума, общей площадью 23200 м². После 120 сут экспозиции уровни осаждения загрязняющих веществ на анализируемых поверхностях станции «Скайлэб» превышали 500 мг/м².

Воздействие СВА на материалы и элементы КА сводится в основном к следующим эффектам:

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

Загрязнения отрицательно влияют прежде всего на оптические поверхности КА: иллюминаторы, линзы телескопов и астронавигацион-

ных 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.

Закреплению осевших частиц на поверхности способствует солнечное ультрафиолетовое излучение, под действием которого происходит полимеризация многих органических молекул.

Дополнительные условия для попадания загрязняющих веществ в виде заряженных частиц на поверхности, находящиеся вне прямой видимости из точки испускания частиц, создают электрические и магнитные поля вблизи КА.

Загрязнение оптических элементов изменяет их характеристики пропускания и отражения, создает дополнительное рассеяние света на оптических поверхностях. Указанные факторы могут приводить к существенному ухудшению параметров оптических приборов и даже к полному выходу приборов из строя. Яркость свечения отдельных крупных частиц диаметром в несколько микрон в газовом облаке, окружающем КА, близка к яркости звезд первой или даже нулевой звездной величины. Такие частицы могут служить ложными ориентирами для астронавигационных приборов и приводить к сбоям в системах ориентации КА.

Наличие газового загрязнения между датчиком и наблюдаемым объектом также ухудшает функционирование аппаратуры.

Влияние облака загрязнений 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 пробои, что является аварийным режимом. Но даже если пробои не происходят, в высоковольтных устройствах при ухудшении вакуума увеличиваются токи утечки и возникают кратковременные электрические разряды — так называемые микропробои, что также нарушает нормальную работу устройств и создает электромагнитные помехи для бортовой электронной аппаратуры. Отметим, что нарушения в работе высоковольтных и других электротехнических устройств на борту КА могут также возникать и за

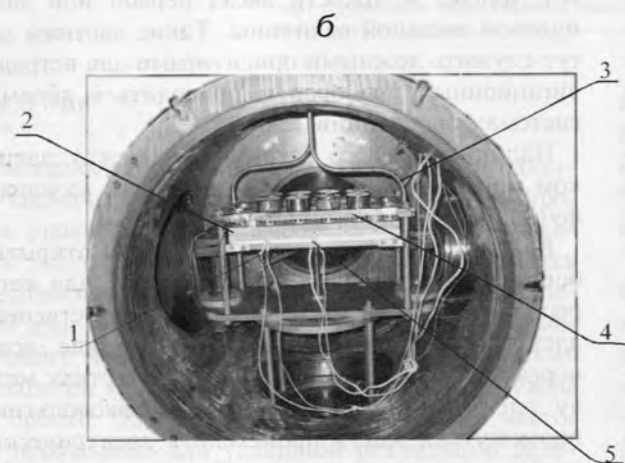
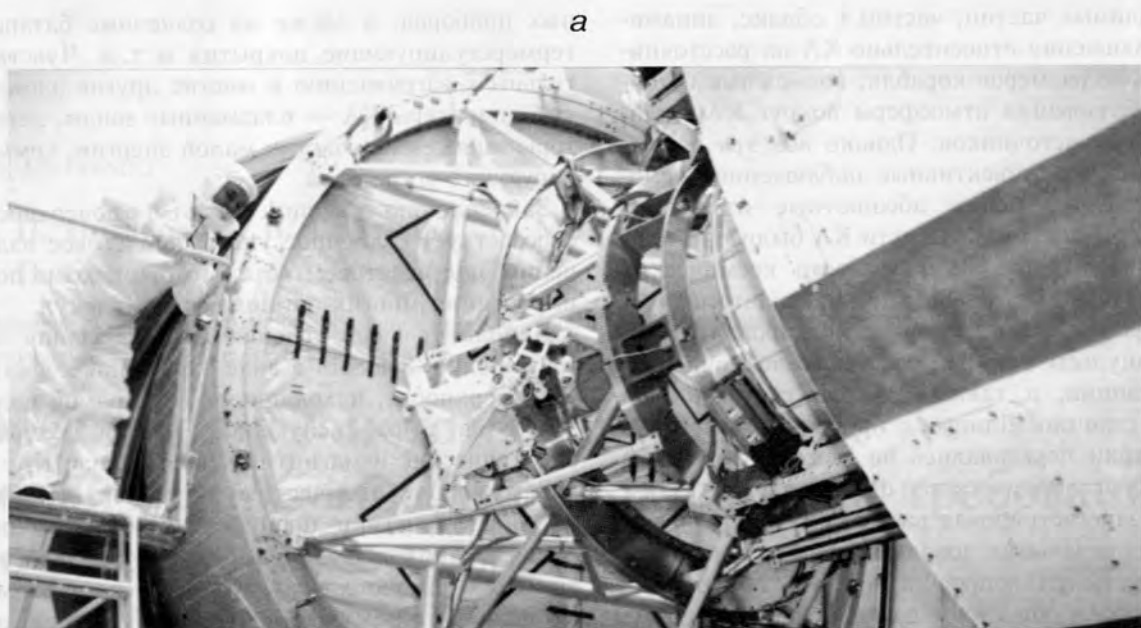


Рис. 1: а — процесс интеграции космического аппарата «Метеор-3М» с РН «Зенит-2» на космодроме «Байконур», б — внутреннее устройство термовакуумной камеры для исследования уровня газоразделений неметаллических материалов (1 — ленточный нагреватель, 2 — держатель с испытательными контейнерами, 3 — охлаждение конденсирующих пластин, 4 — держатель конденсирующих пластин, 5 — термопары), в — процесс проведения визуального контроля чистоты поверхности изделия с помощью ультрафиолетового осветителя

счет осаждения на изоляторы проводящих пленок загрязнений.

Из всего сказанного выше становится понятной необходимость выполнения требований по чистоте КА, а для снижения загрязняющего воздействия РН на КА — и соблюдения таких требований для самого РН.

СТРУКТУРА ТРЕБОВАНИЙ ПО ЧИСТОТЕ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Разработка требований по чистоте для ракет-носителей должна начинаться с анализа мировых тенденций уровня чистоты запускаемых КА, а также назначения конкретного запускаемого КА. Кроме того, необходимо учитывать особенности конструкции ракеты-носителя, имеющуюся производственную базу для ее изготовления и условия ее эксплуатации. Исходя из требований по чистоте, при необходимости могут вноситься изменения в конструкцию ракеты-носителя, например замена материалов с высоким уровнем газовыделений или пылеотделения более «чистыми» их аналогами, установка фильтров и т. д. Может потребоваться модернизация производственной базы, приобретение необходимой измерительной аппаратуры, или создание и использование дополнительного оборудования, например специальной чистой палатки. Кроме того, уровень требований по чистоте зависит от этапа изготовления и эксплуатации изделия. В отли-

чие от общепринятого в ракетной технике подхода, при котором максимальные показатели достигаются на стадии изготовления деталей и сборочных единиц, требования по чистоте на этом этапе минимальны. При поступлении деталей на основную сборку повышаются требования, как к чистоте их поверхности, так и к чистоте помещений, в которых производятся работы. Максимальные требования по чистоте предъявляются к изделию после завершения его сборки и непосредственно перед интеграцией КА с РН (рис. 1, а).

На рис. 2 изображена структура основных требований по чистоте изделий ракетно-космической техники.

ПАРАМЕТРЫ ЧИСТОТЫ И МЕТОДЫ ИХ КОНТРОЛЯ

Рассмотрим подробнее требования по каждому из параметров чистоты и методы их контроля. Уровень чистоты воздуха, окружающего изделие, зависит от его запыленности и содержания в нем органических веществ.

Запыленность воздуха. Минимальный уровень запыленности воздуха в помещениях для сборки и подготовки к пуску изделий ракетно-космической техники обычно составляет 100000 по американскому федеральному стандарту FED-STD-209E [8] или класс ISO 8 по международному стандарту ISO 14644-1 [9].

Однако в последнее время наблюдается устойчивая тенденция к снижению уровня запыленности воздуха, окружающего КА. Так, для подготовки к пуску японского спутника OICETS и франко-израильского VEN μ S требуются условия, соответствующие условиям 30000. Для английского аппарата RapidEye такие же условия требуются от момента снятия транспортировочных крышек с объективов, во время нахождения спутника внутри отсека полезной нагрузки и до момента отделения. Для космического аппарата VEN μ S на этой же стадии требуется запыленность воздуха на уровне 1000. Это указывает на необходимость со временем ужесточать нормативы по запыленности воздуха, создавая для этих целей соответствующие помещения и системы подготовки воздуха.

Предъявляются также требования к запыленности воздуха, используемого для термоста-

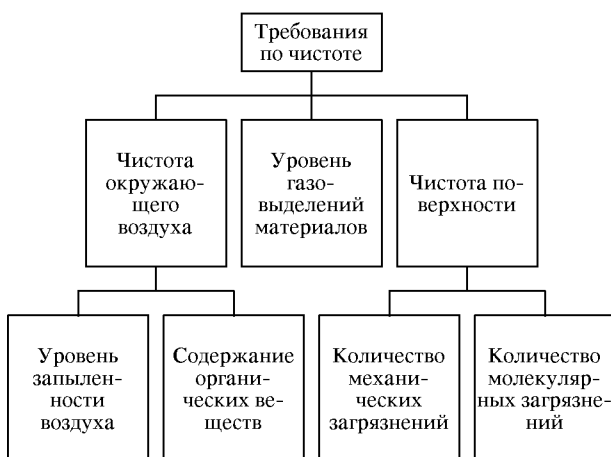


Рис. 2. Структура основных требований по чистоте изделий ракетно-космической техники

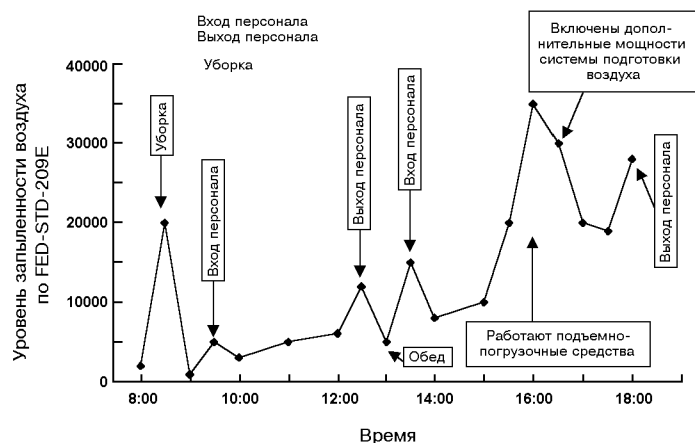


Рис. 3. Диаграмма изменения запыленности воздуха чистого помещения в течение рабочего дня

Таблица 1. Результаты контроля запыленности сжатых газов с помощью счетчика частиц Lasair-II-510A через диффузор высокого давления HPD II 100

Условия замера	Номер замера	Концентрация частиц в 1 м ³ воздуха		
		≥ 0.5 мкм	≥ 1 мкм	≥ 5 мкм
Воздух, подаваемый из системы термостатирования высокого давления				
После фильтра тонкой очистки на выходе из гофрированных рукавов	1	106	35	0
	2	283	106	35
	3	494	141	71
	4	71	35	0
	5	459	106	0
Среднее		283	85	21
Азот сжатый				
На выходе из пневматического щита	1	141	106	35
	2	71	0	0
	3	177	35	35
Среднее		130	47	23
Гелий сжатый				
На выходе из блока гелиевого	1	3332	1697	222
	2	743	297	0
	3	1345	150	74
Среднее		1663	715	99
Нормативные требования (класс ISO 6.7 по ISO 14644-1)		3520	832	29

тирования отсека полезной нагрузки. По общепринятым в мире нормам его чистота должна быть по крайней мере на порядок выше, чем требуется для отсека. Так, компания Sea Launch использует для термостатирования модуля полезной нагрузки воздух, запыленность которого не превышает требования класса 1000.

Для выполнения контроля запыленности воздуха используются счетчики частиц. Выбранная

нами модель счетчика Lasair-II-510A имеет пять измерительных каналов: 0.5, 1.0, 5.0, 10.0 и 25.0 мкм, что соответствует требуемым размерным диапазонам. Кроме того, счетчик частиц оснащен температурно-влажностным датчиком, встроенным принтером. Прибор может работать в автоматическом режиме без участия оператора, запоминает 3000 результатов замеров, к нему могут быть подключены еще четыре ана-

логовых первичных датчика. Счетчик может быть подключен к персональному компьютеру. Со счетчиками частиц типа Lasair-II работает диффузор высокого давления модели НРД II 100, обеспечивающий изокINETический отбор проб сжатого воздуха. Условие изокINETичности отбора является требованием [4] и выполняются, когда ось входного отверстия пробоотборного устройства расположена параллельно воздушному потоку, а средняя скорость потока на входе в пробоотборник соответствует средней скорости течения воздуха в этом месте.

Счетчик частиц модели Lasair-II-510А применяется для контроля запыленности воздуха производственных помещений как при изготовлении ракет-носителей и космических аппаратов на заводе, так и при подготовке их к пуску на космодроме. Прибор показал высокую надежность и стабильность работы в различных температурных условиях. На рис. 3 изображена типичная диаграмма изменения запыленности воздуха во время проведения работ по программе «Днепр—Восток» на космодроме Байконур.

Совместно с диффузором высокого давления модели НРД II 100 счетчик Lasair-II-510А также успешно использовался для контроля запыленности воздуха системы высокого давления и сжатых газов азота и гелия. В табл. 1 приведены результаты этого вида контроля.

Содержание органических веществ в воздухе. Требования по количеству углеводов или органических веществ в воздухе могут выражаться в миллионных долях от объема или массы воздуха (ppm), в значениях концентрации загрязняющих веществ в объеме воздуха ($\text{мг}/\text{м}^3$), а также в массе органических веществ (мг), осаждающихся из воздуха на поверхность 1 м^2 за неделю. Для помещений по подготовке отсеков полезной нагрузки и сборки космических аппаратов разработки ГKB «Южное» требуется, чтобы количество органических осадений из воздуха на поверхность не превышало $2 \text{ мг}/\text{м}^2 \cdot \text{нед}$.

Наиболее распространенным методом контроля органических веществ в воздухе является метод размещения в контролируемом помещении на определенный промежуток времени специальных контрольных пластин. После экспозиции пластин собранные органические вещества смываются растворителем и направляются на

Таблица 2. Результаты контроля количества органических осадений из воздуха на поверхность в чистом помещении для сборки спутников на ГП «ПО ЮМЗ»

Время экспонирования контрольных пластин, сут	Номер контрольной пластины	Масса невыпаренного остатка, собранного с пластины, мг	Количество органических осадений, $\text{мг}/\text{м}^2 \cdot \text{нед}$
16	1	0.23	1.0
16	2	0.20	0.87
16	3	0.16	0.70
		Среднее	0.86

количественный анализ, который обычно проводится гравиметрическим способом. Данный способ заключается в выпаривании полученного раствора на водяной бане и взвешивании невыпаренного остатка на высокочувствительных весах. В качестве растворителя используется гексан. Погрешность взвешивания не должна превышать 0.3 мг. Кроме того, весы должны быть установлены в специальном помещении с постоянным температурно-влажностным режимом при отсутствии вибрации, сквозняков, паров органических растворителей и т. д. При выполнении анализа следует уделять особое внимание чистоте используемой химической посуды и материалов.

В табл. 2 приведены результаты контроля количества органических осадений из воздуха на поверхность в чистом помещении для сборки спутников на ГП ПО ЮМЗ.

Данный метод контроля отличается сравнительно низкой себестоимостью (по сравнению с другими методами), но имеет высокую погрешность и очень длителен (в операцию контроля входит не менее чем 2-недельная экспозиция пластин и анализ контрольной пробы). В связи с последним обстоятельством исключается возможность проведения контроля в реальном масштабе времени.

Уровень газовыделений неметаллических материалов. Для обеспечения высокого уровня изделий ракетно-космической техники предъявляются также требования по уровню газовыделений неметаллических материалов, используемых в их конструкции. Такие требования содержатся в американском стандарте ASTM E595-93

Таблица 3. Уровень газовыделений (%) до и после термовакуумной обработки материалов

Материал	ОПМ (норма — 1 %)		КФ (норма — 0.1 %)	
	До ТВО	После ТВО	До ТВО	После ТВО
Резины	6.66	4.03	0.27	0.17
Клеи	3.75	1.94	0.09	0.08
Стеклопластики и стеклотекстолит	1.83	0.45	0.03	0.02
Пленки с клеящим слоем	0.85	0.68	0.09	0.07

[5], европейском стандарте ECSS-Q-70-02A [7], российском стандарте ГОСТ Р50109-92 [1]. В качестве параметров, характеризующих уровень газовыделений каждого неметаллического материала, используются общая потеря массы (ОПМ) материала и количество летучих конденсирующихся веществ или конденсирующаяся фаза (КФ). ОПМ представляет собой массу летучих веществ, выделяющихся из образца материала в процессе его выдержки при определенных значениях температуры и давления в течение определенного промежутка времени. КФ составляет ту часть ОПМ, которая может конденсироваться на специальной конденсирующей пластине при определенной температуре и удерживаться на ней в течение определенного промежутка времени.

При проведении испытаний материалов на определение уровня газовыделений образцы материалов выдерживаются при 125 °С в течение 24 ч в вакууме. Глубина вакуума несколько отличается для каждого из перечисленных выше стандартов. По стандарту ASTM E595-93 он должен составлять 7 мПа, для ECSS-Q-70-02A — 1 мПа, а для ГОСТ Р50109-92 — 0.7 мПа. Опыт работ показывает, что такие различия величины вакуума не оказывают значительного влияния на результаты испытаний, так как уровень газовыделений материалов в большей степени зависит от температуры, чем от глубины вакуума. Условия, при которых проводятся испытания по определению уровня газовыделений, являются усредненными условиями эксплуатации материалов в космосе, которые зачастую не соответствуют реальным. Но такие испытания занимают сравнительно немного времени и помогают унифицировать результаты, получен-

ные различными испытательными лабораториями при сравнительном отборе материалов с минимальным уровнем газовыделений.

Определение уровня газовыделений неметаллических материалов проводится в специальной термовакуумной камере (рис. 1, б), в которой обеспечиваются необходимые условия температурно-вакуумного воздействия на образцы материалов. В этой же камере проводится также отработка режимов термовакуумной обработки, которой подвергаются детали и сборочные единицы из неметаллических материалов с целью снижения их уровня газовыделений.

На данной установке были проведены исследования 175 неметаллических материалов, входящих в конструкцию изделий разработки ГКБ «Южное» до и после их термовакуумной обработки. Исследования показали, что основные используемые материалы удовлетворяют требованиям по уровню газовыделений. Термовакуумная обработка снижает уровень газовыделений материалов, но эффективность ее проведения различна для разных классов материалов в силу особенностей их химического состава. Сравнение степени снижения уровня газовыделений для некоторых классов материалов представлено в табл. 3. Превышение требований наблюдается для некоторых клеев, смазок, эмалей, резиновых прокладок, электроизоляционных материалов. В настоящее время на предприятии проводятся работы по поиску их «малогазующих» аналогов.

Чистота поверхности изделий. Уровень требований по чистоте поверхности изделий зависит от этапа изготовления изделия, особенностей его конструкции и назначения.

Чистота изготавливаемых деталей космической головной части (КГЧ) должна соответствовать уровню «визуально чистый» или «визуально чистый по салфетке». Если заказчик не предъявляет особых требований, то такой уровень чистоты поверхности имеет и собранная КГЧ в том случае, если для запуска спутников после доработки используется изделие, изготовленное ранее без предъявления требований по чистоте, как, например, некоторые из ракет-носителей «Днепр». Такой уровень чистоты контролируется путем визуального осмотра изделия или салфетки, смоченной в спирте, после протирки поверхности.

Следующим уровнем чистоты поверхности изделия является уровень «визуально чистый + ультрафиолет» предполагает отсутствие на контролируемой поверхности каких-либо загрязнений, видимых нормальным невооруженным глазом (кроме коррекции зрения) при освещении осветителем мощностью не менее 100 Вт ультрафиолетовым светом с длиной волны $\lambda = 320...380$ нм. Такие требования предъявляются для деталей изделий РКТ перед их поступлением на основную сборку и в качестве промежуточных перед выполнением количественных замеров чистоты поверхности изделий. До такого уровня очищается также внутренняя поверхность космической головной части РН «Днепр», если того требует заказчик. Для контроля чистоты поверхности изделий на соответствие уровню «визуально чистый + ультрафиолет» используются УФ-осветители моделей УФК-3, КД - 31Л, UVL-100, SB-100 P/F.

Преимущества визуальных методов контроля чистоты поверхности изделий заключаются в их оперативности и возможности оценивать чистоту всей поверхности контролируемого объекта. Недостатком является отсутствие количественного критерия уровня чистоты поверхности. На рис. 1, в изображен процесс проведения визуального контроля чистоты поверхности торца второй ступени РН «Зенит-2» с помощью ультрафиолетового осветителя.

Для внутренних поверхностей отсеков полезного груза таких ракет-носителей, как «Циклон -4», «Зенит-М», а также поверхностей космических аппаратов предъявляются количественные требования по чистоте. При этом аналогично загрязнениям воздуха отдельно рассматриваются механические и молекулярные загрязнения поверхности.

К механическим загрязнениям относятся нежелательные инородные объекты с измеряемыми размерами, находящиеся на поверхности изделия. Механические загрязнения подразделяются на частицы и волокна. Волокно отличается от частицы тем, что отношение ее длины к ширине не менее 10:1 и длина составляет не менее 100 мкм.

К молекулярным загрязнениям поверхности относятся нежелательные объекты на поверхности изделий в виде молекулярных пленок органического и неорганического происхождения без

Таблица 4. Уровни чистоты поверхности по механическим загрязнениям в соответствии со стандартом MIL-STD-1246C

Уровень чистоты	Размер частицы, мкм	Число частиц на фут ² (примерно 0.1 м ²)
300	25	7.455
	50	1.021
	100	95
	250	2.3
	300	1.0
500	50	11.817
	100	1.100
	250	26
	500	1.0
750	50	95.807
	100	8.900
	250	214
	500	8.1
	750	1.0

определенных размеров. Они включают в себя остатки масел, смазок, химических растворителей, флюсов от припоев, сконденсированные продукты газовой выделений, а также отпечатки пальцев.

Количество механических загрязнений поверхности классифицируется Военным стандартом США MIL-STD-1246C «Уровни чистоты изделий и программа контроля загрязнений» [10]. В европейском стандарте ECSS-Q-70-01A «Обеспечение качества космических изделий. Контроль чистоты и загрязнений» [6] также приводится классификация уровней чистоты поверхности по загрязнению частицами по [10]. Предельные количества частиц для некоторых уровней чистоты поверхности приведены в табл. 4.

Есть также альтернативная характеристика чистоты поверхности в виде коэффициента затенения (КЗ), который представляет собой отношение площади проекции всех частиц к общей площади поверхности, на которой они размещаются. Величина коэффициента затенения независима от распределения частиц по размерам и также не зависит от формы и цвета частиц. В общем случае уровни чистоты должны выражаться в виде количества частей на миллион (мм²/м²), но могут использоваться выражения требований по чистоте поверхности в виде сотых долей или процентов (%).

Количество механических загрязнений «чистых» изделий разработки ГKB «Южное» соответствует уровню 500 по стандарту MIL-STD-1246C.

Метод количественного контроля чистоты поверхности на уровне микрочастиц заключается в снятии отпечатков поверхности с помощью липкой ленты и дальнейших подсчетов количества частиц с определением их размеров под микроскопом. Недостатком данного метода контроля является его низкая оперативность и невозможность проводить контроль в реальном масштабе времени, а вследствие этого — и невозможность контролировать ситуацию при появлении дополнительных источников загрязнения. Для снятия отпечатков применяется скотч, не оставляющий следов на поверхности. Использование скотча для снятия отпечатков контролируемой поверхности имеет преимущества по сравнению с ранее использовавшимися мембранными фильтрами «Владипор», так как повышается вероятность снятия частиц с контролируемой поверхности и появляется возможность хранения отпечатков особо ответственных операций контроля в качестве образцов-свидетелей. Предварительно готовится так называемый комплект для снятия отпечатков. Для этих целей скотч нарезается на полоски площадью $0,001 \text{ м}^2$, которые наклеиваются на предварительно очищенную подложку. Для снятия отпечатка полоска скотча отклеивается от подложки, прикладывается к контролируемой поверхности, слегка приглаживается и затем отделяется и возвращается на подложку. Для подсчета частиц должен использоваться микроскоп типа МБС-10 с размерной шкалой и возможностью 16-кратного увеличения, при котором производится подсчет. Частицы подсчитываются по следующим размерным диапазонам: 50...100, 100...250, 250...500 и более 500 мкм. Затем по полученным значениям рассчитывается количество частиц на 1 м^2 поверхности по следующим размерным диапазонам: более 50, более 100, более 250, более 500 мкм. К недостаткам данной методики контроля можно отнести ее большую трудоемкость, длительность выполнения и сильную зависимость результатов контроля от квалификации оператора. Описанный выше метод опробован и внедрен на предприятии. Типичное распределение пылевых частиц по размерам на снятом отпечатке в сравне-

Таблица 5. Типичное распределение пылевых частиц по размерам на предприятии ГKB «Южное»

Диапазон размеров, мкм	Количество частиц на 1 м^2	
	Контроль	Уровень 500 по стандарту MIL-STD-1246C
> 50	5750	12800
> 100	1500	11900
> 250	250	281
> 500	0	11

Таблица 6. Значения некоторых уровней молекулярных загрязнений по стандарту MIL-STD-1246C

Уровень	Предельное количество загрязнений на поверхности, мг/0.1м ²
A/2	0.5
A	1.0
B	2.0

нии с нормативными требованиями представлено в табл. 5.

Количество молекулярных загрязнений поверхности обычно выражаются в единицах массы на единицу площади. Классификация уровней молекулярных загрязнений или так называемых нелетучих остатков (NVR) приводится в стандарте США MIL-STD-1246C [10] (табл. 6). В европейском стандарте ECSS-Q-70-01A [6] также приводится классификация уровней чистоты поверхности по молекулярным загрязнениям согласно [10].

Иногда требования выражаются в величине толщины слоя молекулярных загрязнений. Если известна плотность загрязнений (1 г/см^3 может считаться приемлемым значением), уровень чистоты по стандарту MIL STD 1246C может быть преобразован в толщину загрязнения и наоборот. Для наиболее «чистых» изделий разработки ГKB «Южное» количество молекулярных загрязнений должно соответствовать требованиям уровня A по стандарту MIL-STD-1246C. Для контроля количества молекулярных загрязнений поверхности применяется метод смыва определенной площади контролируемой поверхности с помощью салфетки, смоченной в растворителе. Затем проводится экстрагирование салфетки в том же растворителе (гексане), и пол-

ученный раствор собранных молекулярных загрязнений в гексане направляется на количественный анализ.

Количественный анализ контрольных проб в виде раствора органических веществ в гексане может проводиться как описанным выше гравиметрическим методом, так и флуоресцентным. Флуоресцентный метод анализа основан на способности органических веществ флуоресцировать при освещении ультрафиолетовым светом. Степень флуоресценции зависит от концентрации вещества в растворе. Измерения проводятся с помощью прибора, измеряющего относительный поток излучения флуоресценции в различных участках спектрального диапазона, или флуориметра.

В результате лабораторной экспериментальной отработки данного метода было установлено, что флуоресцентный метод количественного анализа контрольных проб проще в исполнении, более оперативен и имеет меньшую погрешность по сравнению с гравиметрическим методом. Однако при контроле реальных изделий погрешность флуоресцентного метода может повышаться из-за наличия нескольких загрязнителей с разной степенью флуоресценции в неизвестной пропорции. Для снижения влияния этого фактора рекомендуется проводить градуировку флуориметра по загрязнителю, смывому с других участков контролируемой поверхности пло-

щадью не менее 1 м². Полученная при этом контрольная проба должна быть выпарена, нелетучий остаток взвешен, и на его основе приготовлен градуировочный раствор для флуориметра. Таким образом, применение флуоресцентного метода количественного анализа контрольных проб перспективно при проведении контроля молекулярных загрязнений поверхностей большой площади с однородным загрязнителем.

Достоинством метода контроля молекулярных загрязнений путем проведения смыва поверхности является его относительно низкая себестоимость. К недостаткам этого метода следует отнести высокую погрешность, низкую оперативность, и следовательно, исключение возможности проведения контроля в реальном масштабе времени, невозможность применения для оптических или других легко повреждающихся поверхностей и невозможность использования на орбите. Результаты контроля количества молекулярных загрязнений спутника «Egyptsat-1» представлены в табл. 7.

ВЫВОДЫ

Описанный выше системный подход к разработке требований по чистоте в зависимости от назначения запускаемого КА, особенностей конструкции ракеты-носителя, этапа ее изготовле-

Таблица 7. Результаты контроля количества молекулярных загрязнений спутника «Egyptsat-1»

Место отбора пробы	Площадь смыва, м ²	Количество загрязнений в пробе, мг	Количество загрязнений на поверхности, мг/м ²
Инженерная модель спутника без предварительной очистки			
БОС1 ССИК; АИ-512; БОС2-МСУ	0.2002	2.15	10.73
ПДПН, ЛЕМ1 016	0.1166	1.48	12.69
БОС1 МСУ; БОС2 ССИК	0.1432	1.74	12.15
Панель БС	0.2209	0.34	1.54
Кронштейны антенн	0.0198	0.33	16.68
Летная модель спутника			
АИ 024 + БОС1-ССИК	0.1627	1.29	7.94
ЛЕМ1-016	0.0212	0.159	7.50
Внутренняя поверхность экрана ПТР	0.5476	2.39	4.37
Панель БС	0.5476	1.50	2.74
Внешняя поверхность экрана ПТР	0.5476	0.33	0.60
	Требования КД		10

ния и эксплуатации позволяет выпускать конкурентоспособные изделия ракетно-космической техники и обеспечивать качество предоставляемых пусковых услуг.

Разработанные методики контроля различных параметров чистоты позволяют обеспечить контроль выполнения требований по чистоте на всех этапах изготовления и подготовке к пуску ракет-носителей и космических аппаратов, а также проводить верификацию выполнения требований по чистоте, предъявляемые заказчиком пусковых услуг.

1. ГОСТ Р50109-92. Материалы неметаллические. Метод испытания на потерю массы и содержание летучих конденсирующихся веществ при вакуумно-тепловом воздействии. — Введ. 01.07.93.
2. Загрязнение поверхностей космических аппаратов в процессе эксплуатации (обзор по материалам отечественной и зарубежной печати). — М.: ОНТИ ЦНИИ-Маш, 1975.—220 с.
3. Климук П. И., Забелина И. А., Гоголев В. А. Визуальные наблюдения и загрязнения оптики в космосе. — Л.: Машиностроение, 1983.—220 с.
4. Модель космического пространства (Модель космоса-82) / Под ред. С. Н. Вернова. — М.: МГУ, 1983.—636 с.—(Расчетная модель; Т. 3).
5. ASTM E595-93. Standard Test Method for Total Mass Loss and Collected Volatile Condensable Materials for Outgassing in a Vacuum Environment, American Society for Testing and Materials. — USA.
6. ECSS-Q-70-01 A-2002. Space product assurance. Cleanli-

ness and contamination control, December, 11, 2002. — European Cooperation for Space Standardization, Requirements 8, Standards Division, Noordwijk, The Netherlands.

7. ECSS-Q-70-02A. Space product assurance. Thermal vacuum outgassing test for the screening of space materials, May, 26, 2000. — European Cooperation for Space Standardization, Requirements 8, Standards Division, Noordwijk, The Netherlands.
8. FED-STD-209E Airborne Particulate Cleanliness Classes in Cleanrooms and Clean Zones, September, 11, 1992. — USA.
9. ISO 14644-1:1999 Cleanrooms and associated controlled environments - Part 1: Classification of airborne particulates, May, 1, 1999. — International Organization for Standardization.
10. MIL-STD-1246C Product Cleanliness Levels and Contamination Control Program, April, 11, 1994. — USA.

CLEANLINESS CONTROL OF LAUNCHING SPACECRAFTS: DEVELOPMENT OF CLEANLINESS REQUIREMENTS AND INSPECTION TECHNIQUES

*L. P. Potapovych, V. G. Tykhyy, A. M. Potapov,
L. P. Semenov, S. A. Zasukha*

The potential negative effects of contamination on the operation of spacecraft systems and instruments were analysed. We developed cleanliness requirements for aerospace equipment at various stages of its manufacturing and operation according to its function and design features. The developed inspection techniques of all the critical cleanliness parameters are described and some inspection results are given.