

Применение концепции системного подхода к решению вопросов обеспечения чистоты ракетно-космических объектов при создании спутника EGYPTSAT-1

Государственное конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля

Введение. Одним из условий надежности выполнения функциональных задач объектами космической техники является обеспечение высокого уровня их чистоты. Это вызвано тем, что наличие загрязнений, даже в минимальных количествах, существенно ухудшает параметры работы приборов и систем в космосе. Особенно актуальной проблема снижения загрязнения изделий ракетно-космической техники стала с переходом к негерметичному исполнению конструкции космических аппаратов, когда в целях снижения массы аппарата чувствительные элементы аппаратуры больше не защищаются от внешних воздействий герметичным корпусом. Кроме того, экономическая целесообразность и жесткие условия конкуренции диктуют необходимость увеличения сроков службы космических аппаратов на орбите.

В украинской ракетно-космической отрасли сложился определенный порядок обеспечения чистоты изделий, но он был направлен, прежде всего, на выполнение функциональных задач объектами военной ракетной техники. В настоящее время этого уровня чистоты продукции явно недостаточно, и с выходом Украины на современный международный рынок предоставления космических услуг необходимо было перейти на качественно новый уровень обеспечения чистоты изделий ракетно-космической техники.

Для этих целей в ГП КБ «Южное» разрабатывали технические требования к чистоте изделий, внедрению в производство технологии работ с применением новых методов очистки изделий и контроля всех нормируемых параметров чистоты. Исследования всех материалов и узлов, которые применяли в конструкции изделий, выполняли для выяснения их соответствия требованиям к чистоте. Результаты работ в этом направлении [1-3] позволили достигнуть уровня чистоты, требуемого заказчиками пусковых услуг, при создании ракет-носителей «Зенит-2» и «Днепр».

На основе результатов проведенных работ и анализа требований зарубежных стандартов по чистоте ракетно-космической техники [4, 5] была разработана и внедрена в производство концепция обеспечения чистоты ракет-носителей и космических аппаратов, которая предусматривает системный подход к решению вопросов обеспечения чистоты изделия на всех стадиях его создания – при проектировании, изготовлении и эксплуатации. В настоящей работе рассмотрен пример применения новой концепции обеспечения чистоты изделий при создании спутника EGYPTSAT-1.

Концепция системного подхода к обеспечению чистоты. Высокий уровень чистоты изделия может быть обеспечен только при условии последовательного решения вопросов обеспечения чистоты на всех стадиях его проектирования, изготовления и эксплуатации. Схематично такой подход изображен на рис. 1.

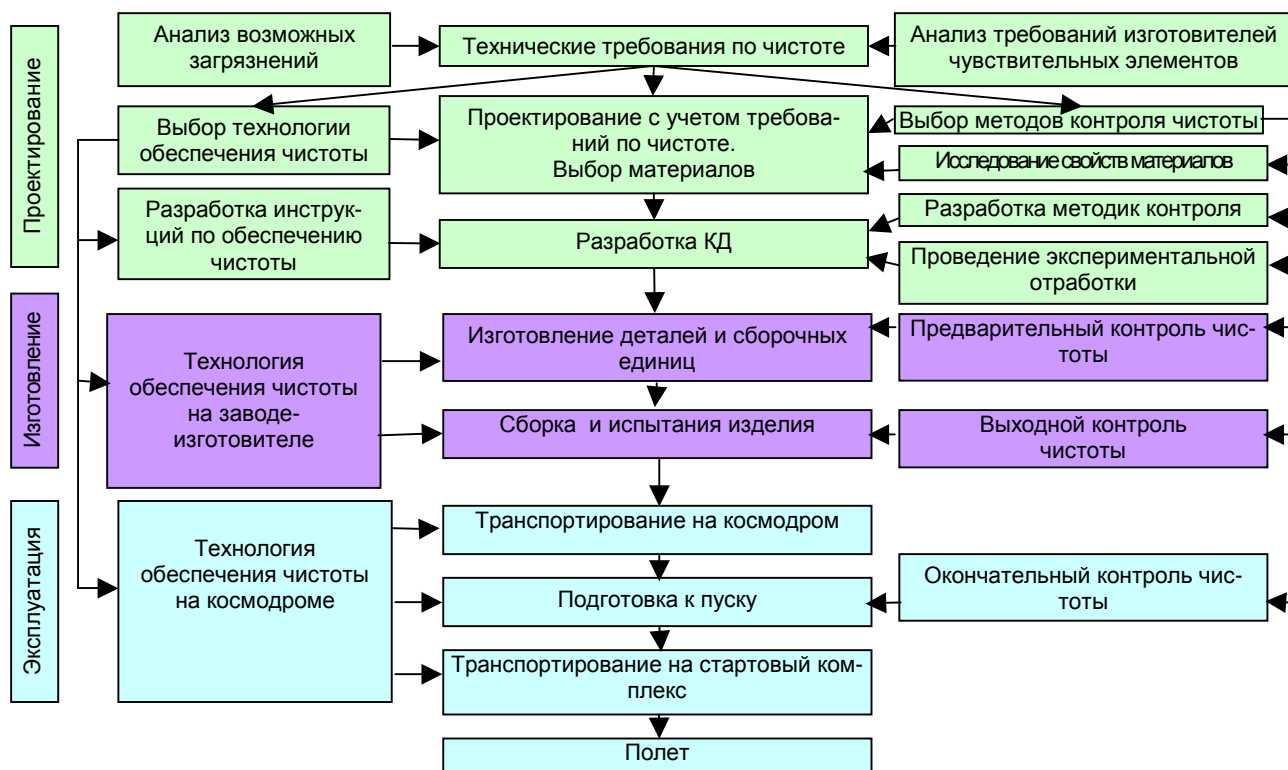


Рис.1. Схема обеспечения чистоты изделия

Создание изделия с повышенными требованиями к чистоте начинается с анализа требований изготовителей полезной нагрузки, содержащей в своей конструкции чувствительные к загрязнению элементы. Кроме того, определяют возможные источники загрязнения чувствительных элементов, оценивают величину вклада каждого из источников.

На основании такого анализа разрабатывают систему требований к чистоте изделия, которая состоит из требований к конструкции изделия в целом и отдельных узлов и сборочных единиц, применяемым материалам, технологическим газам и жидкостям, операциям очистки, условиям производства и упаковке изделия на разных стадиях его изготовления и эксплуатации. Причем требования к чистоте поверхности деталей и условиям производства повышаются по мере изготовления и сборки изделия.

Далее проектируют изделие с учетом предъявляемых требований к чистоте. При этом на основе предварительно проведенных исследований их пылеотделительных свойств и уровня газовыделений выбирают материалы конструкции, а также применяемые операции очистки и методы контроля нормируемых параметров чистоты.

При разработке конструкторской документации в нее закладывают требования к чистоте узлов, условиям производства, упаковке деталей и сборочных единиц, операциям очистки и контролю чистоты, соответствующие конкретной стадии изготовления и сборки изделия. На этом этапе разрабатывают технологию обеспечения чистоты и методики контроля нормируемых параметров чистоты, выпускают соответствующие инструкции, которые входят в перечень конструкторской документации на изделие. На основе инструкции по обеспечению чистоты в каждом цехе разрабатывают соответствующие технологические процессы.

На этапе автономной обработки отдельных узлов и экспериментальной обработки изделия в целом оценивают влияние различного рода нагрузок на чистоту изделия. В результате этих работ может быть проведена корректировка конструкторской документации.

Изделие изготавливают и собирают в соответствии с разработанной конструкторской и технологической документацией. При этом выполняют как промежуточный контроль параметров чистоты во время изготовления отдельных деталей и узлов, так и выходной контроль уровня чистоты изделия при вывозе с завода-изготовителя.

Далее основными задачами являются сохранение достигнутого уровня чистоты при транспортировании на космодром и проведении там работ, связанных с подготовкой к пуску. Для этих целей во время транспортирования применяют различные пылезащитные чехлы. Во время проведения работ на космодроме предусматривают операции по контролю чистоты после транспортирования и различного рода испытаний. При необходимости проводят дополнительную очистку и повторный контроль чистоты. Для этих целей на космодроме должны быть необходимые условия, определенное оборудование для выполнения операций очистки, приборы для контроля чистоты. Все работы, связанные с обеспечением чистоты, проводят в соответствии с разработанными эксплуатационными инструкциями, которые входят в перечень эксплуатационной документации на изделие.

Такой системный подход к вопросам обеспечения чистоты позволяет максимально снизить уровень загрязнения объектов ракетно-космической техники и гарантировать надежное выполнение ими своих функциональных задач.

Разработка требований к чистоте для спутника EGYPTSAT-1. Требования к чистоте для спутника EGYPTSAT-1 были разработаны на основе анализа степени отрицательного воздействия различного рода загрязнений на функционирование различных систем аппарата. Поскольку изготовители полезной нагрузки спутника не предъявили специальных требований к чистоте, рассматривали влияние загрязнений только на работу систем собственной разработки. Было установлено, что изменение поглощательной способности ΔA_s^x поверхности системы терморегулирования вследствие ее загрязнения пылевыми частицами составит

$$\Delta A_s^x = KЗ(A_{s, част} - A_{s, пов})$$

где $A_{s, пов}$ - коэффициент поглощения солнечного излучения чистой поверхности; $A_{s, част}$ - коэффициент поглощения солнечного излучения пылевых частиц; $KЗ$ – коэффициент затенения.

Аналогичным образом пылевые частицы изменяют излучательную способность загрязненной поверхности

$$\Delta \varepsilon = KЗ(\varepsilon_{част} - \varepsilon_{пов})$$

где $\varepsilon_{пов}$ - коэффициент излучения чистой поверхности; $\varepsilon_{част}$ - коэффициент излучения пылевых частиц.

На основе закона Стефана - Больцмана [6] была определена зависимость изменения температуры некоторых поверхностей систем терморегулирования от уровня их загрязнения в классификации [4] (рис.2). В качестве механических загрязнений рассматривали серые частицы, к которым относится пыль, частички человеческой кожи, волос, волокна от одежды и салфеток, т.е. большинство загрязнений.

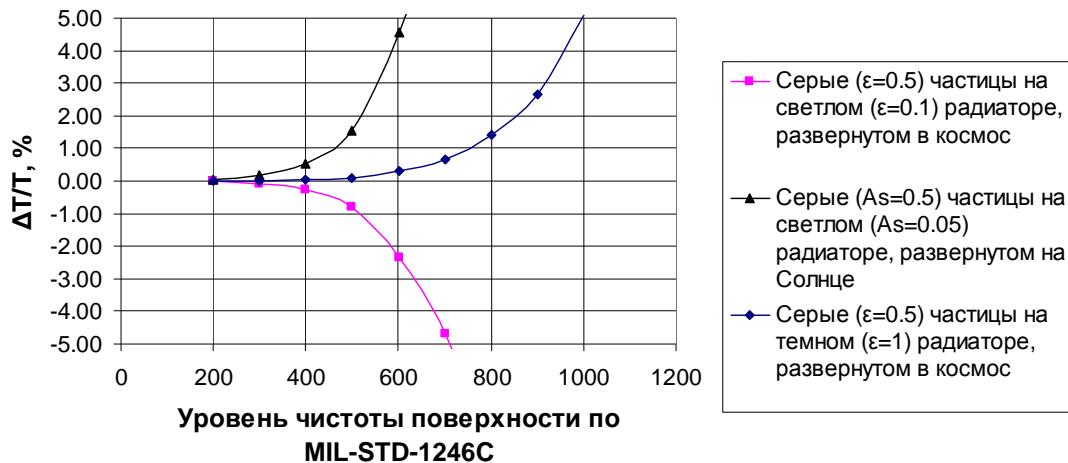


Рис.2. Изменение температуры поверхностей вследствие их загрязнения дискретными частицами

По рис. 2 можно определить, что серые загрязнения не окажут существенного воздействия на температуру поверхности, т.е. отношение $\Delta T/T$ не превысит 1%, пока их уровень не превысит ~ 500...600. Такой уровень чистоты можно рассматривать в качестве минимального требования к чистоте терморегулирующих поверхностей. Кроме того, согласно [7] установлено, что затенение поверхности на 2.2%, что примерно соответствует уровню чистоты 500, снижает мощность солнечной батареи на 1%. Таким образом, было установлено, что для спутника EGYPTSAT-1 достаточно очистки поверхностей от механических загрязнений до уровня 500 согласно [4].

Для поверхности системы терморегулирования, покрытой тонкой плёнкой загрязнений толщиной X , освещенной солнцем, изменение коэффициента поглощения ΔA_s определяется следующим образом:

$$\Delta A_s = (A_{s, \text{загр}} - A_{s, \text{пов}}) \left(1 - e^{-2A_{s, \text{загр}} \cdot X}\right).$$

В данном выражении учитывается тот факт, что отраженный луч света проходит слой загрязнений дважды.

Соответственно изменение коэффициента излучения поверхности вследствие осаждения на ней молекулярной пленки загрязнений

$$\Delta \varepsilon = (\varepsilon_{\text{загр}} - \varepsilon_{\text{пов}}) \left(1 - e^{-2A_{s, \text{загр}} \cdot X}\right).$$

Таким образом, что в данном выражении отмечен тот факт, что излучающий поток проходит через пленку загрязнения только один раз.

Было изучено влияние наличия молекулярной пленки загрязнения на некоторых поверхностях, относящихся к системам терморегулирования спутника. Это эмаль АК-512 белого и черного цвета, применяющаяся для окрашивания поверхностей КА, и липкая металлизированная лента марки «НИИКАМ-ПМ-ОА-Л» ТУ 2245-21680878-003-2001, используемая в конструкции каркасов солнечных батарей. В качестве термооптических характеристик молекулярных загрязнений использовали параметры типичного молекулярного загрязнения КА, приведенные в [7]. Величина интегрального $A_{S, \text{загр}}$ в видимом диапазоне волн составляет 0,8, в инфракрасном – 0,07, значение интегральной излучательной способности $\epsilon_{\text{загр}}$ для инфракрасного излучения равно 0,64.

Полученные функциональные зависимости изменения температуры поверхности материалов вследствие их загрязнения пленкой молекулярных загрязнений показаны на рис. 3. Критическое изменение температуры в 1% наступает при толщине пленки загрязнений около 0.02 мкм, что примерно соответствует 10 мг/м² или уровню А по стандарту [4].

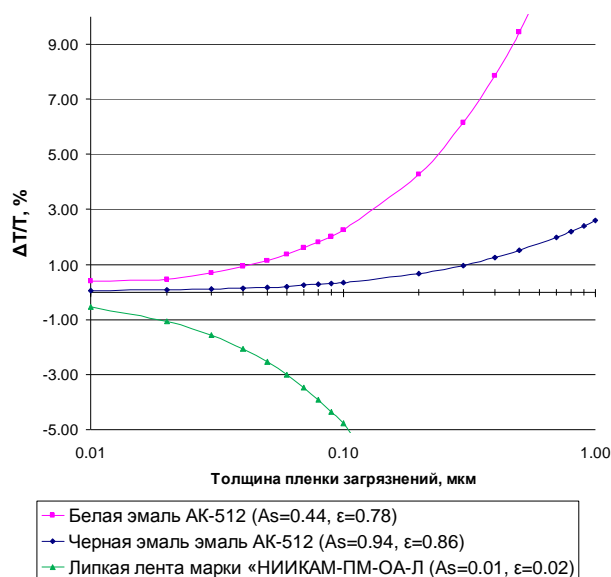


Рис. 3. Изменение температуры различных материалов, покрытых пленкой молекулярных загрязнений

Согласно [7] для поверхностей солнечных батарей, для которых загрязнение покровного стекла над фотопреобразователем приводит к тому, что к последнему попадет меньше света и его выходная мощность уменьшится, также безопасно наличие количества молекулярных загрязнений на поверхности 10 мг/м² или уровня А по стандарту [4]. Поэтому такой уровень был выбран в качестве требования к количеству молекулярных загрязнений КА и блоков полезной нагрузки вновь разрабатываемых РН.

Таким образом, на основе анализа вредного воздействия загрязнений на работу спутника и изучения современных мировых требований к уровню чистоты

ракетно-космических объектов для спутника EGYPTSAT-1 были предъявлены следующие требования к чистоте:

1. После завершения сборки и перед запуском поверхности спутника должны быть очищены до уровня 500 по механическим загрязнениям и уровню А по молекулярным загрязнениям в соответствии со стандартом [4]. Необходимо, чтобы чистота поверхности деталей, поступающих на сборку, соответствовала уровню «визуально чистый + ультрафиолет», что означает отсутствие на контролируемой поверхности каких-либо загрязнений, видимых в ультрафиолетовом освещении длиной волны 365 нм при мощности облучателя не менее 100 Вт.

2. Используемые в конструкции спутника материалы не должны являться источниками и накопителями загрязнений. Уровень газовыделений неметаллических материалов должен соответствовать требованиям [8], т.е. общая потеря массы материала не должна превышать 1%, а количество конденсирующихся летучих веществ – 0.1% от общей массы материала после его испытаний при температуре 125°C и давлении 10^{-4} Па в течение 24 часов.

3. Сборку спутника и подготовку его к пуску на космодроме необходимо осуществлять в чистом помещении, воздух которого соответствует следующим требованиям:

- запыленность - не хуже требований класса ISO 8 по [8];
- количество органических осадений из воздуха на поверхность не превышает 2 мг/м² в неделю.

4. Применяемые пиротехнические средства не должны быть источником молекулярных и механических загрязнений поверхностей спутника.

5. Детали и сборочные единицы спутника после очистки при межоперационном хранении и межцеховом транспортировании следует упаковать в двойные пылезащитные чехлы. Транспортировка спутника на космодром должна осуществляться в специальном контейнере.

Разработка конструкторской и эксплуатационной документации. Разработанные требования к чистоте были включены в выпускаемую конструкторскую документацию. Для выполнения операций очистки и реализации мер по предотвращению загрязнения поверхности элементов спутника на заводе-изготовителе и в условиях космодрома были выпущены специальные инструкции.

Согласно инструкции на сборку по обеспечению чистоты детали и сборочные единицы спутника проходят предварительную очистку в цехах-изготовителях до уровня «визуально-чистый по салфетке», о чем в сопроводительной документации делается отметка «Прошел предварительную очистку». Затем в цехе основной сборки перед поступлением в чистое помещение они подвергаются дополнительной очистке до уровня «визуально-чистый + ультрафиолет» с выполнением контроля чистоты с помощью ультрафиолетового осветителя.

Такому же контролю и доочистке подвергаются все покупные детали и составные элементы, изготавливаемые предприятиями-смежниками. После этой операции в сопроводительной документации делается отметка «Прошел очистку». Для снижения уровня газовыделений все детали и сборочные единицы спутника из неметаллических материалов подвергаются термовакуумной обработке при температуре 50_{-10}^{+5} °C и давлении 665 Па в течение 48 часов, после чего в сопроводительной документации делается отметка «Прошел термовакуумную обработку».

Спутника собирают в чистом помещении с контролируемым содержанием пылевых частиц и органических веществ в воздухе и соблюдением правил проведения работ в чистых помещениях. На сборку допускаются только детали с отметками «Прошел очистку» и «Прошел термовакуумную обработку» (для деталей из неметаллических материалов). После завершения сборки и испытаний спутника перед отправкой его на космодром выполняется количественный контроль механических и молекулярных загрязнений спутника.

Для выполнения операций контроля всех нормируемых параметров чистоты на заводе-изготовителе и космодроме также были выпущены соответствующие инструкции.

Согласно эксплуатационной инструкции по обеспечению чистоты после прибытия спутника на космодром очищают внешнюю поверхность контейнера. Затем контейнер со спутником направляют в чистое помещение, где спутник извлекают из контейнера и подготавливают к пуску. После завершения всех испытаний спутника выполняют его очистку и визуальный контроль чистоты поверхности в ультрафиолетовом излучении. Затем отбирают пробы для количественного контроля молекулярных и механических загрязнений.

Экспериментальная отработка. В ходе экспериментальной отработки было предложено использовать для снятия отпечатков контролируемой поверхности при контроле количества механических загрязнений поверхности скотч производства компании 3M, не оставляющий следов на контролируемой поверхности. Применение скотча 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.

Было также установлено, что для контроля количества молекулярных загрязнений в воздухе и на поверхности изделий может применяться н-гексан, ч.д.а., производства фирмы LAB-SCAN, Ирландия после дополнительной очистки путем перегонки. После этой операции фоновое загрязнение контрольной пробы не зафиксировано. Гексан отечественного производства требует двойной перегонки со скоростью не более 90 капель в минуту.

Определено, что оптимальным вариантом для проведения контроля количества молекулярных загрязнений поверхности являются салфетки из полиэфирной ткани SUPER POLX. Возможно применение салфеток из полиэфирной ткани MICROSEAL 1200 после выдержки в гексане. Установлено также, что для отбора проб при контроле количества молекулярных загрязнений поверхностей малой площади (что характерно для микроспутника) могут быть использованы аппликаторы типа TX 714A Large Alpha Swab. Методику контроля количества молекулярных загрязнений отработывали при изготовлении полномасштабной, силовой и инженерной моделей спутника.

Во время автономной отработки пиротехнических секатора и чеки определяли влияние их срабатывания на чистоту окружающих узлов. Для этих целей пиротехнический элемент срабатывал в предварительно очищенной емкости. После срабатывания емкость промывали очищенной дистиллированной водой, которую подвергали фильтрованию. Количество и размер осевших на фильтре частиц определяли под микроскопом. Затем путем расчетов было установлено, что срабатывание пиротехнического элемента не приведет к загрязнению узлов спутника более чем до уровня 500 по стандарту [4].

Обеспечение чистоты спутника при его изготовлении и подготовке к пуску. Мероприятия по обеспечению чистоты спутника при его изготовлении и подготовке к пуску осуществляли в соответствии с описанными выше инструкциями. При этом впервые на предприятии был выполнен контроль количества молекулярных загрязнений в воздухе и на поверхности.

Контроль количества молекулярных или органических загрязнений в воздухе осуществляли по скорости их осаждения на поверхность. Для этих целей в контролируемом помещении на определенный промежуток времени размещали специальные контрольные пластины. После экспозиции пластин смывали собранные органические вещества н-гексаном, полученную контрольную пробу выпаривали, а невыпаренный остаток взвешивали (рис.4).



Рис.4. Процесс выполнения замеров количества органических осадений из воздуха на поверхность

Для чистого помещения в цехе основной сборки спутников количество органических осадений из воздуха на поверхность не превышало 1 мг/м^2 в неделю, а для чистого помещения для подготовки спутников на космодроме – 1.87 мг/м^2 . Таким образом, величина этого параметра чистоты не превышала нормируемого требования (2 мг/м^2).

Количественному контролю чистоты поверхности спутника всегда предшествовал визуальный контроль на соответствие уровню «визуально чистый + ультрафиолет» с помощью ультрафиолетового осветителя (рис.5). При необходимости одновременно с контролем выполняли доочистку поверхности спутника.

Для контроля количества молекулярных загрязнений поверхности загрязнение смывали с определенной площади контролируемой поверхности салфеткой или аппликатором, смоченными в н-гексане. Затем проводили экстрагирование собранных загрязнений в том же гексане и полученную контрольную пробу анализировали описанным выше гравиметрическим методом. Результаты контроля количества молекулярных загрязнений поверхности спутника, представленные в таблице, показывают, что величина данного параметра чистоты поверхности спутника также соответствовала требованиям КД.



Рис.5. Выполнение визуального контроля чистоты поверхности спутника на соответствие уровню «визуально чистый + ультрафиолет» с помощью ультрафиолетового осветителя

Результаты контроля количества молекулярных загрязнений поверхности спутника

Место отбора пробы	Площадь смыва, м ²	Количество загрязнений в пробе, мг	Количество загрязнений на поверхности, мг/м ²
АИ 024 + БОС1-ССИК	0,1627	1.29	7.94
ЛЕМИ-016	0.0212	0.159	7.50
Экран ПТР	0.5476	2.39	4.37
Панель БС	0.5476	1.50	2.74
АИ 024 + БОС1-ССИК	0,1627	1.29	7.94
Требование КД			10

Контроль остальных параметров чистоты, в число которых входят запыленность воздуха в чистых помещениях, количество механических загрязнений поверхности спутника, уровень газовыделений неметаллических материалов, также был выполнен. Перед пуском была проведена верификация выполнения всех требований к чистоте перед заказчиком. Надежная работа спутника на орбите явилась лучшим свидетельством обеспечения его высокого уровня чистоты.

Выводы

1. Разработанная концепция обеспечения чистоты изделий ракетно-космической техники представляет собой целостную систему последовательных мероприятий, проведение которых позволяет достичь высокого уровня чистоты выпускаемых изделий и надежности выполнения их функций.

2. Эффективность работы данной концепции доказана при создании спутника Egyptosat-1.

Список литературы

1. Обеспечение чистоты запускаемых космических аппаратов: разработка требований по чистоте и методы контроля / Л.П. Потапович, В.Г. Тихий, А.М. Потапов, Л.П. Семенов, С.А. Засуха // Космічна наука і технологія. - 2007. – Т. 13, №6. – С. 46 – 57.
2. Ситало В.Г. Контроль чистоты для обеспечения требований, предъявляемых к космическим аппаратам // Технологические системы. – 2001. -№ 2. – С. 67 -69. / В.Г. Ситало, В.Г. Тихий, Л.П. Потапович.
3. Ситало В.Г. Обеспечение высокого уровня чистоты ракет-носителей – необходимое условие для запуска современных космических аппаратов // Космическая техника. Ракетное вооружение. – 2004. – Вып. 1. – С. 300-313. / В.Г. Ситало, В.Г. Тихий, Л.П. Потапович.
4. Военный стандарт США MIL-STD-1246C. Уровни чистоты изделий и программа контроля загрязнений, 11 апреля 1994 г. – 56 с.
5. Европейский стандарт ECSS-Q-70-01A. Обеспечение качества космических изделий. Контроль чистоты и загрязнений, 11 декабря 2002 г. – 90 с.
6. Общий курс физики. Оптика / под ред. акад. Г.С.Ландсберга.– М.: Наука, 1976. - 694 с.
7. Rockwell International Corporation Downey, CA. Contamination Control Engineering Design / A.C. Tribble, B. Boyadjian, J. Davis etc. // Guidelines for the Aerospace Community, NASA Contractor Report 4740, May 1996. - 126 p.
8. Европейский стандарт ECSS-Q-70-02A. Гарантирование космической продукции. Термовакuumные испытания на газовыделение для отбора материалов, предназначенных для космоса, 26 мая 2000 г. – 44 с.
9. Международный стандарт ISO 14644-1:1999. Производственные помещения повышенной чистоты и взаимосвязанные с ними регулируемые среды. – Ч. 1: Классификация степени чистоты воздуха, 1 мая 1999 г. - 20 с.