

**Технология статистического контроля свойств наноматериалов и покрытий в условиях воздействия ионизирующих излучений и оценки надежности изделий космической техники, созданных на их основе**

© Л.В. Эртман, В.Б. Рудаков, А.С. Бурцев,  
В.И. Бакланов, П.А. Филоненко

«НИИ КС имени А.А. Максимова» — филиал АО «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева», Московская область, г. Королёв, 141091, Россия

*С применением наноматериалов в изделиях космической техники сложилось противоречие между необходимостью обеспечения и подтверждения высокой надежности таких изделий и недостаточным объемом информации для получения достоверной оценки надежности ввиду отсутствия достаточных статистических данных о надежности изделий из наноматериалов. Для того чтобы устранить такое противоречие, была предложена технология, содержащая решение научно-технической задачи, направленной на повышение достоверности оценки надежности изделий космической техники. Для такой оценки нужно было использовать информацию о свойствах, параметрах и работоспособности наноматериалов и покрытий из них, а также об изготовленных из наноматериалов изделиях в процессе статистического контроля. Для этого потребовалось объединить информацию о надежности каждого из объектов последовательности «наноматериал — элемент из наноматериала — прибор — система — изделие». Кроме того, следовало повысить эффективность статистического контроля надежности данной последовательности по результатам моделирования, испытаний и натурной отработки с учетом рационального распределения затрат на проведение перечисленные действия.*

**Ключевые слова:** наноматериал, оценка надежности, технология, автоматизация, космический аппарат, программное обеспечение, прогнозирование, статистический контроль

**Введение.** Тенденция к миниатюризации и снижению энергопотребления при повышении общей эффективности системы, к уменьшению массы и габаритных размеров наглядно проявилась в области компьютерной техники и электроники. Достижения в этих областях стали одними из важнейших катализаторов, способствующих переходу от индустриальной к информационной эпохе развития человеческой цивилизации.

В настоящее время такие процессы в полной мере идут и в космической области, в которой создаются и эксплуатируются множество космических систем различных сложности и целевого назначения. Причем миниатюризация особенно актуальна, так как на запуск 1 кг массы полезной нагрузки на орбиту сейчас приходится затрачивать несколько десятков тысяч долларов. Однако создание экономи-

чески и функционально эффективной полезной нагрузки в перспективе станет возможным благодаря использованию нанотехнологий, которые позволят получить:

- помехоустойчивую высокопроизводительную связь благодаря применению квантовых электронных входных каскадов, реализуемых на основе нанотехнологий; в результате снижается уровень шумов входных каскадов, что приводит к увеличению дальности связи;
- сверхширокополосные оптические приемники (ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов), работающие без охлаждения, что особенно важно для микроспутников;
- градиентные концентраторы, многократно повышающие эффективность солнечных батарей на их основе;
- высокопроизводительные бортовые системы обработки информации, реализующие нейросетевые механизмы на основе молекулярной электроники и нанотехнологий;
- чувствительные и селективные (помехоустойчивые при высокой чувствительности) сенсорные устройства, необходимые для эффективного функционирования космических аппаратов (КА).

Цель настоящей работы — разработка технологии статистического контроля свойств наноматериалов и покрытий применительно к изделиям космической техники.

Анализ информационных источников показал, что уже разработаны перспективные экспериментальные образцы наноматериалов и покрытий из них, которые могут быть использованы при создании изделий космической техники, например:

- алмазоподобные покрытия, которые можно применять в качестве просветляющих покрытий в оптических приборах КА, работающих в инфракрасном диапазоне. Такие покрытия устойчивы к воздействию факторов космического пространства. Кроме того, алмазоподобные покрытия имеют низкий коэффициент трения в условиях воздействия низких температур космического пространства. Также их эффективно использовать для механических частей систем развертывания и позиционирования солнечных батарей, антенно-фидерных устройств и другого навесного оборудования КА;
- нановолокна Nafen, изготавливаемые путем контролируемого синтеза наноструктур  $Al_2O_3$  на поверхности расплава алюминия в присутствии специальных окислителей; они могут в течение длительного времени выдерживать разрушительное воздействие радиации и метеопыли. Нановолокна Nafen планируется применять при создании защиты нового поколения для солнечных батарей КА;
- полупроводниковые наноматериалы на основе нитрида галлия GaN — перспективного материала для микроэлектроники, так как полупроводниковые структуры на его основе устойчивы к ионизи-

рующей радиации. Высока вероятность того, что нанотехнологически модифицированный GaN будет обладать высокой устойчивостью к ионизирующему излучению;

– фотонные кристаллы с высокой степенью периодичности структуры способны послужить основой для солнечных батарей. Успешное создание подобных частиц, как отмечают исследователи, позволит повысить эффективность работы солнечных батарей примерно в 1,5 раза.

Установлено, что наноматериалы отличаются следующими структурными особенностями [1–3]:

– появлением нетрадиционных видов симметрии структуры и особых видов сопряжения границ раздела фаз;

– наличием ведущей роли процессов самоорганизации в структурообразовании, доминирующих над процессами искусственного упорядочения;

– высокой полевой активностью и каталитической избирательностью поверхности наночастиц и их ансамблей;

– особым характером протекания процессов передачи энергии, заряда и конформационных изменений, отличающихся низким энергопотреблением, высокой скоростью и синергетическими признаками.

Структурные особенности наноматериалов обусловили их уникальные кинетические, электрические, магнитные и механические свойства. Кроме того, радиационные эффекты, возникающие под действием ионизирующего излучения в наноструктурах и созданных на их основе материалах, обладают рядом особенностей по сравнению с аналогичными эффектами в объектах, размеры которых лежат в микро- и макродиапазонах. Так, для наноструктурированных материалов характерно наличие большего количества поверхностей раздела, что обеспечивает эффективный механизм стока смещенных атомов на эти поверхности, препятствующий накоплению радиационных дефектов в объеме зерен. Процессы образования в таких материалах носителей заряда и дефектов структуры под действием ионизирующего излучения, равно как последующие процессы перемещения и исчезновения носителей и дефектов, существенно отличаются от соответствующих процессов, наблюдаемых в обычных материалах. Следует отметить, что влияние особенностей указанных процессов на радиационное повреждение наноматериалов неоднозначно. Вместе с тем представляется целесообразным учитывать связь между устойчивостью наноструктур к образованию и накоплению радиационных дефектов и радиационной стойкостью наноматериалов, определяемой по изменению их эксплуатационных характеристик.

Можно полагать, что изделия космической техники, как выполненные из наноматериалов, так и с покрытиями из них, окажутся более долговечными, чем изготовленные традиционными способами, более надежными и работоспособными в условиях длительного воздействия факторов космического пространства в процессе длительной эксплуатации — в течение 10 лет и более.

Примером изделия космической техники со сложной иерархической структурой может служить КА, его составные части и системы, например, бортовой комплекс целевой аппаратуры и космическая платформа, состоящие из большого количества приборов и модулей бортовой аппаратуры различного назначения (бортовая цифровая вычислительная машина, бортовая информационная система, система управления, система электроснабжения, двигательная установка и др.). Каждый прибор и модуль бортовой аппаратуры содержит множество элементов, представляющих конструктивно неделимые изделия.

Следует отметить, что КА и его составные части относятся к классу технических объектов, обладающих высокой конструктивной и технологической сложностью, высокой стоимостью проведения испытаний и контроля при отработке. Они включают в себя большое количество разнородных комплектующих элементов и деталей, к надежности которых предъявляются высокие требования. Наличие иерархической структуры полностью определяет характер организации наземной отработки КА, которую проводят строго поэтапно и последовательно, испытывая составные его части по мере возрастания иерархических уровней. После успешных отработочных испытаний и контроля элементов низших иерархических уровней переходят к автономным испытаниям и контролю систем, а после них проводят комплексные испытания и контроль КА как изделия самого высшего иерархического уровня. При этом на каждом уровне контролируется работоспособность, дается ее оценка и проводится контроль технических характеристик и параметров элементов, приборов, систем и КА в целом, а также характеристик надежности, после чего принимаются меры по доведению полученных значений до требуемого уровня.

Успешное решение задач отработки КА неразрывно связано с правильным выбором объектов испытаний на каждом иерархическом уровне, а также условий и режимов их проведения, которые зависят от нескольких противоположно действующих факторов: требований заказчика; наличия персонала и оборудования для проведения испытаний; стоимости испытаний и контроля, включая затраты на контрольно-испытательное оборудование; времени проведения каждого испытания; стоимости испытываемых элементов, систем и в целом КА. Одновременно с выбором объектов испытаний, их конкретных характеристик и свойств должны быть определены входные

условия и внешние факторы, так как выделение подлежащих проверке характеристик лишено смысла, если не будут установлены условия испытаний и контроля. Понятно, что невозможно проконтролировать все технические характеристики и свойства элемента на каждом испытательном режиме (за исключением наиболее простых элементов), а также обеспечить весь спектр нагрузок и режимов во всем их диапазоне. Это обуславливает важную особенность контроля оборудования КА при отработке и производстве: объемы испытаний и глубина контроля испытываемых элементов, систем и КА в целом ограничены, т. е. оценки вероятностных или технических характеристик соответствующих иерархических уровней КА, которые базируются на ограниченном объеме информации и являются случайными, что вызывает необходимость привлечения статистических методов контроля. Однако сочетание необходимости подтверждения высоких требований к надежности, с одной стороны, и ограниченных объемов испытаний при отработке, с другой, накладывает жесткие ограничения на возможности статистического оценивания и контроля показателей надежности КА как структурно-иерархической системы. Это составляет одну из главных особенностей статистического контроля надежности изделий космической техники в процессе наземной отработки.

С появлением уникальных комплектующих из наноматериалов для космической техники, априорная информация о надежности которых отсутствует, появилась потребность в разработке таких методов статистического контроля надежности этих изделий, которые позволят обеспечить с требуемой достоверностью подтверждение их надежности в условиях ограниченного объема статистической информации. Кроме того нужно отметить, что мероприятия статистического контроля изделий космической техники сопряжены с дополнительными временными и стоимостными затратами, связанными с изготовлением их опытных партий для проведения испытаний, эксплуатацией стендовой базы, затратами на обслуживающий персонал. Следовательно, они нуждаются в научно-обоснованном планировании с целью рационального распределения выделяемых средств.

В процессе статистического контроля для повышения достоверности получаемых оценок надежности сейчас используется априорная и экспериментальная информация о надежности последовательности объектов «элемент — прибор — система — изделие» по результатам моделирования, испытаний и натурной отработки. Достоверность ее оценки определяется объемом статистической информации о надежности указанной выше последовательности. Одним из способов повышения достоверности ее оценки может быть увеличение глубины статистического контроля изделий космической техники за счет использования информации о свойствах материалов

(наноматериалов) и изготовленных на их основе изделий по результатам статистического контроля.

Таким образом, применительно к изделиям космической техники, изготовленным из наноматериалов и с покрытиями из них, актуальной является разработка технологии статистического контроля свойств наноматериалов и покрытий из них в условиях воздействия ионизирующих излучений. Кроме того, важна оценка надежности изделий космической техники, созданных на основе таких материалов (далее — технология). Причем необходимо, чтобы при выполнении такой оценки можно было использовать дополнительную информацию для повышения ее достоверности и контроля надежности в условиях ограниченного объема статистической информации. Наряду с этим требуется определить необходимый объем и глубину статистического контроля свойств наноматериалов и покрытий из них, а также изделий космической техники, в которых они применяются, и обеспечить рациональное распределение ресурсов, затрачиваемых на проведение такого контроля.

**Постановка задачи.** С началом применения наноматериалов в изделиях космической техники сложилось противоречие между необходимостью обеспечения и подтверждения высокой надежности этих изделий и недостаточным объемом информации для получения достоверной ее оценки из-за отсутствия достаточных статистических данных об их надежности.

Для того чтобы устранить сложившееся противоречие, потребуется решить научно-техническую задачу, направленную на повышение достоверности оценки надежности изделий космической техники на основе использования информации о свойствах, параметрах и работоспособности наноматериалов и покрытий, а также изготовленных из наноматериалов изделий в процессе статистического контроля путем объединения информации о надежности последовательности объектов «наноматериал — элемент из наноматериала — прибор — система — изделие» и повышение эффективности статистического контроля надежности последовательности объектов «наноматериал — элемент из наноматериала — прибор — система — изделие» по результатам моделирования, испытаний и натурной отработки с учетом рационального распределения затрат на проведение испытаний. Анализ открытых отечественных источников информации показал, что решение представленной задачи на основе результатов моделирования, испытаний и натурной отработки с учетом рационального распределения затрат на их проведение осуществляется впервые в РФ.

Постановку задачи оптимизации статистического контроля свойств новых наноматериалов и покрытий из них, а также надежности изделий космической техники, созданных с применением таких материалов, можно представить следующим образом.

Дано:

- общее количество свойств наноматериалов и параметров элементов  $N_{пэ}$ , подлежащих контролю;
- совокупность подлежащих контролю элементов  $S_{сэ}$ , созданных на основе наноматериалов;
- общее количество подлежащих контролю параметров изделий  $N_{пи}$ , состоящих из элементов  $S_{сэ}$ , созданных на основе наноматериалов.

Требуется:

- составить рациональный план статистического контроля свойств новых наноматериалов и покрытий из них, а также оценки надежности изделий космической техники, созданных на основе этих материалов, путем минимизации системы целевых функций потерь:

$$Y = \{ \min C_э, \min C_{сэ}, \min C_{пи} \}. \quad (1)$$

Здесь  $C_э$  — целевая функция потерь в процессе контроля свойств наноматериалов и параметров элементов  $X_{пэ}$ :

$$C_э = f(X_{пэ}, \alpha_э, \beta_э), 0 < X_{пэ} < N_{пэ}, \quad (2)$$

где  $\alpha_э$  и  $\beta_э$  — оптимальные значения рисков 1-го и 2-го рода в процессе контроля свойств наноматериалов и параметров элементов  $X_{пэ}$ ;  $C_{сэ}$  — целевая функция потерь в процессе контроля совокупности элементов  $X_{сэ}$ , созданных на основе наноматериалов:

$$C_{сэ} = \varphi(X_{сэ}, \alpha_{сэ}, \beta_{сэ}), 0 < X_{сэ} < S_{сэ}, \quad (3)$$

где  $\alpha_{сэ}$  и  $\beta_{сэ}$  — оптимальные значения рисков 1-го и 2-го рода в процессе контроля совокупности элементов  $X_{сэ}$ , созданных на основе наноматериалов;  $C_{пи}$  — целевая функция потерь в процессе контроля параметров изделий  $X_{пи}$ , состоящих из элементов, созданных на основе наноматериалов:

$$C_{пи} = \psi(X_{пи}, \alpha_{пи}, \beta_{пи}), 0 < X_{пи} < N_{пи}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{пи}$  и  $\beta_{пи}$  — оптимальные значения рисков 1-го и 2-го рода в процессе контроля параметров изделий  $X_{пи}$ , состоящих из элементов, созданных на основе наноматериалов.

Каждая из приведенных выше целевых функций (2–4) в свою очередь представляет собой математическое ожидание потерь, которые содержат три составляющие: экономические, связанные с ошибочной браковкой годного элемента или изделия (удовлетворяющего заданным требованиям); экономические, обусловленные ошибочной приемкой дефектного элемента или изделия (не удовлетворяющего заданным требованиям); затраты на контроль последовательности объектов «наноматериал — элемент из наноматериала — прибор — система — изделие».

Оптимальный план статистического контроля должен включать:

– оптимальный план контроля каждого электронного элемента, т. е. оптимальную номенклатуру  $X_{пэ}$  технических параметров, подлежащих обязательному контролю из общего количества параметров  $N_{пэ}$ , а также оптимальные значения рисков 1-го и 2-го рода  $\alpha_э$  и  $\beta_э$ ;

– оптимальные планы контроля совокупностей элементов, т. е. оптимальную номенклатуру элементов  $X_{сэ}$ , подлежащих обязательному контролю от соответствующих совокупностей  $S_{сэ}$ , и оптимальные значения соответствующих рисков 1-го и 2-го рода  $\alpha_{сэ}$  и  $\beta_{сэ}$  с учетом результатов контроля элементов на предыдущих уровнях иерархии;

– оптимальный план контроля каждого изделия, состоящего из совокупности элементов, как стоящего на более высоком иерархическом уровне, т. е. оптимальную номенклатуру  $X_{пи}$  технических параметров изделия, подлежащих обязательному контролю из общего количества параметров  $N_{пи}$ , и оптимальные значения рисков 1-го и 2-го рода  $\alpha_{и}$  и  $\beta_{и}$ .

**Решение задачи определения оптимального плана статистического контроля.** Такую задачу выполняют в четыре этапа.

1. Перед началом испытаний формируют оптимальные планы проведения контроля совокупности:

– свойств и параметров используемых новых наноматериалов и покрытий из них;

– элементов, выполненных из этих наноматериалов;

– всех параметров изделия.

2. По оптимальному плану проводят контрольные испытания совокупности свойств и совокупности параметров новых наноматериалов и покрытий, по результатам которых уточняют параметры оптимальных планов контроля совокупности элементов и совокупности параметров изделия (прибора, системы).

3. По уточненному оптимальному плану проводят контрольные испытания совокупности элементов, по результатам которых уточняют параметры оптимальных планов контроля совокупности параметров изделия (прибора, системы).

4. По уточненному оптимальному плану проводят контрольные испытания совокупности параметров изделия (прибора, системы).

Объектом контроля рассматриваемой технологии служат изготовленные из наноматериалов и с покрытиями из них изделия космической техники, предназначенные для функционирования в условиях длительного воздействия факторов космического пространства. Методической основой этой технологии служат математические модели и алгоритмы статистического контроля свойств наноматериалов и покрытий из них для таких изделий и оценки надежности последних.



Основные методические положения статистического контроля сложных систем приведены в работах [4–9]. Исходными данными для такого контроля могут быть результаты, полученные при проведении математического и статистического моделирования, натурной отработки и лабораторных испытаний, в процессе которых воспроизводятся условия функционирования, приближенные к реальным.

Для математического и статистического моделирования исходными данными являются физические параметры наноматериалов и покрытий из них, а также модели воздействия ионизирующего излучения космического пространства. Для проведения математического и статистического моделирования используют аппаратно-программные комплексы. Обзор и анализ направлений развития математических моделей наноматериалов и нанотехнологий приведены в работе [10].

При наземной отработке исходными данными для статистического контроля по результатам проведения испытаний являются технические параметры наноматериалов и покрытий из них, полученные методами инструментального контроля, а кроме того, технические параметры изделий, созданных с применением наноматериалов и покрытий из них.

Лабораторные установки, применяемые при изучении радиационной стойкости материалов и элементов оборудования КА, в частности элементов электронного оборудования, принято подразделять на два класса:

– моделирующие установки, в которых создаются ионизирующие излучения той же физической природы, что и в космическом пространстве, т. е. потоки электронов, протонов и более тяжелых ионов (источниками излучений в моделирующих установках чаще всего служат ускорители разных типов);

– имитирующие установки, с помощью которых в исследуемых объектах воспроизводятся доминирующие радиационные эффекты, характерные для условий эксплуатации объектов в космическом пространстве, при использовании в качестве воздействующих факторов мощного рентгеновского излучения, гамма-излучения, импульсного лазерного излучения, потока нейтронов и т. п.

Для натурной отработки в качестве исходных данных для статистического контроля применяют полученные по каналам телеметрии количественные показатели технических параметров изделий, созданных на основе наноматериалов и покрытий из них. Техническими средствами для проведения натурной отработки наноматериалов и покрытий из них, а также изделий, созданных с их использованием, являются специализированные космические аппараты.

Средствами инструментального контроля технических параметров наноматериалов и покрытий из них по результатам ускоренных испытаний могут служить микроскопы, спектрометры, фотометриче-

ские спектроэллипсометры, рентгеновские дифрактометры, твердомеры, трибометры и другие измерительные устройства.

Средствами контроля технических параметров изделий, созданных на основе наноматериалов и покрытий из них, по результатам ускоренных испытаний являются вольтметры, амперметры, омметры и другие приборы.

Представленная технология в условиях длительного воздействия различных факторов космического пространства, в числе которых естественные радиационные пояса Земли, галактические космические лучи, солнечные космические лучи, частицы холодной и горячей плазмы, на части для КА, изготовленные из новых наноматериалов и с применением покрытий из них, позволит проводить статистический контроль следующих свойств и параметров таких изделий:

- проводимости; удельного электрического сопротивления; индуктивности; диэлектрической проницаемости, относительной диэлектрической проницаемости, степени черноты; объемной плотности вещества;

- прочности при растяжении, при изгибе, при отслаивании, при сжатии, при сдвиге, при ударе, при отрыве, адгезионной прочности; твердости; вязкости; адгезии; жесткости;

- модуля упругости; относительного удлинения при разрыве; ударной вязкости;

- пробивного напряжения; цементирующей способности; стрелы прогиба; сопротивления надрыву; жесткости по разрушению кольца;

- коэффициента отражательной способности солнечной радиации;

- тангенса угла диэлектрических потерь; электрическую прочность.

К таким новым наноматериалам и покрытиям из них относятся углеродные нанотрубки, графен, наноструктурированные пленки, гранулированные и мультислойные структуры. С их применением изготавливают предназначенные для КА полупроводники (диоды, транзисторы, микросхемы); вакуумные приборы; сенсоры; микродвигатели; датчики; солнечные батареи; фотоэлементы; электротехнические комплектующие (соединения, кабели, жгуты). Предлагаемая технология дает возможность контролировать такие их параметры, как сопротивление, волновое сопротивление, прямое падение напряжения, обратный ток, коэффициент передачи тока, ток стока, ток отсечки, крутизну стокзатворной характеристики, ток утечки, коэффициент шума, емкость перехода, пороговое напряжение, ток короткого замыкания, напряжение холостого хода.

Показателями надежности изделий космической техники могут быть приняты среднее время безотказной работы, интенсивность отказов и вероятность безотказной работы.

Исследования свойств наноматериалов и покрытий из них, а также надежности изделий космической техники проводятся в следующей последовательности. На основании анализа исходных данных формулируют требования к лабораторному испытательному оборудованию, математическим моделям и программам, которые можно использовать для изучения воздействия космической радиации. Затем с учетом этих требований выбирают наиболее подходящие экспериментальные методы и установки, а также математические модели и программы.

Экспериментальные и математические методы можно использовать совместно, чтобы они дополняли друг друга. Натурную отработку следует организовать с учетом результатов лабораторных исследований и математического моделирования.

Совокупность данных, получаемых всеми использованными методами, применяют для построения моделей деградации наноматериалов и элементов из них в различных условиях эксплуатации. В результате получают расчетно-экспериментальную оценку радиационной стойкости наноматериалов и элементов из них при воздействии факторов космического пространства и выполняют прогнозирование показателей радиационной стойкости и работоспособности наноматериалов и элементов из них.

Следует отметить, что уже появился научно-технический задел для моделирования воздействия ионизирующего излучения космического пространства на изделия космической техники. Существующие программные средства способны моделировать взаимодействие ионизирующих излучений с неоднородными микроструктурами и макроструктурами сложной конфигурации. Наряду с созданием моделей воздействия ионизирующего излучения космического пространства появилось и программно-алгоритмическое обеспечение для моделирования свойств наноматериалов и покрытий из них. Известные программные средства позволяют проводить расчет физико-химических свойств структур и процессов, происходящих на наноразмере, определение фундаментальных свойств (структуры электронных уровней и концентрации носителей) и таких важнейших эксплуатационных характеристик, как электропроводность и оптические параметры наноматериалов. Кроме того, стало возможным выполнять расчет электронной структуры в атомном масштабе.

Необходимо отметить, что математическое моделирование воздействия факторов космического пространства на наноструктуры, наноматериалы и изготовленные из них элементы конструкции и оборудования КА отличается рядом особенностей. Происходящие изменения свойств материалов определяются структурными параметрами и процессами, относящимися к различным пространственным масштабам: от размеров атомов и молекул до размеров рас-

сматриваемых изделий. Для наноматериалов определяющую роль в указанной размерной последовательности играют входящие в их состав наночастицы и наноструктуры. Следовательно, при математическом описании свойств и поведения в условиях космического пространства объектов, созданных с использованием наноматериалов, необходимо принимать во внимание и уметь моделировать процессы, протекающие в наноразмерных структурах. Необходимо выявлять и учитывать в моделях разнообразные связи указанных процессов с процессами, характерными для других пространственных масштабов.

Таким образом, в общем случае требуется применять многомасштабное моделирование, основанное на использовании некоторой совокупности расчетных методов. При этом основной проблемой реализации многомасштабного моделирования является передача данных, полученных при моделировании на одном размерном уровне, в модель другого, более высокого размерного уровня, где они используются в качестве исходных данных (в том числе совместно с другими привлекаемыми данными) при проведении расчетов. Дополнительные сложности возникают в связи с тем, что зависимость макроскопических свойств материалов от особенностей структуры материалов на более низких размерных уровнях и от характера процессов, протекающих на этих уровнях, часто оказывается нелинейной. К тому же в условиях длительного воздействия факторов космического пространства, включая естественные радиационные пояса Земли, галактические космические лучи, солнечные космические лучи, частицы холодной и горячей плазмы, такая зависимость будет сложно определяемой.

В представленной технологии предусмотрено, что по результатам модельных экспериментов и лабораторных испытаний, причем ускоренных, наноматериалов и элементов из них формируются статистические выборки, характеризующие изменение параметров-критериев годности во времени под влиянием длительного воздействия ионизирующего излучения космического пространства. На основе статистических выборок проводится прогнозирование таких параметров годности наноматериалов и элементов из них.

Для получения прогнозных оценок долговечности изделий из наноматериалов можно применить два подхода:

- исследование физико-химических процессов, протекающих в элементах изделий космической техники (физические методы прогнозирования);
- математическое моделирование процесса деградации (методы статистического прогнозирования).

В физических методах прогнозирования показатели надежности могут быть представлены как функции физико-химических характеристик и параметров элементов и скорости их изменения в зависимо-

сти от воздействия различных факторов. При этом текущие состояния элементов и систем можно описать уравнениями, отражающими физические закономерности.

С помощью методов статистического прогнозирования на основе полученных статистических выборок определяется динамика изменения параметров-критериев годности наноматериалов и изделий из этих материалов на весь период их эксплуатации. Кроме того, прогнозируется момент превышения предельно допустимых значений параметров-критериев годности, что будет принято как момент наступления отказа.

По результатам статистического контроля изделие считается работоспособным, если значения его технических параметров лежат в пределах установленного поля допуска, а продолжительность работоспособного состояния наноматериалов и изделий из них до наступления отказа будет равняться наработке до отказа. Указанная величина используется для оценки интенсивности отказов и определения вероятности безотказной работы элементов из наноматериалов.

Полученные значения интенсивности отказов и вероятности безотказной работы элементов из наноматериалов служат дополнительным источником информации о надежности КА. Они позволяют решать научно-техническую задачу повышения достоверности оценки надежности на основе использования информации о свойствах, параметрах и работоспособности наноматериалов и изделий, изготовленных с их применением, в процессе статистического контроля. Для этого объединяется информация о надежности последовательности объектов «наноматериал — элемент из наноматериала — прибор — система — изделие» по результатам моделирования, испытаний и натурной отработки.

Технология позволяет наметить оптимальный план статистического контроля свойств новых наноматериалов и покрытий из них, а также последовательность оценки надежности изделий космической техники из наноматериалов путем минимизации системы целевых функций потерь и использования информации о свойствах, параметрах и работоспособности наноматериалов и изделий, изготовленных с их применением, в процессе статистического контроля путем объединения информации о надежности последовательности объектов «наноматериал — элемент из наноматериала — прибор — система — изделие».

В качестве примера реализации представленной технологии был проведен контрольный расчет параметров плана иерархического контроля бортового вычислительного устройства (БВУ) космического аппарата при экспериментальных испытаниях отработки. Входящее в состав бортового комплекса управления БВУ обеспечивает выполнение основных функций: командное управление бортовой аппарату-

рой; телеметрический контроль бортовой аппаратуры; формирование бортового времени. Для изготовления БВУ необходима совокупность электрорадиоизделий (ЭРИ) 18 типов, включая интегральные схемы (ИС), полупроводниковые приборы (ПП), транзисторы и другие электронные элементы. Каждый из ЭРИ имеет определенное количество независимых параметров, к числу которых относятся изменение тока потребления, величина рассеиваемой мощности, симметрия дифференциальных каскадов, изменение обратного тока, однородность токораспределения и другие показатели, определенные в технических условиях (ТУ) на изготовление этих элементов.

Бортовое вычислительное устройство как электронное изделие в целом имеет 12 независимых технических параметров, в том числе определяющих величину входного и выходного напряжения, форму сигнала при различных условиях, а также другие, указанные в ТУ на изготовление БВУ. С использованием разработанной технологии получены параметры оптимального плана иерархического контроля совокупности электронных элементов и БВУ в целом.

Результаты расчетов показали, что из совокупности электронных элементов 18 типов подлежат обязательному контролю четыре элемента, причем минимальные потери составят 62,28 ед. Также выяснилось, что если не проводить контроль ни одного элемента совокупности, потери увеличиваются до 109 ед., т. е. в 1,8 раза, ввиду ошибочной приемки в эксплуатацию дефектных изделий. Если проводить сплошной контроль всей совокупности электронных элементов, то потери возрастут более чем в 3 раза из-за ошибочной браковки годных изделий и выполнения их контроля.

**Заключение.** Анализ разработанной технологии показал, что проведение испытаний по приведенному выше сформированному оптимальному плану позволяет повысить эффективность статистического контроля. Положительный эффект от применения такой технологии заключается в следующем:

- учет результатов предшествующего контроля совокупности элементов из наноматериалов и покрытий из них уменьшает ожидаемые потери при контроле, вызванные принятием неправильных решений;
- использование первичной информации о работоспособности элементов из наноматериалов и покрытий из них в процессе анализа и прогнозирования надежности изделий космической техники помогает повысить достоверность ее оценки;
- реализация технологии позволяет примерно в 1,8 раза сократить экономические потери за счет рационального планирования объема статистического контроля.

При разработке рассмотренной технологии были созданы и использованы:

– программно-алгоритмическое обеспечение для анализа и прогнозирования надежности изделий космической техники на основе первичной информации о работоспособности элементов из наноматериалов и покрытий из них;

– программно-алгоритмическое обеспечение статистического контроля надежности изделий космической техники с учетом рационального распределения затрат на проведение испытаний.

Научная новизна данной технологии заключается в том, что совокупность разработанных научно-технических решений позволяет использовать результаты моделирования и инструментального контроля свойств наноматериалов и покрытий из них, применяемых для изготовления элементов космической техники, функционирующих в условиях длительного воздействия факторов космического пространства. Полученные данные целесообразно использовать в качестве первичной дополнительной информации для оценки надежности таких изделий, что позволит повысить точность и достоверность оценки их надежности.

Представленная технология выполнена на уровне современных отечественных и зарубежных научно-технических разработок в области автоматизации сбора и обработки информации о надежности сложных изделий. Ее имеет смысл использовать на предприятиях ракетно-космической отрасли для автоматизированной оценки и анализа надежности перспективных образцов космических средств, в состав которых входят изделия из наноматериалов и покрытий из них.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Антоненко С.В., Малиновская А.С., Мальцев С.Н. Различные вариации углерода и их применение. Новые углеродные нанобъекты. *Нанотехника*, 2007, № 11, с. 8–14.
- [2] Vul Ya., Aleksenskiy A.E., Dideykin A.T. Detonation nanodiamonds: technology, properties and applications. *Nanosciences and Nanotechnologies*. In: V.N. Kharkin, C. Bai, S.-C. Kim, ed. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. Developed under the Auspices of the UNESCO. Eolss Publishers, 2009, Oxford, UK, pp. 486–494.
- [3] Ханник Р., Хилл А., ред. *Мир материалов и технологий. Наноструктурные материалы*. Москва, Техносфера, 2009, 488 с.
- [4] Меньшиков В.А., Рудаков В.Б., Сычев В.Н. *Контроль качества космических аппаратов при отработке и производстве*. Москва, Машиностроение, 2009, 400 с.
- [5] Волков Л.И. *Управление эксплуатацией летательных комплексов*. Москва, Высшая школа, 1987, 400 с.
- [6] Волков Л.И., Рудаков В.Б. *Статистический контроль иерархических систем*. Москва, Изд-во СИП РИА, 2002, 360 с.
- [7] Савин Г.И. *Системное моделирование сложных процессов*. Москва, Фазис, 2000, 275 с.
- [8] Макаров М.И., Рудаков В.Б., Макаров В.М. Задачи совершенствования методов планирования и проведения наземной отработки автоматических космических аппаратов. *Двойные технологии*, 2015, № 3, с. 9–17.

- [9] Рудаков В.Б., Макаров В.М. Анализ методов статистического контроля и возможность их использования для наземной отработки автоматических космических аппаратов. *Двойные технологии*, 2016, № 3, с. 2–11.
- [10] Обзор и анализ направлений развития математических моделей наноматериалов и нанотехнологий. Нанотехнологии функциональных материалов (НФМ'16). *Тр. Междунар. научно-техн. конф., 21–25 июня 2016 года. В 2 т., т. 2*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического ун-та, 2016, 465 с.

Статья поступила в редакцию 20.03.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Эртман Л.В., Рудаков В.Б., Бурцев А.С., Бакланов В.И., Филоненко П.А. Технология статистического контроля свойств наноматериалов и покрытий в условиях воздействия ионизирующих излучений и оценки надежности изделий космической техники, созданных на их основе. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-9-2018>



**Эртман Леонид Викторович** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, начальник комплекса, «НИИ КС имени А.А. Максимова» — филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева». Научные интересы и область деятельности: системные исследования обеспечения безопасности и научно-технического сопровождения технического и авторского надзора в процессе эксплуатации и испытаний сложных систем. e-mail: ertman@list.ru



**Рудаков Валерий Борисович** — д-р техн. наук, профессор, советник директора, «НИИ КС имени А.А. Максимова» — филиал АО «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева». Научные интересы и область деятельности: системные исследования методов контроля сложных систем, оптимизации и управления рисками. e-mail: baklanov@niiks.com



**Бурцев Александр Сергеевич** — канд. техн. наук, главный научный сотрудник сектора, «НИИ КС имени А.А. Максимова» — филиал АО «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева». Научные интересы и область деятельности: системные исследования обеспечения надежности сложных систем. e-mail: baklanov@niiks.com



**Бакланов Владимир Игоревич** — канд. техн. наук, начальник лаборатории, «НИИ КС имени А.А. Максимова» — филиал АО «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева». Научные интересы и область деятельности: системные исследования обеспечения надежности сложных систем. e-mail: baklanov\_vi@mail.ru



**Филоненко Павел Альбертович** — канд. техн. наук, главный научный сотрудник сектора, «НИИ КС имени А.А. Максимова» — филиал АО «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева». Научные интересы и область деятельности: системные исследования автоматизации информационного обеспечения испытаний и эксплуатации сложных систем. e-mail: hardnm@gmail.com



## **Technology of statistical control of the properties of nanomaterials and coatings exposed to ionizing radiation and assessment of the reliability of nanomaterial space products**

© L.V. Ertman, V.B. Rudakov, A.S. Burtsev,  
V.I. Baklanov, P.A. Filonenko

Maksimov Research Institute of Space Systems, branch of JSC Khrunichev State Research and Production Space Center, Korolyov, Moscow Region, 141091, Russia

*Since space engineering started using nanomaterials, there has emerged a contradiction between the need to ensure and confirm high reliability of space products and scarce information to obtain an accurate assessment of reliability due to the lack of sufficient statistics on the reliability of nanomaterial products. To eliminate such a contradiction, we introduce a technology which appears to solve a scientific and technical problem aimed at increasing the accuracy of assessing the reliability of space products. The solution is based on information on the properties, parameters and performance of nanomaterials and coatings and nanomaterial products in the process of statistical control. It is done by combining the information on reliability of the “nanomaterial — nanomaterial element — device — system — product” sequence and increasing the efficiency of statistical control of this sequence reliability according to the results of simulation, testing and field testing and taking into account rational distribution of costs for testing.*

**Keywords:** *nanomaterial, reliability assessment, technology, automation, spacecraft, software, forecasting, statistical control*

### REFERENCES

- [1] Antonenko S.V., Malinovskaya A.S., Maltsev S.N. *Nanotekhnika — Nanotechnics*, 2007, no. 11, pp. 8–14.
- [2] Vul Ya., Aleksenskiy A.E., Dideykin A.T. Detonation nanodiamonds: technology, properties and applications. Nanosciences and Nanotechnologies. In: V.N. Khar-kin, C. Bai, S.-C. Kim, ed. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. Developed under the Auspices of the UNESCO. Oxford, UK, Eolss Publ., 2009, pp. 486–494.
- [3] Khannink R., Khill A., ed. *Mir materialov i tekhnologii. Nanostrukturnye materialy* [The world of materials and technologies. Nanostructured materials]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2009, 488 p. (In Russ.)
- [4] Menshikov V.A., Rudakov V.B., Sychev V.N. *Kontrol kachestva kosmicheskikh apparatov pri otrabotke i proizvodstve* [Quality control of spacecraft during development and production]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009, 400 p.
- [5] Volkov L.I. *Upravlenie ekspluatatsiyey letatelnykh kompleksov* [Aircraft operational control]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987, 400 p.
- [6] Volkov L.I., Rudakov V.B. *Statisticheskii kontrol ierarkhicheskikh sistem* [Statistical control of hierarchical systems]. Moscow, SIP RIA Publ., 2002, 360 p.
- [7] Savin G.I. *Sistemnoe modelirovanie slozhnykh protsessov* [System modeling of complex processes]. Moscow, Fazis Publ., 2000, 275 p.
- [8] Makarov M.I., Rudakov V.B., Makarov V.M. *Dvoynye tekhnologii (Dual Technologies)*, 2015, no. 3, pp. 9–17.

- [9] Rudakov V.B., Makarov V.M. *Dvoynye tekhnologii (Dual Technologies)*, 2016, no. 3, pp. 2–11.
- [10] Obzor i analiz napravleniy razvitiya matematicheskikh modeley nanomaterialov i nanotekhnologii. [Review and analysis of directions for the development of mathematical models of nanomaterials and nanotechnologies]. *Tr. Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Nanotekhnologii funktsionalnykh materialov (NFM'2016), 21–25 iyunya 2016 goda* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. Nanotechnologies of Functional Materials (NFM'2016), June 21–25, 2016.]. In 2 vols., vol. 2. St. Petersburg, SPBSTU Publ., 2016, 465 p.

**Ertman L.V.**, Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Fellow, Head of the Complex, Maksimov Research Institute of Space Systems, branch of JSC Khrunichev State Research and Production Space Center. Research interests: system research of safety assurance and scientific and technical support of technical and field supervision during the operation and testing of complex systems. e-mail: ertman@list.ru

**Rudakov V.B.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Director's Advisor, Maksimov Research Institute of Space Systems, branch of JSC Khrunichev State Research and Production Space Center. Research interests: system research of methods for controlling complex systems, optimization and risk management. e-mail: baklanov@niiks.com

**Burtsev A.S.**, Cand. Sc. (Eng.), Chief Research Fellow of the Sector, Maksimov Research Institute of Space Systems, branch of JSC Khrunichev State Research and Production Space Center. Research interests: system research of safety assurance of complex systems. e-mail: baklanov@niiks.com

**Baklanov V.I.**, Cand. Sc. (Eng.), Head of the Laboratory, Maksimov Research Institute of Space Systems, branch of JSC Khrunichev State Research and Production Space Center. Research interests: system research of safety assurance of complex systems. e-mail: baklanov\_vi@mail.ru

**Filonenko P.A.**, Cand. Sc. (Eng.), Chief Research Fellow of the Sector, Maksimov Research Institute of Space Systems, branch of JSC Khrunichev State Research and Production Space Center. Research interests: system research of automation of information support for testing and operation of complex systems. e-mail: hardnm@gmail.com