

**Председателю совета по защите  
диссертаций**

на соискание ученой степени кандидата наук,  
на соискание ученой степени доктора наук  
24.2.327.03

на базе федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Московский  
авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)»  
д.т.н., проф. Малышеву Вениамину  
Васильевичу

---

Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, 125993

Уважаемый Вениамин Васильевич!

В соответствии с решением диссертационного совета 24.2.327.03 ,  
созданного на базе федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования «Московский  
авиационный институт (национальный исследовательский центр)» (МАИ)  
направляю отзыв официального оппонента на диссертационную работу  
Усовика Игоря Вячеславовича на тему «Разработка методов и алгоритмов  
моделирования потоков космического мусора и метеороидов для решения  
прикладных задач ограничения техногенного засорения околоземного  
космического пространства», представленную на соискание ученой степени  
доктора технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ,  
управление и обработка информации, статистика (технические науки).

Приложение: отзыв на 6 стр. в двух экземплярах

Ученый секретарь ИПУ РАН

К.Т.Н.

З.К. Авдеева



ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ  
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ  
ДОКУМЕНТОВ МАИ

20 09 2024 г.

В отдел Ученого и диссертационных  
советов МАИ,  
Председателю диссертационного совета  
24.2.327.03,  
д.т.н., профессору В.В. Малышеву

---

125993, г. Москва, Волоколамское ш., д.4

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора  
Юркевича Евгения Владимировича  
на диссертационную работу Усовика Игоря Вячеславовича на тему «Разработка  
методов и алгоритмов моделирования потоков космического мусора и  
метеороидов для решения прикладных задач ограничения техногенного засорения  
околоземного космического пространства», представленную на соискание ученой  
степени доктора технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ,  
управление и обработка информации, статистика (технические науки)

### Актуальность темы

Техногенное засорение околоземного космического пространства существенно увеличивается в результате разрушения отработавших изделий ракетно-космической техники и роста количества пусков ракет-носителей, выводящих всё большее количество космических аппаратов, особенно в области низких околоземных орбит до 2000 км, что связано с запуском малоразмерных КА; развертыванием больших орбитальных группировок КА.

Стратегически можно выделить два фундаментальных подхода к системному формированию безотказной работы космических аппаратов в условиях существующей динамики техногенного засорения: предотвращение образования и активное удаление космического мусора, и формирование механизмов, учитывающих вероятность встречи с космическим мусором. Первый подход (директивный) безусловно нужен, но исследования в данной предметной области показали, что с развитием технологий техногенное засорение космического пространства все-равно увеличивается. Применение существующих мер ограничения образования космического мусора недостаточно для снижения его роста.

В современных условиях представляется эффективным подход, основанный формировании алгоритмов решения конструкторско-технологических задач создания космических аппаратов в условиях техногенного засорения околоземного космического пространства. В этой связи важным фундаментальным результатом рассматриваемой работы является обоснованный переход от философских методологических положений о необходимости очищения околоземного космического пространства для обеспечения долговременной устойчивости

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ  
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ  
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«20» 03 2024г.

космической деятельности и безопасности космических полётов к постановке и решению широкого класса прикладных задач учета техногенного засорения, а также к разработке достоверных методов и алгоритмов расчета потоков космического мусора и метеороидов, позволяющих оценивать и прогнозировать риски, угрозы и характеристики воздействия на космические средства. Такой подход открывает новое направление в оценке надежности космических аппаратов.

На первых этапах в проектных расчетах надежности космических средств оценивалась вероятность их безотказной работы, с принципиальным увеличением срока их активного существования появились задачи системного рассмотрения функциональной надежности. Сегодня требуется учет ограничений, вызванных оценками техногенного засорения околоземного космического пространства, на основе результатов долгосрочного прогнозирования потоков космического мусора.

**Целью диссертационной работы является** обеспечение безопасности космических полётов и сохранение околоземного космического пространства пригодным к использованию будущими поколениями.

**Научная проблема.** В диссертации содержится теоретическое обобщение и решение проблемы развития методологии моделирования космического мусора и метеороидов, позволяющей формировать конструкторско-технологические решения в построении космических аппаратов при условиях существующей динамики техногенного засорения околоземного космического пространства.

Несомненно, значительны шагом в создании инструментов прогноза такой динамики явилось предложенное автором развитие методологии моделирования и решения задач, возникающих в связи с изменяющимися тенденциями осуществления космической деятельности. В качестве инструментов такого прогноза автору диссертации удалось разработать модели с применением сочетания детерминированного и статистического подходов. При этом, особенностью разработанных методик и моделей является использование условных статистических распределений космического мусора по характеристикам и орбитальным параметрам, а также их применение для различных групп объектов отдельного моделирования.

Научная новизна и значимость работы содержатся в (пункты паспорта специальности 2.3.1 указаны в скобках):

1) формализации и постановке задач системного анализа проблем космического мусора и моделирования потоков некаталогизированных космических объектов (п. 2);

2) впервые разработанных методах и алгоритмах расчета характеристик потока спорадических метеороидов в околоземном пространстве отличающихся учётом гравитационного эффекта не только по модулю, но и по направлению, для принятия решений при проектировании космических аппаратов (пп. 10, 17);

3) впервые разработанных методах и алгоритмах расчета характеристик потока КМ, основанных на условных статистических распределениях орбитальных

параметров для принятия решений при проектировании космических аппаратов (пп. 10, 17);

4) методике прогнозирования техногенного засорения ОКП при реализации мер ограничения образования и активного удаления КМ, основанной на статистических методах и алгоритмах, а также отдельном моделировании групп объектов, для принятия управленческих решений в области технологий ограничения и снижения техногенного засорения ОКП (пп. 10, 17);

5) специальном математическом и программно-алгоритмическом обеспечении, реализующем методы и алгоритмы расчета характеристик потока спорадических метеороидов и космического мусора, прогнозирования и оценки техногенного засорения околоземного пространства при различных сценариях космической деятельности (пп. 5, 12);

6) результатах оценки характеристик плотностей потоков метеороидов относительно космического аппарата на различных орбитах для решения задач оптимизации его проектных параметров (пп. 3, 17);

7) результатах оценки характеристик плотностей потоков космического мусора на различных орбитах при различных сценариях космической деятельности для задач оптимизации проектных параметров космических аппаратов (пп. 3, 17);

8) результатах решения прикладных задач в области ограничения техногенного засорения околоземного космического пространства на этапах выведения и эксплуатации космических средств и выбора орбит космического аппарата (пп. 2, 17).

#### **Практическая значимость результатов исследования**

1) Разработанные методы, математическое и алгоритмическое обеспечение практически значимы для анализа и оптимизации орбитальных структур спутниковых систем, их обслуживания и эксплуатации, а также принятия административных решений по вопросам ограничения образования и снижения космического мусора.

2) Получены характеристики плотностей потока спорадических метеороидов для КА на различных орбитах, задающие условия неопределенностей, порожденных неполным и неточным знанием условий, в которых они функционируют.

3) Получены характеристики плотностей потока КМ для КА на различных орбитах при различных сценариях осуществления КД, задающие условия неопределенностей, порожденных неполным и неточным знанием условий, в которых они функционируют. Разработан и введен в действие государственный стандарт ГОСТ Р 25645.167-2022.

4) Получены результаты решения прикладных задач ограничения техногенного засорения околоземного космического пространства на этапах выведения и эксплуатации космических средств с использованием разработанных методик и алгоритмов.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается использованием верифицированного математического аппарата, результатами сравнительного анализа с аналогичными методиками и моделями, а также доступными экспериментальными данными. Достоверность результатов работы не вызывает сомнений.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 26 статьях журналов, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России (более 10 по специальности защиты), 14 статьях Scopus (включая 11 Web of Science и 8 в журналах Q1), в 4 монографиях, в сборниках тезисов и трудов 40 конференций, а также используются в 4 программах для ЭВМ, 4 патентах и одном ГОСТ.

**Структура работы** определена декомпозицией задач, определяющих пути к достижению поставленной цели.

**Содержание работы.** В первой главе представлено научное обоснование необходимости развития методологии моделирования космического мусора и области применения методик и алгоритмов расчета его потоков для решения прикладных задач ограничения техногенного засорения околоземного космического пространства, постановку задач исследования на основе анализа проблемы космического мусора, методов его ограничения, снижения и моделирования. Предложено обоснование возможностей формирования модельно-алгоритмической постановки проблем космического мусора, методов их решения и особенности учета засорения околоземного космического пространства.

**Во второй главе,** на основе результатов проведенного в первой главе анализа, разработаны и теоретически обоснованы методики и алгоритмы расчёта плотности потока спорадических метеороидов в околоземном космическом пространстве, как основного источника рисков безопасности космических полетов со стороны частиц размером менее 1 мм, а также как источник появления частиц размером менее 1мм. Серьезным фундаментальным результатом является алгоритмизация учета влияния гравитационного эффекта не только на модуль скорости, но и на направление вектора скорости. Важно отметить, что приведенные данные о скорости метеороидов относятся к дальнему космосу. При приближении к Земле скорость частиц меняется в результате влияния гравитационного притяжения Земли. В этой связи серьезным результатов анализа таких эффектов стала разработанная автором специальная методика. По разработанному алгоритму рассчитывается приращение скорости метеороидов и коэффициент гравитационного эффекта.

Интересным результатом ее использования являются исследования экспериментальных данных о стационарном потоке фоновых метеороидов. Практический интерес представляет построение статистических распределений различных характеристик потока метеороидов: для величины и направления их относительной скорости.

**Третья глава** содержит результаты по созданию методов и алгоритмов расчета потоков космического мусора. Оригинальность системного подхода, предло-

женного автором, проявилась в использовании условных распределений космического мусора по баллистическим параметрам и в отдельном моделировании различных групп объектов. Обоснованность предложенных алгоритмов доказывается результатами верификации разработанных моделей по экспериментальным данным (на примере возвращаемых поверхностей из космоса и радиолокационных измерений малоразмерного космического мусора).

В данной области различие подходов к аппроксимации между отечественной моделью и моделью НАСА заключается в сохранении общей степенной зависимости изменения количества объектов по мере уменьшения размеров. Однако модель НАСА является менее точной, так как в ней аппроксимируется зависимость между точками с доступными экспериментальными данными. Согласно экспериментальным данным с низким пространственным и временным разрешением, можно считать оценки НАСА являющимися заниженными относительно реальных значений.

К достоинству данной работы можно отнести выявление роста пропорциональной интенсивности космической деятельности, в прогнозах зависимостей малоразмерной фракции космического мусора. Автору удалось показать, что производная этого роста меньше, чем у каталогизированных объектов, и что это связано с большим воздействием факторов в верхних слоях атмосферы на космические объекты.

**Четвёртая глава** содержит результаты применения разработанных методик и алгоритмов для решения прикладных задач обеспечения безопасности космических полетов, связанных с оценкой плотностей потоков частиц и вероятностей столкновения с космическим мусором и метеороидами для перспективных изделий ракетно-космической техники. Данная работа важна не только как содержащая фундаментальные оценки ситуации в околоземном пространстве, но и как дающая фундаментальные рекомендации к перспективным разработкам, так как содержит оценку долговременной эволюции космического мусора при различных условиях осуществления космической деятельности для различных сценариев, учитывающих катастрофические разрушения и интенсивные запуски космических аппаратов. В этой связи важным научным результатом является нахождение условий, при которых возможно образование новых максимумов засорения, а также алгоритмизация формирования предложений по составу системы мониторинга некаталогизируемого космического мусора и оценки возможности его активного удаления.

**Пятая глава** содержит описание общей методики оценки вероятности критического столкновения с космическим мусором и метеороидом. Фактически глава содержит основанные на фундаментальных результатах рекомендации по формированию новых разделов расчета надежности работы космических аппаратов. Если до недавнего времени требовался расчет вероятности безотказной работы космического аппарата, далее (с существенным увеличением срока его активного существования) потребовался расчет вероятности энергоносителей, то с динамикой изменения ситуации в околоземном пространстве требуется расчет вероятности высокоскоростного столкновения космического аппарата или его подсистем и элементов, площадь которых можно ограничить заданной величиной критической площади, с

частицей космического мусора или метеороидом, в результате которого аппарат теряет основные функциональные возможности или выходит из строя.

### Замечания по диссертации

1. В диссертации не сказано об особенностях обеспечения функциональной надежности орбитальных группировок.
2. Когда речь идет о решении «прикладных задач», требуется большая определенность. Например, задачи такого-то класса, или с решениями в такой-то области.
3. В выводах вместо выражений «проведен анализ», лучше применить уточнение: «в результате проведенного анализа получено или показано».

Отмеченные недостатки не снижают общей теоретической значимости работы и практических эффектов реализации предложений автора. Структура и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки), текст автореферата соответствует тексту диссертации.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Усовик Игорь Вячеславович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки).

Официальный оппонент,  
главный научный сотрудник Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки  
Институт проблем управления им. В. А.  
Трапезникова Российской академии наук,  
доктор технических наук, профессор

Юркевич  
Евгений  
Владимирович  
17.03.2024



С отзывом ознакомлен

17.03.2024

Адрес: 117342, г. Москва, ул. Профсоюзная 65, стр. 1

Тел.: 8-916-318-86-77, 8(495)334-88-70

email: yurkevitch.evgenij@yandex.ru