

В диссертационный совет Д 212.125.05
при ФГБОУ ВО «Московский
авиационный институт (национальный
исследовательский университет)»
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,
Волоколамское шоссе, д. 4

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Голденко Натальи Александровны

«Расчетно-экспериментальные методы исследования прочности трансформируемых модулей орбитальных станций при воздействии осколочно-метеороидной среды»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»

Многолетний успешный опыт эксплуатации космических станций Россией, США, Японией, Францией и др. странами показывает, что габаритный размер выводимых объектов ограничен возможностями современных РН тяжелого класса, в связи с чем, в последние годы возрос интерес к проектированию трансформируемых орбитальных модулей (TOM) изменяемого объема, позволяющих достичь значительного выигрыша в объемах внутреннего пространства. Основная концепция создания TOM Trans Hab разработана в 90-х годах прошлого века инженерами NASA, затем компанией Bigelow Aerospace созданы два надувных TOM Genesis I и Genesis II, а в 2016 году для отработки и проведения натурных испытаний был создан и успешно введен в эксплуатацию TOM BEAM для международной космической станции (МКС). Аналогичная задача реализуется в соответствии с планами развития Федеральной космической программы России до 2030 года ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королева», где проработан прототип системы TOM с обитаемыми отсеками и создан макет многослойной трансформируемой оболочки, состоящей из терморегулирующих

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. № 2
05 12 2018

слоев, слоев микрометеоритной защиты, удерживающих слоев, герметизирующих слоев.

В силу постоянного увеличения доли микрометеоритных частиц и малого космического мусора на орbitах полета МКС ключевую роль играет выбор и обоснование гибкой микрометеоритной защиты ТОМ стойкой к удару частиц массой от долей грамм до грамм при скоростях до 15 км/с. Из-за высоких скоростей полета и необходимости применения гибкой защиты, в отличие от классической схемы с набором щитов «Whipple» и слоев арамидной ткани или слоев из ткани «Nextel», расчетно-экспериментальное обоснование схемы микрометеоритной защиты является трудоемкой, важной и актуальной задачей.

Диссертационная работа Голденко Н.А., как раз и посвящена разработке расчетно-экспериментальных методов исследования прочности трансформируемых модулей орбитальных станций при воздействии осколочно-метеороидной среды и включает в себя детальные исследования процессов моделирования соударения частиц при высоких скоростях полета с помощью специализированного коммерческого программного продукта AUTODYN, а также параметрическое моделирование и постановку экспериментальных исследований высокоскоростного удара с помощью взрывного металлического устройства. В связи с этим, диссертационная работа Голденко Н.А. представляет научный интерес и практическую значимость, а тема работы актуальна.

Диссертационная работа Голденко Н.А. выполнена на 169 страницах, содержит 153 рисунка и 24 таблицы, состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы, включающего 130 наименований.

Во введении приведена актуальность и общая структура диссертационной работы, сформулирована цель и задачи работы, выделена степень разработанности темы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, представлена методология и методы исследований.

В первой главе приведены данные по конструктивным особенностям ТОМ, приведена структура и состав слоев многослойной оболочки, даны требования к конструкции многослойной трансформируемой гибкой оболочки ТОМ. Представлены современные подходы и модели для анализа и мониторинга осколочно-метеороидной обстановки на разных типах орбит. Даны характеристики воздействия ударов частиц на космические аппараты и приведены физические принципы защиты космических аппаратов. Соискателем представлен детальный обзорно-аналитический раздел, посвященный существующим стендам, схемам, методам имитации воздействия осколочно-метеороидной среды при наземной экспериментальной отработке микрометеоритной защиты космических аппаратов. Представлены данные исследования метания компактных частиц с помощью кумулятивных облицовок типа «полусфера-цилиндр».

В качестве небольшого замечания можно отметить отсутствие анализа применения разных типов тканых материалов на основе неорганических волокон для построения микрометеоритной защиты оболочки ТОМ.

Во второй главе Голденко Н.А. предложен метод оценки прочности оболочки ТОМ при высокоскоростном ударе идеальной сферической частицы. Метод расчета прочности защиты оболочки ТОМ состоит из двух этапов. На первом этапе выполняется численное моделирование высокоскоростного воздействия частицы на многослойную защиту корпуса трансформируемого модуля в специализированном коммерческом программном продукту AUTODYN, где определяется нагрузка со стороны разрушенных элементов частицы и слоев оболочки на герметизирующие слои ТОМ. Из-за того, что характерное время взаимодействия осколков с газодержащей оболочкой мало по сравнению с характерным периодом ее колебаний, то соискатель вводит допущение о не зависимости от времени нагрузки и моделирования нагружения герметизирующих слоев распределенным удельным импульсом, локализованным в области воздействия частиц, которая мала по сравнению с габаритными размерами всей оболочки. На втором этапе производятся расчеты напряженно-

деформированного состояния герметизирующих слоев ТОМ, нагруженных локализованной импульсной нагрузкой, на основании которых делается заключение о их прочности и в случае необходимости усиления путем введения дополнительных защитных слоев.

В главе приведены результаты эксперимента по воздействию удару частицы диаметром 10,3 мм при скорости 6,76 км/с на многослойную стенку корпуса трансформируемого модуля с встроенной экранной защитой, которые позволили осуществить верификацию методики расчета в программном комплексе AUTODYN (ANSYS) с использованием трех подходов: метода SPH (сглаженных частиц), конечно-элементной модели (метод Лагранжа), конечно-элементной модели (метод Лагранжа) с искусственной эрозией.

Даны результаты экспериментов и численного моделирования воздействия частицы на слои оболочки ТОМ, которые позволили уточнить используемые математические модели для корректного деформирования и разрушения материала слоев с учетом эксперимента. Представлены результаты начального численного моделирования перед испытанием и моделирование эксперимента, после его проведения и установлено, что принятые расчетные схемы и методы расчета в программном комплексе AUTODYN позволяют с достаточно высокой точностью моделировать процесс пробоя и согласование расчета с экспериментом происходит на всех экранах, кроме третьего защитного экрана, что обусловлено неопределенностью в ряде характеристик пенополиуретана.

В рассмотренном соискателем эксперименте высокоскоростного соударения частицы с встроенной защитой трансформируемого модуля запас прочности для герметизирующих слоев ТОМ составил 3,79. Представлены результаты исследования энергетических характеристик продуктов разрушения частиц на элементах встроенной защиты оболочки ТОМ.

Соискателем проведены параметрические расчеты по влиянию расстояния между экранами, схемой распределения слоев ткани в экранах трансформируемой защиты на прочность оболочки ТОМ при высокоскоростном ударе. На основе данных расчетов выданы рекомендации по выбору конструктивной схемы

встроенной трансформируемой защиты и определено, что рациональная конструкция микрометеоритной защиты должна содержать следующее распределение слоев ткани: 1 экран – 8 слоев, 2 экран – 12 слоев, 3 экран – 8 слоев, что приведет к снижению скорости подлета к герметизирующим слоям осколков частиц на 88,2% по сравнению с исходным вариантом.

Определено, что математическое моделирование позволяет существенно снизить временные затраты на подготовку и обоснование экспериментальных исследований по выбору схем и материалов микрометеоритной защиты при высокоскоростном ударе твердых частиц.

Полученные на основе параметрического моделирования рекомендации по выбору конструктивной схемы встроенной трансформируемой защиты, а также метод расчета прочности гермооболочек перспективных трансформируемых модулей с многослойной встроенной защитой обладают важной практической значимостью. Установленная зависимость величины поглощения энергии статистически значимой частицей космического мусора (из алюминия, диаметр 10 мм, скорость 7 км/с) от структуры отечественной многослойной встроенной экранной защиты ТОМ является научной новизной.

В третьей главе представлены результаты большой расчетной и экспериментальной работы по разработке метода исследования прочности с использованием взрывного метательного устройства с постановкой и прогнозированием режимов, обеспечивающих метание компактных алюминиевых частиц в диапазоне скоростей от 7,0 до 11,0 км/с, для имитации высокоскоростного удара и выбора микрометеоритной защиты ТОМ.

В главе соискателем представлены детальные результаты весьма трудоемких расчетов по обоснованию наилучшего способа отсечки низкоскоростной части кумулятивной струи: отсечка с помощью несимметричного выхода ударной волны на поверхность формирователя с кумулятивной выемкой, с помощью биметаллической шайбы, с помощью замка и с помощью сминаемой трубки. Показано, что использование биметаллического

формирователя обеспечивает надежную отсечку низкоскоростной части алюминиевой струи и стабильность испытательных режимов.

Получены результаты исследования влияния следующих конструктивных параметров взрывного метательного устройства на скорость и размеры метаемого элемента: материала формирователя, типа взрывчатого вещества, способов инициирования заряда взрывчатого вещества (точечная детонация и кольцевая детонация), толщины формирователя, длины цилиндрической части кумулятивной выемки в формирователе, толщин корпуса и прокладки под заряд для дискретного варьирования скорости между зарядом и формирователем, габаритных размеров взрывного метательного устройства. Показана возможность метания компактной частицы, получаемой с помощью разработанного взрывного метательного устройства в диапазоне скоростей от 7,0 до 11,0 км/с.

На основе детального параметрического моделирования разработана важная с практической точки зрения инженерная методика расчета конструктивных параметров взрывного метательного устройства на основе регрессионных моделей.

Четвертая глава посвящена экспериментальной отработки взрывного метательного устройства в части: экспериментального подтверждения работоспособности взрывного метательного устройства в базовом исполнении с различными схемами инициирования заряда взрывчатого вещества; выбора метательного устройства с различными вариантами отсечки головной части струи; экспериментального подтверждения результатов параметрических расчетов.

Исследовались схемы инициирования заряда взрывчатого вещества (по кольцу и точечное) и варианты отсечки низкоскоростной части струи (отсечка с помощью биметаллического формирователя и с помощью блока отсечки с дополнительным зарядом взрывчатого вещества). Приведены результаты экспериментальной отработки взрывного метательного устройства с зарядом из низкоплотного и высокоплотного взрывчатого вещества и представлено сравнение результатов экспериментальной отработки с данными численного

моделирования в программном комплексе AUTODYN. Подробно рассмотрены результаты воздействия взрывного метательного устройства без отсечки и с отсечкой на биметаллическую преграду и проведено численное моделирование. Полученные результаты позволили соискателю верифицировать численные расчеты воздействия высокоскоростной метаемой частицы на преграду в части процесса кратерообразования (экспериментальные данные исследовались металлографическими методами для анализа микроструктурных особенностей), а также путем сравнения геометрических параметров поврежденной преграды.

Полученные экспериментальные результаты представляют научную и практическую ценность.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов, рекомендаций сформулированных в диссертации, подтверждаются корректностью применения специализированной программы конечно-элементного моделирования AUTODYN, где учитываются баллистические кривые, нелинейное поведение материала, а также результатами верификации используемых моделей и характеристик материалов ударника и слоев многослойной защиты ТОМ с помощью детальных экспериментальных исследований.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующих результатах:

– впервые установлена зависимость величины поглощения энергии статистически значимой частицей космического мусора (алюминий, диаметр 10 мм, скорость 7 км/с) от структуры многослойной встроенной экранной защиты перспективного ТОМ;

– разработано взрывное метательное устройство, обеспечивающие проведение испытаний конструкций на ударное воздействие компактных алюминиевых частиц массой (0,01 – 1,00) гр. в диапазоне скоростей (7,0–11,0) км/с;

– теоретически обоснована и подтверждена экспериментально возможность формирования и ускорения компактной алюминиевой частицы с заданной массой до 1 гр. и скоростью до 11 км/с на основе кумулятивного принципа;

– прямым экспериментом подтвержден вытеснительный механизм образования кратера при ударе частиц при скорости до 6 км/с.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы заключается в следующих основных результатах:

– разработан метод расчета прочности гермооболочек перспективных ТОМ;

– даны рекомендации по выбору структуры слоев микрометеоритной защиты трансформируемых модулей;

– получено численное моделирование работы взрывного метательного устройства, которое позволяет сократить число экспериментов по отработке режимов испытаний и является методической основой разработки ряда аналогичных устройств;

– разработано взрывное метательное устройство, которое расширяет диапазон скоростей удара до 11,0 км/с по сравнению с достигаемым на легкогазовых баллистических установках до 8,0 км/с.

По тексту диссертации имеются небольшие опечатки.

Автореферат диссертации соответствует рукописи и отражает ее содержание, основные положения и результаты работы.

По теме диссертации Голденко Н.А. опубликовала 11 научных работ и три из них в ведущих научных журналах, одобренных ВАК. Результаты работы докладывались на ряде всероссийских и международных конференциях.

В качестве замечаний по работе можно отметить:

1. При выполнении параметрических расчетов в программном комплексе AUTODYN процесса высокоскоростного удара идеальной сферической частицы со слоями микрометеоритной защиты трансформируемого орбитального модуля остается неясным учитывались ли тепловые эффекты и фазовые переходы в арамидной ткани, что отчетливо наблюдается в экспериментах (таблица 2, рисунок 2.3).

2. В работе не исследовано на сколько влияет величина воздушного зазора между слоями арамидной ткани на баллистическую стойкость многослойной микрометеоритной защиты трансформируемого орбитального модуля.

Приведенные замечания не снижают высокий уровень выполненной диссертационной работы, являющейся законченным, важным научным и практически значимым исследованием, в котором изложены расчетно-экспериментальные методы исследования прочности трансформируемых модулей орбитальных станций при воздействии осколочно-метеороидной среды. Диссертационная работа отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Голденко Наталья Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Официальный оппонент, кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет),

К.В. Михайловский

адрес: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул.,
д. 5, стр. 1

телефон: +7 (905) 543-71-01

e-mail: konst_mi@mail.ru

Подпись к.т.н., доцента Михайловского К.В. заверяю.



А Т. МАТВЕЕВ
ЗАМ. НАЧ. УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ

ТЕЛ 8499-263 67 69

13.12.2017 Г.М.Матвеев