

На правах рукописи



Юдин Евгений Юрьевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕТЕОРОИДОВ И ОСКОЛКОВ КОСМИЧЕСКОГО
МУСОРА НА ЗАЩИТНЫЕ КОНСТРУКЦИИ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный Научно-Исследовательский Институт Машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш)

Научный руководитель:

доктор технических наук
Фельдштейн Валерий Адольфович

Официальные оппоненты:

Шклярчук Федор Николаевич
доктор технических наук, профессор,
Институт прикладной механики РАН,
главный научный сотрудник

Острик Афанасий Викторович
доктор технических наук, профессор,
Институт проблем химической физики РАН,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация:

**Открытое акционерное общество
«Ракетно-космическая корпорация
«Энергия» имени С.П. Королёва»
(г. Королёв, Московской области).**

Защита состоится 27 ноября 2013 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.05, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета), в зале заседаний Ученого совета МАИ по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Автореферат разослан «25» октября 2013 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Федотенков Г.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность работы

На ранних этапах освоения околоземного космического пространства проблема столкновений космических аппаратов с метеороидами была второстепенной по сравнению со многими другими опасностями космоса. Однако, с увеличением человеческой активности в околоземном космосе ситуация изменилась. Отрабатывавшие ступени ракет и вышедшие из строя спутники являются техногенным «космическим мусором» и количество его растет с каждым годом. Проблема также усугубляется столкновениями таких объектов между собой. Опасность техногенного засорения околоземной среды усугубляется увеличением количества космических аппаратов и их размеров. Постоянно действующая Международная космическая станция (МКС) является наиболее уязвимой мишенью для космического мусора. Крупные объекты систематизированы в специальных каталогах и для защиты МКС от столкновения с ними используется маневр уклонения путем корректировки орбиты. Мелкие частицы – осколки космического мусора (ОКМ) также представляют опасность для космических объектов. Защита от них в настоящее время осуществляется путем введения в конструкцию модулей специальных защитных экранов. Проектирование, отработка и подтверждение эффективности экранной защиты – актуальная задача современной космонавтики. Основные сложности ее решения обусловлены двумя причинами: жесткие весовые ограничения и высокие скорости соударения. Скорость столкновения с метеороидами и ОКМ варьируется в диапазоне 2 – 70 км/с. Наиболее опасные столкновения с осколками космического мусора происходят на скоростях до 15 км/с, при среднем значении 10,3 км/с.

Защита от ударов с такими скоростями не может базироваться на принципах бронезащиты, а методы расчета и испытаний требуют привлечения физических моделей и экспериментальной техники, отличающихся от распространенных методов прочностных расчетов и испытаний.

Целью диссертационной работы является исследование процесса ударного взаимодействия тел при высоких скоростях для определения характеристик эффективности экранных защитных конструкций и ударной стойкости гермооболочек космических аппаратов при воздействии высокоскоростных метеороидов и техногенных частиц с применением методов численного моделирования.

Автор выносит на защиту:

1. Результаты исследований массовых и импульсных параметров продуктов разрушения (облака вторичных осколков), образующихся при соударении сферической частицы и металлического экрана.
2. Метод расчета импульсной нагрузки от воздействия вторичного облака осколков на защищаемую конструкцию.
3. Результаты численных исследований образования откольных разрушений в

стенке гермооболочки при воздействии облака вторичных осколков.

4. Результаты расчетов по уточнению параметров ударной стойкости гермооболочек с экранными защитными конструкциями Служебного модуля и Многоцелевого лабораторного модуля Российского сегмента МКС.

Научная новизна работы состоит

- в развитии, верификации и валидации метода численного моделирования процессов высокоскоростного удара применительно к отработке и подтверждению эффективности экранной защиты и ударной стойкости конструкций космических аппаратов к ударам метеороидов и частиц космического мусора,
- в анализе массово-импульсных характеристик облака вторичных осколков (продуктов разрушения исходной частицы и мишени) с учетом эффекта обратного выброса материала,
- в обосновании и оценке точности зависимости размера отверстия в пластине при высокоскоростном пробое от скорости удара и соотношения размеров частицы и толщины пластины, применяемой в инженерных методиках расчета,
- в определении закона распределения удельной импульсной нагрузки на защищаемую конструкцию от воздействия облака вторичных осколков разрушения частицы и экрана.

Практическое значение работы.

1. Результаты исследований массово-импульсных параметров облака вторичных осколков, метод расчета импульсной нагрузки от воздействия вторичного облака осколков на защищаемую конструкцию, процессов образования откольных разрушений использованы при уточнении инженерных методик расчета баллистических предельных зависимостей гермооболочек модулей РС МКС, применяемых в процессе отработки экранной защиты космических аппаратов.
2. Уточненные баллистические предельные зависимости гермооболочек с экранной защитой Многоцелевого лабораторного модуля и Служебного модуля использованы для уточнения характеристик защищенности модулей РС МКС.
3. Результаты работ применяются в ОАО «РКК Энергия» им. С.П. Королева и ФГУП ЦНИИмаш.

Апробация работы

Результаты проведенных исследований апробированы в процессе работ по обеспечению защиты РС МКС от микрометеороидов и космического мусора.

Основные положения диссертации докладывались на отраслевой научно-технической конференции «Молодежь в ракетно-космической отрасли» (ЦНИИмаш, сентябрь 2009 г.), на 52-ой научной конференции МФТИ (МФТИ, ноябрь 2009 г.), на семинаре «Проблемы математического моделирования при создании и эксплуатации ракетно-космической техники»

(ИКИ-РАН, декабрь 2009 г.), на научной конференции, посвященной 90-летию Ю.А. Мозжорина (ЦНИИмаш, ноябрь 2010 г.), на 53-ей научной конференции МФТИ (МФТИ, ноябрь 2010 г.), на 29-ом заседании межагентского координационного комитета по проблемам космического мусора (Берлин, апрель 2011), на научных чтениях, посвященных 100-летию со дня рождения М.К. Янгеля (ЦНИИмаш, октябрь 2011 г.), на 10-ой международной конференции «Авиация и космонавтика - 2011» (МАИ, ноябрь 2011 г.), на конкурсе молодых ученых на премию С.П. Королева (Администрация г. Королев МО, декабрь 2011 г.)

Личный вклад автора заключается в верификации и валидации метода численного моделирования соударения частиц космического мусора и метеороидов с защитными конструкциями космических аппаратов, в исследовании закономерностей изменения массово-импульсных характеристик высокоскоростной частицы и продуктов разрушения защитных экранов в процессе образования облака вторичных осколков и его воздействия на защищаемую конструкцию, в обосновании точности инженерных методик, применяемых при проектировании и отработке экранных защитных конструкций, в уточнении баллистических предельных зависимостей гермооболочек с экранной защитой Многоцелевого лабораторного модуля и Служебного модуля МКС.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 7 работ, 2 – в журналах перечня ВАК.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы из 42 наименования. Она изложена на 149 страницах, содержит 71 рисунок и 22 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, описывается современное состояние исследований высокоскоростного взаимодействия частиц и защитных конструкций, кратко изложено содержание глав диссертации.

В **первой главе** приведены статистические данные о засорении околоземного космического пространства, дан обзор методов численного моделирования быстропротекающих процессов.

В **п.1.1** приведены статистические данные о засорении околоземного космического пространства.

Стимулированные проектами долговременных орбитальных станций и начатые в 1992 г. NASA и Минобороны США наблюдения во многом прояснили обстановку с ОКМ на околоземных орбитах. В настоящее время

сеть космического мониторинга космического командования США ведет непрерывные радарные и электронно-оптические наблюдения в пространстве между околоземными и геостационарными орбитами. В диапазоне от 1 мкм до 10 см были зафиксированы объекты самого разнообразного происхождения, в том числе продукты истечения твердотопливных двигателей; утечка жидких теплоносителей орбитальных ядерных реакторов; продукты деградации поверхностей КА в жестких условиях космической среды.

Согласно данным, опубликованным Управлением ООН по вопросам космического пространства, в октябре 2009 года "Вокруг Земли вращается около 300 тысяч обломков мусора". По словам исследователей NASA, самая сложная ситуация сложилась в диапазоне высот от 900 до 1000 км, где находятся спутники связи и навигации. По имеющимся математическим моделям существует некоторая критическая плотность ОКМ, достижение которой приводит к их экспоненциальному размножению.

Достоверно установлено, что основную опасность представляют мелкие частицы, число которых резко увеличивается по мере уменьшения размеров. В настоящее время опасность столкновения крупного космического аппарата с частицами размером ~1 см стала вполне реальной, и ее необходимо учитывать в процессе проектирования и эксплуатации аппаратов. Например, для такого объекта, как Международная космическая станция, вероятность столкновения с частицами размером более 1 см в течение 10 лет составляет несколько процентов. Для описания характеристик техногенного засорения окружающего космического пространства мелкими объектами, относительно которых отсутствуют детальные сведения об элементах их орбит, применяют методы статистического моделирования.

Наряду с облаком техногенных осколков околоземное пространство пронизывают потоки естественных метеороидных частиц. Вероятность попадания метеороида размера ~ 1 см с массой порядка 1 г существенна для масштабных и долговременных космических систем типа МКС. Диапазоны скоростей удара лежат в пределах 1–16 км/с для ОКМ и 11–72 км/с для метеороидов.

Обеспечение стойкости конструкций КА к высокоскоростным ударам регламентировано государственными и отраслевыми стандартами. В соответствии с принятыми требованиями вероятность непогиба гермооболочек модулей МКС в течение 15 лет должна составлять не менее 0,976. Этот показатель может быть достигнут только за счет применения специальных конструктивных мер - защитных экранов, вводимых в конструкцию модулей станции на стадии ее проектирования.

Сегодня, многие лаборатории в США и Европе располагают различным и многочисленным оборудованием для высокоскоростного метания, и, что очень важно, оборудованием высокоскоростной регистрации быстропротекающих процессов. Общая концепция экранной защиты, предложенная еще в 1950 г.

(Whipple F.L., *Astronomical J*, 52, 1947), постоянно совершенствуется, и достигнут высокий уровень, как по её эффективности, так и по весовым характеристикам.

Тем не менее, мы не можем на 100% гарантировать защищенность космических аппаратов. Характер высокоскоростного взаимодействия определяется, в первую очередь, массой атомов взаимодействующих веществ и энергией межатомных связей, а эти величины заданы нам природой. Причем, с точки зрения защиты от удара, нам подходят более «тяжелые» материалы, что противоречит жестким весовым ограничениям.

В п.1.2 приводится обзор методов моделирования быстропротекающих процессов.

Сеточные методы численного моделирования широко применяются для большого круга задач вычислительной гидродинамики и вычислительной механики деформируемого твёрдого тела, и являются доминирующими численными методами для решения инженерных и научных проблем. Однако их применение к задачам высокоскоростного удара ограничено тем, что проникание ударника в мишень сопровождается сильным формоизменением. Этот фактор на практике делает неэффективными вышеупомянутые методы расчета, так как они основаны на использовании расчетной сетки, что требует больших вычислительных ресурсов для ее генерации и регенерации в процессе вычислений. Традиционные сеточные вычислительные методы должным образом не справляются с задачами детонации и распространения взрывных волн во взрывчатых веществах, высокоскоростного взаимодействия тел и т.д. Этим недостаткам лишено новое поколение вычислительных методов – бессеточные методы, первоначально разработанные для решения задач астрофизики, где приходится иметь дело с интенсивным “перемешиванием” среды.

Ключевой идеей бессеточных методов является обеспечение решения интегральных уравнений или уравнений в частных производных без использования каких-либо сеток.

Метод гладких (сглаженных) частиц – Smoothed Particle Hydrodynamics – SPH (Gingold R. A. and Monaghan J. J., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181, 1977) является бессеточным лагранжевым численным методом для расчетов процессов высокоскоростного взаимодействия тел. Производные вычисляются с помощью сплайн-интерполяции, в соответствии с чем каждая гладкая частица является точкой интерполяции, в которой известны параметры деформируемой среды. Численное решение во всей области интегрирования получается с помощью интерполяционных функций, для которых эти частицы являются интерполяционными узлами. Таким образом, вычисление градиентов сводится к аналитическому дифференцированию гладких функций.

Основная суть метода заключается в приближении формулы

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x') \delta(x' - x) dx' \quad (1)$$

следующей цепочкой преобразований. Вначале обобщенная функция $\delta(x)$ заменяется аналитической функцией $W(x' - x, h)$ - ядром сглаживания, (h - длина сглаживания):

$$\bar{f}(x) = \int_{\Omega} f(x') W(x' - x, h) dx' \quad (2)$$

Ядро $W(x' - x, h)$ должно удовлетворять условиям

$$\int_{\Omega} W(x, h) dx' = 1 \quad (3)$$

$$W(x, h) \xrightarrow{h \rightarrow 0} \delta(x) \quad (4)$$

Рассмотрим численные методы вычисления этих интегралов. Среда разбита на малые, по сравнению с характерными размерами рассчитываемой модели, расчетные частицы. Каждый такой элемент имеет свое значение аппроксимируемого параметра $f(x)$ равное f_i . Так же считаются известными его плотность - ρ_i , координата - x_i и масса - m_i . В качестве начального расположения может использоваться кубическая равномерная решетка.

Заменяем интегрирование суммированием по частицам-соседям:

$$\bar{f}(x) = \sum_i \frac{m_i f_i}{\rho_i} W(x_i - x, h) \quad (5)$$

Использование такой аппроксимации существенно упрощает вычисление градиента полевой функции $\frac{\partial f(x)}{\partial x_{\alpha}}$, так как достаточно аналитически продифференцировать ядро сглаживания, что даст

$$\frac{\partial \bar{f}(x)}{\partial x_{\alpha}} = \sum_i \frac{m_i f_i}{\rho_i} \frac{\partial W(x_i - x, h)}{\partial x_{\alpha}} \quad (6)$$

Вычисление градиентов сводится к дифференцированию аналитических функций. Важно, чтобы носитель функции $W(x, h)$ был сильно локализованным. В качестве ядра используется следующий сплайн:

$$W(x, h) = \begin{cases} \frac{1 - \frac{3}{2}\varphi^2 + \frac{3}{4}\varphi^3}{\pi h^3}, \varphi \in [0, 1] \\ \frac{(2 - \varphi)^3}{4\pi h^3}, \varphi \in [1, 2] \\ 0, \varphi \in [2, \infty] \end{cases} \quad (7)$$

где $\varphi = \frac{|x - x'|}{h}$.

В п.1.3 приведено описание гидродинамического метода сглаженных частиц, применительно к расчету высокоскоростного взаимодействия тел

В задачах высокоскоростного воздействия твердых тел в первом приближении можно пренебречь сопротивлением материала сдвигу.

Прочность материала на сдвиг является существенной только в последних стадиях соударения. Уравнения динамики сплошной среды записываются в виде:

$$\begin{aligned}\frac{D\rho}{Dt} &= -\rho \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta}, \quad \frac{Dv^\alpha}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma^{\alpha\beta}}{\partial x^\beta}, \\ \frac{De}{Dt} &= \frac{\sigma^{\alpha\beta}}{\rho} \frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\beta}, \quad \frac{Dx^\alpha}{Dt} = v^\alpha\end{aligned}\quad (8)$$

где ρ – плотность, e – внутренняя энергия, v^α – компоненты скорости, $\sigma^{\alpha\beta}$ – полный тензор напряжений.

Сформулируем определяющие соотношения отдельно для объемного сжатия, определяемого первыми инвариантами тензоров деформации и напряжений, и формоизменения, определяемого вторыми инвариантами:

$$\sigma^{\alpha\beta} = -p\delta^{\alpha\beta} + \tau^{\alpha\beta} \quad (9)$$

$$\varepsilon^{\alpha\beta} = -e\delta^{\alpha\beta} + \bar{\varepsilon}^{\alpha\beta} \quad (10)$$

Линейное соотношение упругости должно быть заменено нелинейным, учитывающим вращение системы координат:

$$\dot{\tau}^{\alpha\beta} - \tau^{\alpha\gamma} R^{\beta\gamma} - \tau^{\gamma\beta} R^{\alpha\gamma} = G\varepsilon^{\alpha\beta} \quad (11)$$

Здесь слева – производная дивергента тензора напряжений в смысле Яуманна (объективная производная), и тензор скоростей деформации

$$\dot{\varepsilon}^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\beta} + \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\alpha} \right) \quad (12)$$

В качестве уравнения состояния чаще всего используется уравнение Ми-Грюнайзена для твердых тел:

$$p(\rho, e) = \left(1 - \frac{1}{2} \Gamma \eta \right) p_H(\rho) + \Gamma \rho e \quad (13)$$

где индекс H – означает отношение к кривой Гюгонио (ударная адиабата), Γ – коэффициент Грюнайзена, и

$$\eta = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (14)$$

где ρ_0 – начальная плотность.

Формулировка SPH метода для деформируемого твердого тела принципиально аналогична формулировке для жидкости, однако она осложнена учетом сдвигового сопротивления и прочности материала. Для вычисления плотности используется суммирование масс частиц:

$$\rho_i = \sum_{j=1}^N m_j W_{ij} \quad (15)$$

или может использоваться закон неразрывности.

Уравнение сохранения импульса:

$$\frac{Dv_i^\alpha}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (16)$$

Тензор сдвиговых скоростей деформаций и тензор скоростей вращения:

$$\varepsilon_i^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \left(\frac{m_j}{\rho_j} v_{ji}^\alpha \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{m_j}{\rho_j} v_{ji}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\alpha} \right) \quad (17)$$

$$R_i^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \left(\frac{m_j}{\rho_j} v_{ji}^\alpha \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} - \frac{m_j}{\rho_j} v_{ji}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\alpha} \right) \quad (18)$$

где $v_{ji}^\alpha = v_j^\alpha - v_i^\alpha$.

Уравнение энергии имеет вид

$$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{1}{\rho_i} \tau_i^{\alpha\beta} \varepsilon_i^{\alpha\beta} \quad (19)$$

Вводя искусственную вязкость Π_{ij} и искусственный нагрев H_{ij} , формулировки SPH метода запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{D\rho_i}{Dt} &= \sum_{j=1}^N m_j (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \\ \frac{Dv_i^\alpha}{Dt} &= \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \\ \frac{De_i}{Dt} &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{1}{\rho_i} \tau_i^{\alpha\beta} \varepsilon_i^{\alpha\beta} + H_i \\ \frac{Dx_i^\alpha}{Dt} &= v_i^\alpha \end{aligned} \quad (20)$$

При использовании метода SPH возникает численная проблема, названная неустойчивостью при растяжении – это ситуация, когда движение частицы становится нестабильным в напряженном состоянии растяжения. Это может привести к схлопыванию частиц или срыву вычислений. Как указано (Swegle J. W., Hicks D. L. and Attaway S. W., J. of Comput. Physics, 116(1), 1995), неустойчивость при растяжении не зависит ни от искусственной вязкости, ни от численной схемы. В работе (Randies P. W., and Libersky L. D., Int. J. for Numerical Methods in Engng, 47, 2000) было показано, что неустойчивость при растяжении часто не успевает проявиться при расчете быстропротекающих процессов, к которым относятся и высокоскоростное соударение.

Во **второй** главе проведена валидация численных методов моделирования, относительно задач высокоскоростного взаимодействия тел.

В п.2.1 проведено математическое моделирование процесса воздействия сферической частицы на алюминиевый экран методом конечных элементов, реализованного в вычислительном пакете SIMULIA ABAQUS.

Рассмотрена перфорация тонкого лицевого экрана компактной частицей на скорости порядка нескольких километров в секунду. Наиболее часто используемым соотношением для диаметров отверстий, пробиваемых частицей в тонкой преграде при ударе по нормали является формула Мейдена, представляющая собой аппроксимацию большого количества экспериментальных данных (Maiden C.J., AIAA, 2(11), 1964):

$$d_h = d_p \left(0.45 v_p \left(\frac{h_f}{d_p} \right)^{0.666} + 0.90 \right) \quad (21)$$

где d_p – диаметр частицы; h_f – толщина преграды; v_p – скорость частицы.

При построении геометрической модели используется центральная симметрия. Рассматривается центральный участок пластины с размерами 20x20 мм и толщиной 2 мм. Диаметр сферической частицы варьируется от 4,97 мм до 10 мм. При решении используется модель упругопластического поведения металлов с последующим разрушением. Для алюминиевого сплава АМг–6, используемого в расчетах, задаются плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел текучести, предел прочности, деформация динамического предела прочности. Используется явный (Explicit) метод интегрирования. При создании сетки конечных элементов всей модели использовались объемные восьмиузловые элементы C3D8R с одной точкой интегрирования. Модель содержит от 90 000 до 130 000 элементов. Рассматриваемый диапазон скоростей от 1 до 3 км/с. Результаты расчетов представлены на рисунке 1.

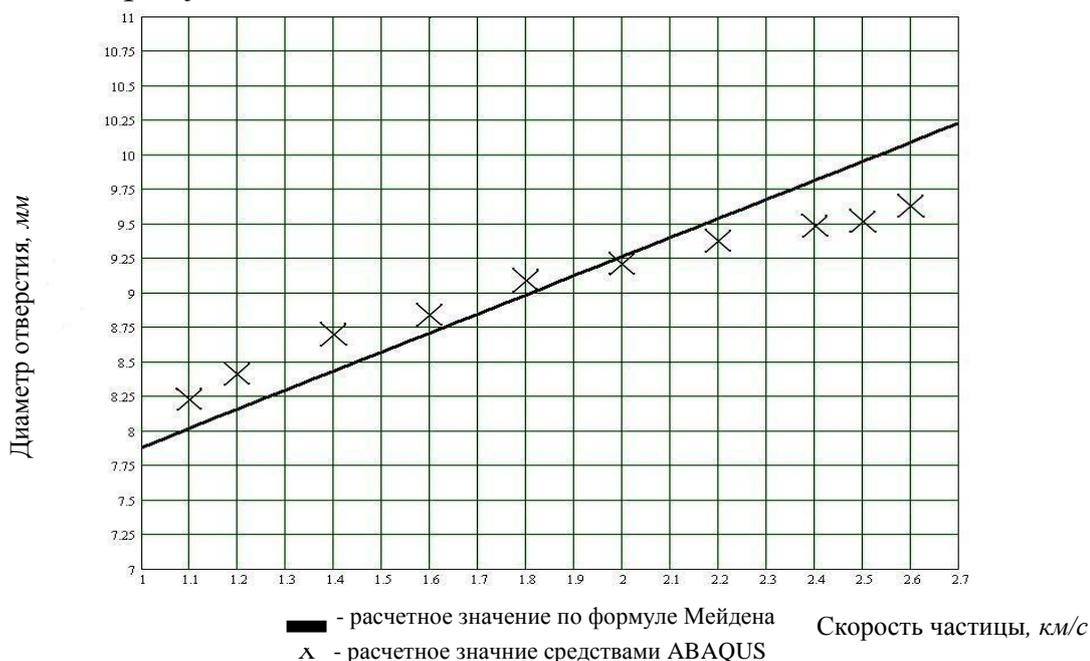


Рисунок 1 – Результаты расчетов размеров отверстия по формуле Мейдена и средствами ABAQUS при ударе частицы диаметром 7,22 мм

Результаты численного моделирования по определению диаметра отверстия, образующегося при ударном воздействии по нормали на лицевой экран достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными в диапазоне скоростей от 1 до 2 км/с. Средняя относительная погрешность при этом не превышает 5%. Следует отметить, что при увеличении скорости воздействия частицы на экран, погрешность результатов относительно экспериментальных данных значительно нарастает, что говорит о непригодности данной модели для прогнозирования поведения конструкций в среднескоростном и высокоскоростном диапазонах соударения.

В процессе численного анализа сильно деформирующиеся элементы исключаются из расчета – образовавшиеся свободные узловые точки продолжают движение как точечные массы. Данный подход не позволяет отслеживать параметры облака вторичных осколков, таким образом невозможно оценить воздействие на последующие элементы защитной конструкции. Как следствие, метод конечных элементов не позволяет в необходимой степени отслеживать процесс разрушения сложных конструкций.

В п.2.2 проведено численное исследование ударного воздействия сферической частицы на экраны конструкции с применением SPH метода, реализованного в вычислительном программном комплексе ANSYS/Autodyn.

Первоочередной задачей является валидация применяемой модели высокоскоростного ударного воздействия. В первую очередь, необходимо сравнение результатов численных исследований непосредственно с экспериментальными результатами.

При моделировании использовались уравнение состояния Ми-Грюнайзена. Деформационное упрочнение материала учитывалось с помощью модели Штейнберга–Гуйнана.

Проведено несколько серий численных экспериментов. Рассматривается двумерная осесимметричная модель. В первой серии экспериментов рассматривалось нормальное воздействие компактной частицы на «тонкие» экраны. Диаметр частицы 5 мм, толщина экрана 1,27 мм. Скорость частицы изменяется от 3 до 9 км/с, с шагом 0,5 км/с. Во второй серии экспериментов рассматривалось нормальное воздействие компактной частицы на «толстые» экраны. Диаметр частицы 7,14 мм, толщина экрана 6,35 мм. Скорость частицы 2,38 и 2,8 км/с. В третьей серии экспериментов моделировалось нормальное воздействие компактной частицы на одноэкранные защитные конструкции. Диаметр налетающей частицы варьировался в пределах 1,8 – 5,96 мм, скорость 3,98 – 6,68 км/с. Характерные размеры ЭЗК: толщина лицевого экрана – 0,95 мм, защищаемой стенки – 1,43 мм, расстояние между экранами – 50 мм.

Тонкие экраны. Результаты моделирования, при сравнении с экспериментальными данными, показали достаточно точное отображение процесса разрушения экрана и частицы. Количественный анализ величины диаметра пробиваемого в экране представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты расчетов для «тонких» экранов

Скорость удара, км/с	Диаметр частицы, мм	Толщина экрана, мм	Диаметр расчетного отверстия, мм	Диаметр отверстия по формуле Мейдена, мм	Относительная погрешность, %	Диаметр отверстия по формуле ЦНИИмаш, мм	Относительная погрешность, %
3	5	1,27	7,94	7,21	10,1	7,72	2,9
3,5	5	1,27	8,74	7,66	4,1	8,20	6,5
4	5	1,27	9,1	8,11	2,2	8,65	5,2
4,5	5	1,27	9,4	8,56	9,8	9,06	3,7
5	5	1,27	9,9	9,02	9,8	9,45	4,8
5,5	5	1,27	10,02	9,47	5,8	9,81	2,1
6	5	1,27	10,24	9,92	3,2	10,15	0,9
6,5	5	1,27	10,44	10,37	0,7	10,48	0,4
7	5	1,27	10,9	10,82	0,7	10,79	1,0
7,5	5	1,27	11,04	11,27	2,1	11,09	0,4
8	5	1,27	11,37	11,73	3,0	11,38	0,05
8,5	5	1,27	11,48	12,18	5,7	11,65	1,5
9	5	1,27	11,62	12,63	8,0	11,92	2,5

Средняя погрешность относительно аппроксимации экспериментальных данных не превышает 5%. Значение наибольшего отклонения составляет 6,5%.

Толстые экраны. Сопоставление результатов показывает хорошее соответствие натурным экспериментам (Naval weapon center, NWC TP 4414, 1967), происходит сильное деформирование ударника, которое влечет его разрушение на крупные фрагменты, происходит образование большого числа крупных осколков выбитых из экрана. Края пробитого отверстия характеризуются большим количеством трещин и разломов. Сравнение диаметров отверстий, пробитых в экранах частицами при моделировании и в натурном эксперименте, так же показывает точные результаты (5% погрешность относительно эксперимента).

Одноэкранные защитные конструкции. Все 6 расчетов моделируют воздействие компактной частицы в аномальном диапазоне (3 – 7 км/с). Повреждения, наносимые облаком осколков, делятся на два основных типа – зона сплошного кратерообразования и кольцевая зона повреждений. Границей этих двух областей, как правило, является «ореол» крупных кратеров.

Средняя погрешность при определении диаметра пробиваемого в лицевом экране отверстия относительно результатов натурных экспериментов не превысила 5%. Средняя погрешность параметров повреждений защищаемой стенки вызванных образованием осколочного облака после пробивания лицевого экрана относительно экспериментальных данных не превышает 8%.

В главе три представлены исследования массовых и импульсных характеристик продуктов разрушения, возникающих при столкновении частицы и тонкого экрана, так же проводится численный анализ откольных явления, возникающих в конструкциях при высокоинтенсивном нагружении.

В п.3.1 проведен анализ импульсных и массовых параметров материала, получившего импульс в прямом и обратном направлениях относительно скорости ударника. Анализ проведен посредством численных расчетов SPH методом, реализованном в программном комплексе ANSYS/Autodyn.

Рассматривается ударное воздействие компактной сферической частицы по нормали на металлическую пластину. Диапазон скоростей воздействия от 2 км/с до 10 км/с, с шагом 1 км/с. Толщина пластины – 2 мм, диаметр ударника варьируется в диапазоне от 2 мм до 10 мм с шагом 2 мм. Так же рассматриваются варианты с аналогичным отношением d_p/h (диаметр частицы/толщина экрана) – диаметр частицы 10 мм, толщина пластины 5; диаметр частицы – 5 мм, толщина пластины – 1 мм.

Материал частицы – алюминиевый сплав 2024–Т4, пластины – алюминиевый сплав 6061–Т6; для них имеется наиболее полная информация о свойствах материала. Используется уравнение состояния Ми-Грюнайзена и модель упрочнения Штейнберга–Гуйнана. Предельная величина растягивающего напряжения принята 1,2 ГПа для обоих материалов.

Здесь и далее, значение импульса «обратного» выброса отнесено к начальному импульсу частицы. Значение массы представляет собой для частицы отношение масса частицы, выброшенной в направлении, противоположном вектору скорости ударника, отнесена к начальной массе частицы, а масса пластины, выброшенной в этом направлении, - к общей массе материала, выбитого из пластины. Результаты расчетов представлены в таблицах 2–6.

Таблица 2 – Обратный выброс для случая $d_p/h = 1$

Скорость	км/с	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Импульс	Частица	0.0029	0.0059	0.0061	0.0067	0.0075	0.0050	0.0054	0.0061	0.0058
	Экран	0.0315	0.0705	0.0930	0.1295	0.1431	0.1498	0.1527	0.1747	0.1721
Масса	Частица	0.0163	0.0278	0.0295	0.0459	0.0524	0.0697	0.0653	0.0721	0.0606
	Экран	0.0864	0.1590	0.1973	0.2941	0.3012	0.2992	0.2702	0.4567	0.3702

Таблица 3 – Обратный выброс для случая $d_p/h = 2$

Скорость	км/с	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Импульс	Частица	0,0015	0,0035	0,0038	0,0039	0,0043	0,0034	0,0026	0,0026	0,0021
	Экран	0,0235	0,0417	0,0565	0,0671	0,0746	0,0807	0,0869	0,0864	0,0896
Масса	Частица	0,0114	0,0147	0,0163	0,0163	0,0196	0,0196	0,0245	0,0180	0,0163
	Экран	0,1640	0,2485	0,2277	0,2326	0,2600	0,3166	0,3752	0,3232	0,3519

Таблица 4 – Обратный выброс для случая $d_p/h = 3$

Скорость	км/с	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Импульс	Частица	0,0023	0,0031	0,0043	0,0028	0,0026	0,0028	0,0019	0,0017	0,0015
	Экран	0,0139	0,0310	0,0357	0,0438	0,0463	0,0488	0,0518	0,0513	0,0527
Масса	Частица	0,0064	0,0129	0,0122	0,0093	0,0086	0,0108	0,0093	0,0093	0,0079
	Экран	0,0606	0,2094	0,1989	0,2333	0,2686	0,2807	0,2811	0,3145	0,3401

Таблица 5 – Обратный выброс для случая $d_p/h = 4$

Скорость	км/с	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Импульс	Частица	0,0016	0,0027	0,0023	0,0035	0,0022	0,0016	0,0018	0,0010	0,0014
	Экран	0,0117	0,0224	0,0279	0,0300	0,0331	0,0344	0,0342	0,0349	0,0344
Масса	Частица	0,0060	0,0092	0,0072	0,0088	0,0072	0,0056	0,0060	0,0056	0,0052
	Экран	0,0690	0,2196	0,1870	0,1893	0,2344	0,2633	0,2674	0,3375	0,2989

Таблица 6 – Обратный выброс для случая $d_p/h = 5$

Скорость	км/с	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Импульс	Частица	0,0019	0,0016	0,0017	0,0024	0,0017	0,0013	0,0009	0,0011	0,0008
	Экран	0,0103	0,0170	0,0221	0,0227	0,0242	0,0249	0,0253	0,0252	0,0249
Масса	Частица	0,0067	0,0056	0,0064	0,0061	0,0046	0,0043	0,0036	0,0043	0,0030
	Экран	0,168	0,1648	0,2734	0,1895	0,1892	0,2433	0,2543	0,2886	0,2837

Проведенные расчеты позволяют сделать вывод о незначительности потерь относительной величины импульса при обратном выбросе материала (2 – 8%), несмотря на то, что происходит значительный обратный выброс материала, достигающий 20 – 25% относительно массы выбитой из экрана. Как было отмечено ранее, основную часть обратного импульса формирует материал экрана – относительный импульс материала частицы, вовлеченного в обратный выброс не превышает 1%.

Расчеты также подтверждают предположения об идентичности результатов для случаев с одинаковым отношением d_p/h . Из расчетов видно, что для случая и $d_p/h=5$ относительные массовые и импульсные характеристики продуктов обратного выброса практически не отличаются при варьировании толщины экрана и диаметра налетающей частицы (рисунок 2).

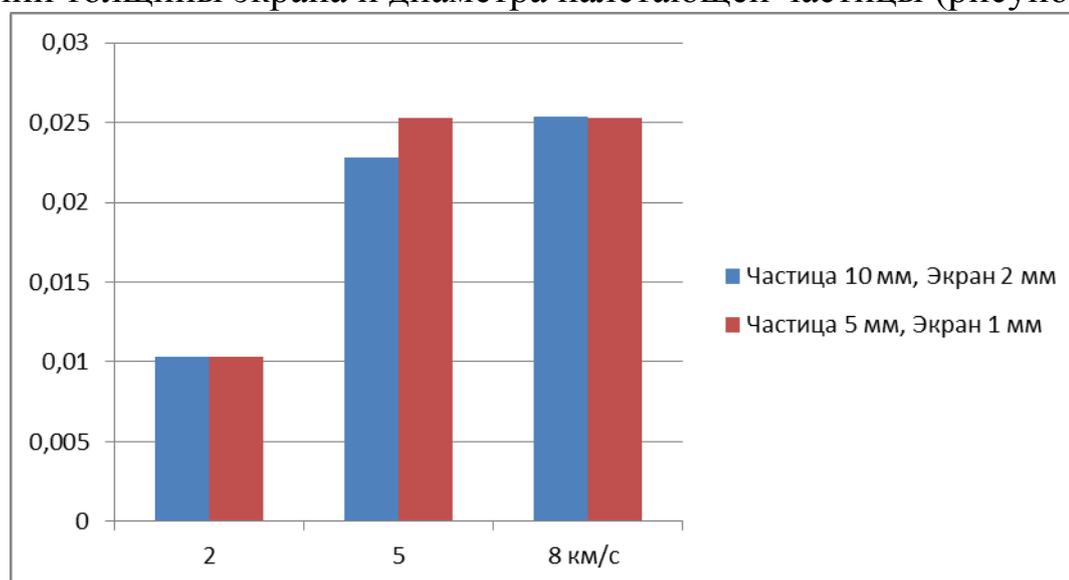


Рисунок 2 – Анализ обратного импульса материала экрана отнесенного к начальному импульсу частицы для $d_p/h = 5$, но при разных значениях диаметра частицы и толщины экрана

Практически весь материал частицы (99-100%) становится исходным для образования проходящего осколочного облака, выброс материала частицы в направлении обратном вектору удара практически отсутствует. Процентное содержание материала экрана в облаке вторичных осколков практически не

зависит от изменения скорости частицы, изменения прослеживаются в зависимости от отношения d_p/h . Данные приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Соотношение импульса в облаке вторичных осколков

d_p/h	1	2	3	4	5
Импульс частицы, %	60-70	55-60	67-73	75-78	80-83
Импульс экрана, %	28-31	35-40	27-35	23-25	19-21

Так же следует отметить, что в образовании вторичного облака осколков участвует, как правило, 65 – 80% массы материала экрана.

В п.3.2 анализируются импульсные параметры облака вторичных осколков, образующегося при взаимодействии ударника и тонкой пластины. Анализ проводится посредством численных расчетов SPH методом, реализованном в программном комплексе ANSYS/Autodyn.

Рассматривается нормальное соударение сферической частицы с металлической пластиной - лицевым экраном защитной конструкции. Диапазон скоростей воздействия 2 – 10 км/с, с шагом 1 км/с. Толщина пластины – 2 мм, диаметр ударника варьируется в диапазоне от 2 мм до 10 мм.

В качестве материалов частицы и экрана использовались алюминиевые сплавы.

Концентрация импульсного воздействия лежит в зоне так называемого сплошного кратерообразования, именно в этой зоне на защищаемую стенку приходится воздействие облака вторичных осколков. На бóльшем удалении от оси воздействия находится область кольцевого повреждения. Вместе эти две зоны образуют общую область повреждений. Наибольший интерес представляет распределение импульса в зоне сплошного кратерообразования.

Результаты расчетов представлены в таблице 8. Низкоскоростной диапазон воздействия не представлен т.к. не разрушается ударник и не происходит образования осколочного облака. На основании расчетов были получены следующие аппроксимации зависимостей:

– для полуугла разлета, зависит только от скорости удара :

$$\alpha = 3.36 * V_0^{0.9} \quad (22)$$

где α – полуугол разлета, °; V_0 – скорость удара, км/с.

– для разницы максимальной скорости на оси симметрии облака вторичных осколков и скорости облака в крайней координате области сплошных повреждений, зависит только от скорости удара:

$$V = 0.021 * V_0^{2.1} \quad (23)$$

где V – разница максимальной скорости на оси симметрии облака вторичных осколков и скорости облака в крайней координате области сплошных повреждений, км/с; V_0 – скорость удара, км/с.

– для максимальной скорости материала на оси симметрии в облаке вторичных осколков:

$$V_1 = (0.75V_0 - 0.4) \left(\frac{d}{h}\right)^{0.2} \quad (24)$$

где h – толщина экрана, мм; d – диаметр частицы, мм; V_1 – максимальная скорость материала на оси симметрии в облаке вторичных осколков, км/с; V_0 – скорость удара, км/с.

Таблица 8 – Результаты численных расчетов

d_p/h	Скорость воздействия, км/с	Радиус отверстия в лицевом экране, мм	Радиус сплошных повреждений, мм	Полуугол разлета облака осколков, °
2	4	4,38	35	8,65
2	5	5,22	52	13,09
2	6	5,42	62	15,71
2	7	5,76	70	17,72
2	8	6,16	78	19,66
2	9	6,43	85	21,34
2	10	6,65	91	22,75
3	4	6,41	42	10,04
3	5	6,79	58	14,29
3	6	7,08	68	16,85
3	7	7,48	79	19,58
3	8	7,75	90	22,24
3	9	7,96	100	24,58
3	10	8,26	115	23,79
4	4	7,70	48	11,33
4	5	8,38	61	14,66
4	6	8,73	73	17,72
4	7	8,87	82	19,98
4	8	9,08	89	21,67
4	9	9,29	100	24,27
4	10	9,49	106	25,63
5	4	8,77	49	11,31
5	5	9,02	62	14,76
5	6	9,91	70	16,64
5	7	10,01	81	19,44
5	8	10,30	88	21,12
5	9	10,50	96	23,03
5	10	10,73	102	24,40

На основе анализа всех расчетных случаев можно построить аппроксимацию огибающей импульсного воздействия облака вторичных осколков в зоне сплошного кратерообразования. Для описания огибающей распределения импульса (рисунок 3) в зависимости от координаты подходит следующая аппроксимация:

$$I_r = \frac{m}{\pi R^2} \left(V_1 - V \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (25)$$

где r – удаленность от оси симметрии, м; I_r – удельный импульс воздействия в точке с координатой r , Н*с/м²; m – масса облака вторичных осколков, кг; V_1 – максимальная скорость материала на оси симметрии в облаке вторичных осколков, м/с; V – разница максимальной скорости на оси симметрии облака вторичных осколков и скорости облака в крайней координате области сплошных повреждений, м/с; R – радиус разлета облака осколков, м.

При известных углах разлета облака осколков, диаметре отверстия в

лицевом экране и расстоянии между защищаемой стенкой и лицевым экраном с помощью простых геометрических соотношений определяется величина R – радиус разлета облака вторичных осколков. Величина массы облака вторичных осколков складывается из массы частицы (98 – 99% начальной массы частицы) и массы материала выбитой из экрана (70 – 80% массы выбитой из лицевого экрана).

Стоит отметить, что разработанная методика применима к задачам ударного воздействия в средне– и высокоскоростных диапазонах (>3 км/с) компактной частицы на «тонкие» экраны ($d/h > 2$). Кроме того, расстояние между лицевым экраном и защищаемой стенкой не должно быть меньше диаметра частицы.

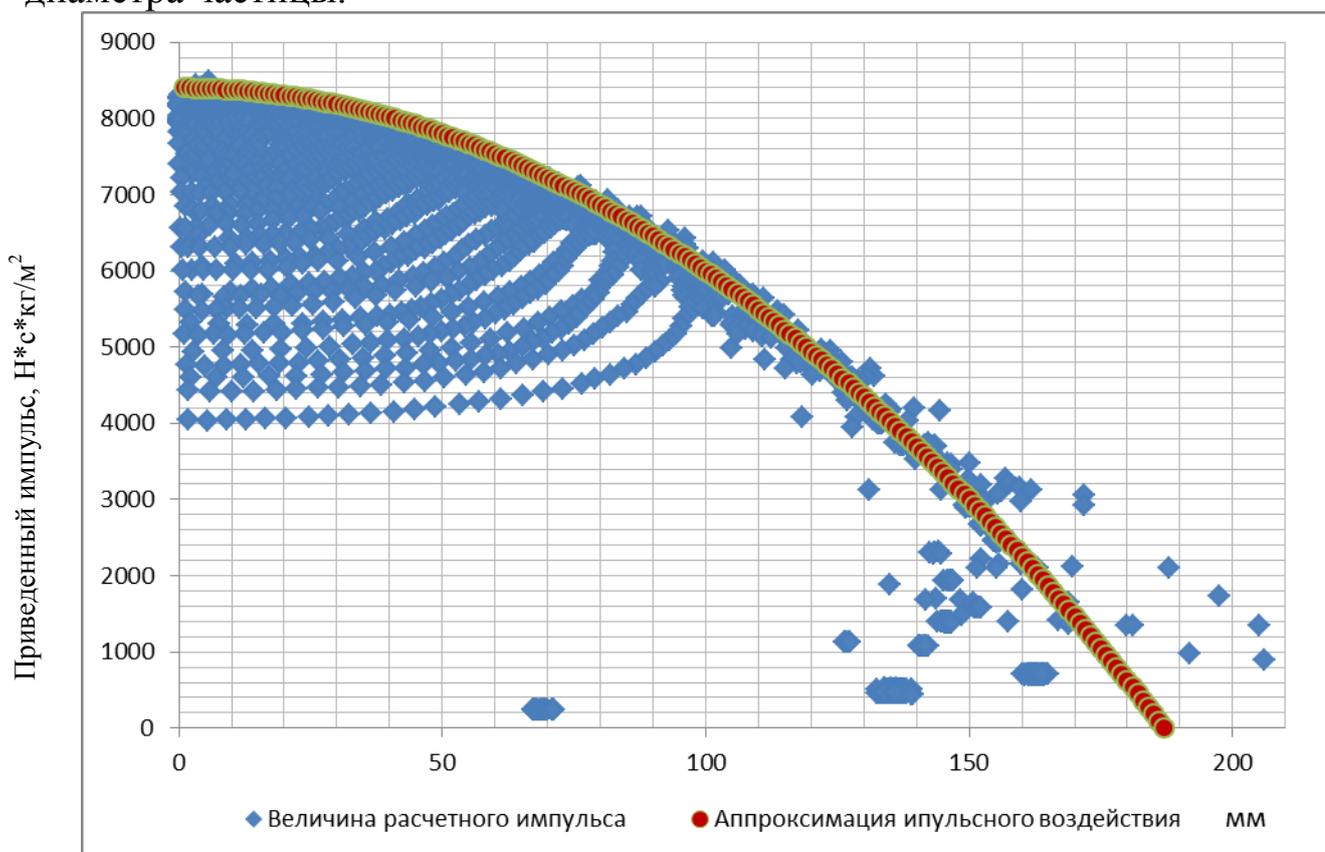


Рисунок 3 – Распределение импульса облака осколков на защищаемую стенку

Сравнительный анализ показал, что максимальная погрешность импульса, вычисленного по аппроксимационной формуле относительно импульса по результатам численного анализа не превышает 7%, средняя погрешность составляет около 4%.

В п.3.3 проводится численный анализ откольных явления, возникающих в конструкциях при высокоинтенсивном нагружении.

Откольные явления часто встречаются в процессах, связанных с высокоинтенсивным нагружением, например, при ударном или взрывном воздействии. В рассматриваемых случаях откол зачастую происходит при воздействии облака вторичных осколков на защищаемую стенку. Это связано с тем, что при взаимодействии облака в экране образуется практически плоская

ударная волна, отражаясь от задней свободной поверхности экрана, ударная волна становится волной растяжения, и при достижении критического значения растягивающего напряжения происходит разрушение материала - откол.

Общепринятым экспериментом по определению откольной прочности материала является соударение двух пластин (рисунок 4). Этот опыт является очень наглядным для изучения процесса распространения плоских волн в материале и наблюдения откольных явлений.

Рассмотрим численную модель данного эксперимента, построенную в среде ANSYS/Autodyn. Для построения и расчета модели используется бессеточный SPH метод. Скорости воздействия составляют 500 м/с и 1000 м/с. Толщина пластин – 5 мм, длина и ширина – 20 мм. При моделировании используются свойства алюминиевого сплава 6061–Т6.

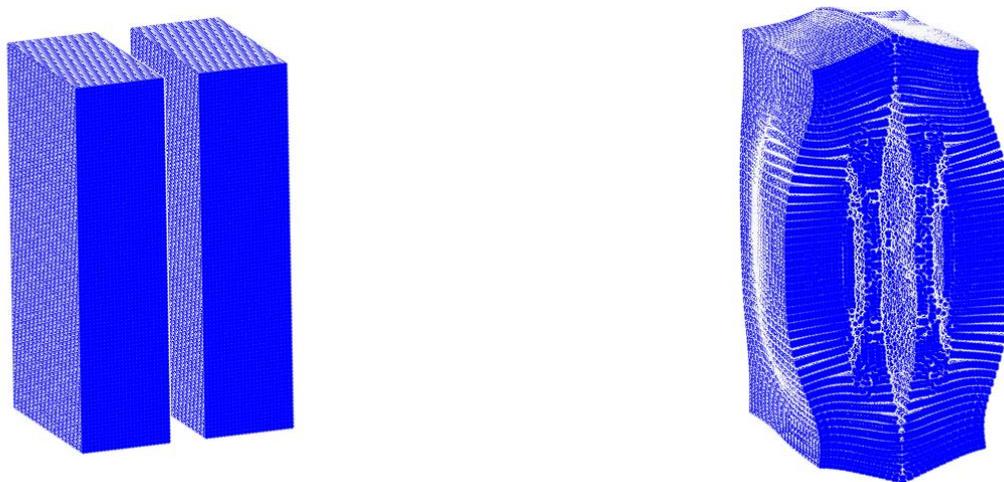


Рисунок 4 – Визуализация расчета по столкновению пластин.

Как видно из результатов расчета в центральной части обеих пластин образуется трещина, наблюдается выпучивание тыльной стороны пластин. Трещинообразование и выпучивание происходит в той области пластины, где сохраняется плоский фронт ударной волн, ближе к краям пластины ударная волна затухает за счет наличия свободных поверхностей.

Аналогичным образом откольные явления реализуются в элементах экранной защиты, только в роли ударяющей пластины выступает облако вторичных осколков.

«Уловить» откольное явление в численном эксперименте по пробитию многоэкранной защитной конструкции является непростой задачей; основная причина – это сложности с описанием реальных свойств материала. Если рассматривать воздействие осколочного облака на защищаемую стенку, то откольное явление реализуется в достаточно узком диапазоне внешнего воздействия: незначительное отклонение импульса в меньшую сторону приводит только к деформации защищаемой стенки без откола. Незначительное отклонение импульса в большую сторону приводит к

сквозному пробиванию защищаемой стенки.

Рассмотрим натуральный эксперимент, и результаты его численного моделирования (таблица 9, рисунок 5). Условия эксперимента: ударное воздействие компактной сферической частицы по нормали на одноэкранную защитную конструкцию, материал частицы – алюминиевый сплав AL2017, диаметр частицы – 3,17 мм, материал лицевого экрана и защищаемой стенки – алюминиевый сплав АМг–6, толщина лицевого экрана – 0,95 мм, толщина защищаемой стенки – 1,43 мм, расстояние между лицевым экраном и стенкой – 50 мм, скорость удара – 6 км /с. При расчете в качестве материала ударника используется модель алюминиевого сплава 2024–Т4, для экранов ЭЗК – алюминиевый сплав 6062–Т6.

Таблица 9 – Анализ расчетных и экспериментальных данных

Параметр повреждения	Экспериментальные данные, мм	Расчетные данные, мм
Отверстие в лицевом экране	6,9	7,1
Отверстие в защищаемой стенке	1,2-2,2	1,7
Поле сплошных повреждений на защищаемой стенке	40	38
Поле кратеров на защищаемой стенке	100	93
Область откола тыльной поверхности защищаемой стенки	14	15

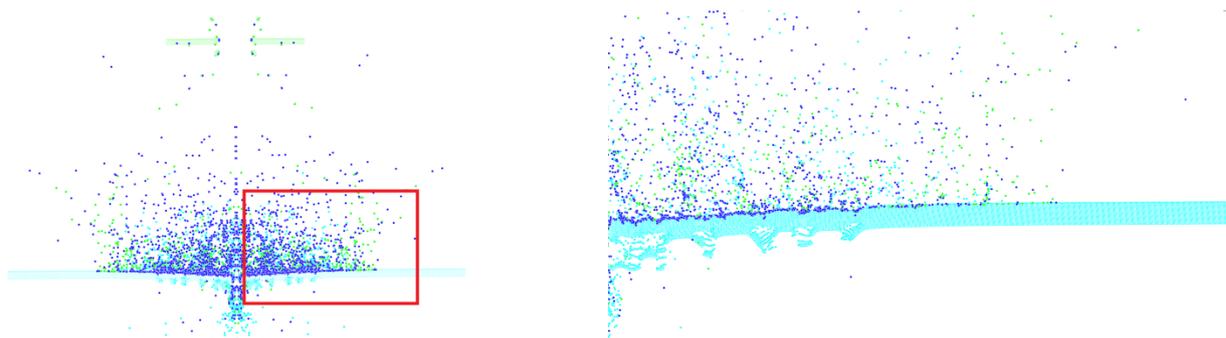


Рисунок 5 – Образование откола в защищаемой стенке

Результаты численного анализа показывают близкое, как качественное, так и количественное совпадение с экспериментальными данными. Однако, в численном расчете область откола диаметром 15 мм делится на дискретные зоны – наблюдается частичное отколообразование, в то же время некоторые зоны остаются неразрушенными. В реальном эксперименте наблюдается равномерное разрушение экрана в области откола.

В главе четыре излагаются результаты анализа ударной стойкости гермооболочек модулей Российского сегмента Международной космической

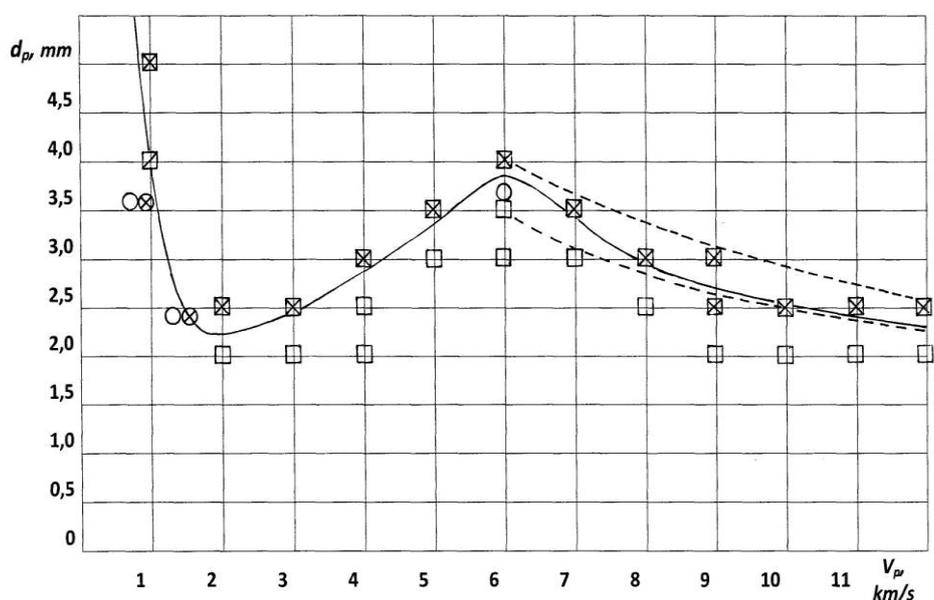
станции (МКС), проведенного на основе численного моделирования.

В п.4.1 проведено расчетное уточнение баллистических предельных зависимостей для Служебного модуля, с использованием SPH метода.

Оценка вероятности непробоя гермооболочки СМ показала несоответствие требованиям Спецификации SSP 41163. В период с 2002 г. по 2006 г. в РКК «Энергия» совместно с ЦНИИмаш были разработаны и установлены на СМ 23 дополнительных противоосколочных панели, защищающие наиболее слабо защищенную коническую часть корпуса между рабочими отсеками большого и малого диаметра.

При разработке экранной защиты Служебного модуля использовались инженерные методики расчета. В данной работе для уточнения БПЗ стенок гермооболочки СМ были проведены систематические расчеты с использованием SPH метода, реализованного в программном комплексе ANSYS/Autodyn.

При проведении расчетов были выбраны следующие интервалы изменения значений диаметров частиц и скоростей соударения: $\Delta V = 1000$ м/с, $\Delta d_p = 0,5$ мм. Расчет проводился для скоростей соударения от 1000 до 12000 м/с. В качестве исходных значений диаметров при фиксированном значении скорости задавались критические диаметры, рассчитанные по инженерной методике. После получения расчетной пары диаметров “пробой” - “непробой” для всего расчетного диапазона скоростей производился уточненный расчет значений критических диаметров в точках экстремумов БПЗ.



— — расчет по инженерной методике, ○ — экспериментальные данные,
□ — расчет ANSYS/Autodyn, — — — расчеты по трендам NASA.

Рисунок 6 – БПЗ зоны 6 Служебного модуля МКС

На рисунке 6 показаны результаты расчетов ударной стойкости стенок гермоотсека СМ, снабженных одноэкранными защитными конструкциями

(зона № 6), при ударе по нормали. Параметры зоны 6: лицевой экран из сплава АМг–6 толщиной 1 мм, отнесенный на 50 мм от защищаемой стенки из сплава АМг–6 толщиной 1,6 мм.

Представлены результаты расчетов (зоны 6 и 10), полученные с помощью вычислительного программного комплекса ANSYS/Autodyn, и уточненные по результатам этих расчетов баллистические предельные зависимости, полученные по инженерной методике, основанной на деформационной модели пробоя тонкостенных конструкций.

В п.4.2 проведено расчетное уточнение баллистических предельных зависимостей для Многоцелевого лабораторного модуля.

В разделе представлены численные расчеты зон № 6а, 6б, 24а и 24б.

Конфигурация зон № 6а и 6б представляет собой двухэкранные защитные конструкции с параметрами: лицевой экран из сплава АМг–6 толщиной 1 мм, отнесенный на 80 мм от промежуточного экрана толщиной 1 мм, расположенного на расстоянии 30 мм от такой же защищаемой стенки толщиной 2,45 мм. Конфигурация зон № 24а и 24б, представляет собой одноэкранные защитные конструкции с параметрами: лицевой экран из сплава АМг–6 толщиной 1,5 мм, отнесенный на 65 мм от защищаемой стенки толщиной 4 мм.

Для уточнения БПЗ стенок гермооболочки МЛМ были проведен ряд расчетов с использованием вычислительного программного комплекса ANSYS/Autodyn. Применялся бессеточный SPH – метод, реализованный в программном комплексе.

При проведении расчетов для двухэкранных конструкций были выбраны следующие интервалы изменения задаваемых значений диаметров частиц и скоростей соударения: $\Delta V = 2$ км/с, $\Delta d_p = 1$ мм, Скорости соударения 2 – 10 км/с. Для одноэкранных конструкций были выбраны следующие интервалы изменения задаваемых значений диаметров частиц и скоростей соударения. $\Delta V = 1$ км/с, $\Delta d_p = 0,5$ мм. Скоростей соударения 2 – 12 км/с. В качестве исходных значений диаметров при фиксированном значении скорости задавались критические диаметры, рассчитанные по инженерной методике. После получения расчетной пары диаметров “пробой” - “непробой” для всего расчетного диапазона скоростей производился уточненный расчет значений критических диаметров в точках вдоль БПЗ, полученной по инженерной методике.

На рисунке 7 показано визуализация стадий взаимодействия ударника и ЭЗК. В качестве объекта визуального представления выбраны зоны № 6а и 6б.

На рисунке 8 представлены результаты расчетов, полученные с помощью SPH – метода и уточненные по результатам этих расчетов баллистические предельные зависимости, полученные по инженерной методике.

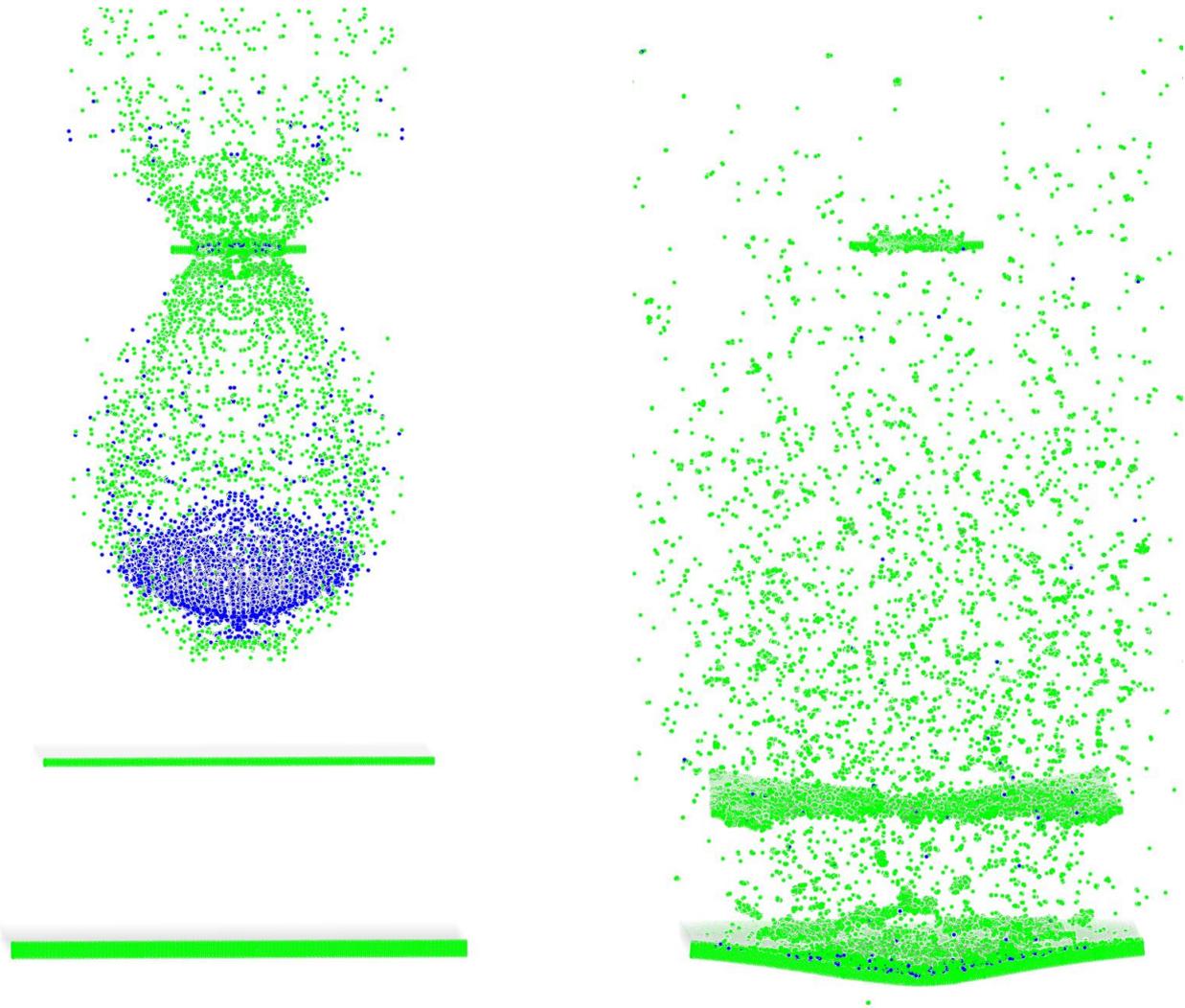


Рисунок 7 – Результаты расчетов (зоны 6а и 6б, $V = 6$ км/с, $d_p = 5$ мм)

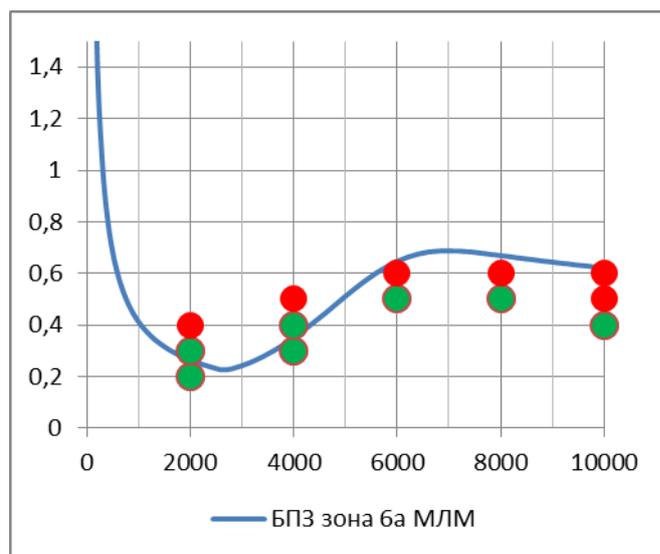
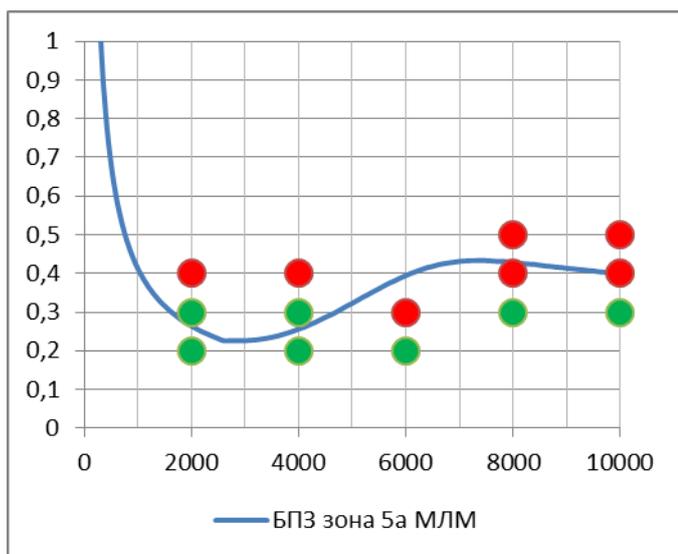


Рисунок 8 - Уточнение БПЗ для зон 5а и 6а МЛМ

В п.4.3 представлены результаты численных исследований разрушения элементов систем самогерметизации трубочного и пакетного типа. Исследования проводилось с использованием SPH метода.

Для исследований разрушений носителей жидких компонент при высокоскоростном ударе проводилась серия расчетов элементов опытных образцов без заполнения и с заполнением носителей.

Трубочные схемы

Рассматривается воздействие компактной частицы на заполненный жидкостью и незаполненный ряд трубок системы самогерметизации. Диаметр налетающей частицы 6 мм, диаметр трубки 10 мм, толщина трубки 0,5 мм. Для частицы использовалась модель алюминиевого сплава 6061–Т6, для трубок – модель материала из полиэстера. Жидкость задавалась как вода, так как физические свойства химических реагентов очень близки к свойствам воды. Моделировалось воздействие по нормали со скоростью 7 км/с.

Численный эксперимент при расчете незаполненной трубочной схемы указывает на незначительные повреждения элементов конструкции. Налетающая частица разрушает одну из трубок и сильно деформируется сама, осколки частицы и разрушенной трубки разрушают соседние трубки и незначительно деформируют последующие.

При воздействии частицы на заполненные трубочные элементы конструкций, в жидкости, заполняющей трубки, возникает давление порядка 100 ГПа. Интенсивность воздействия со временем затухает. В трубке, подверженной непосредственному удару, значение давления на фронте ударной волны падает до 10 ГПа, в соседних трубках амплитуда ударной волны имеет значения 1 ГПа. При прохождении возмущения через третью по счету трубку, значение амплитуды давления снижается с 0,1 ГПа до 0,01 ГПа. Следующие трубки получают значительные осколочные повреждения и так же разрушаются. В результате расчета было выявлено возникновение значительных повреждений конструкции, вызванных гидроударом.

Пакетные схемы

Рассматривается воздействие компактной частицы на заполненный жидкостью и незаполненный пакетный макет системы самогерметизации. Диаметр налетающей частицы 6 мм, общая толщина пакета 10 мм, толщина стенки пакета 0,5 мм, длина пакета 100 мм. Для частицы использовалась модель алюминиевого сплава 6061–Т6, для пакета – модель материала из полиэстера. Жидкость задавалась как вода. Моделировалось воздействие по нормали со скоростью 7 км/с.

Численный расчет ударного воздействия на незаполненную пакетную схему показывает незначительные повреждения элементов конструкции. Налетающая частица разрушает стенки пакета, образуя отверстия размером порядка своего диаметра, и сильно деформируется.

При воздействии частицы в высокоскоростном диапазоне на

заполненные пакетные элементы конструкций, в жидкости, заполняющей пакеты, возникает давление порядка 10^6 атм. Наблюдаются разрушение и выплеск материала. Интенсивность возмущения в жидкости со временем затухает. При прохождении возмущения через весь пакет, значение амплитуды давления снижается до 300 атм. Материал стенки пакета не может выдержать столь интенсивные давления и должен порваться. В результате следует сделать вывод, что заполненная пакетная схема не является эффективной в высокоскоростном диапазоне ударного воздействия

Как и в случае с трубчатой схемой в результате расчета было выявлено возникновение повреждений конструкции, вызванных гидроударом, что говорит о неэффективности использования схем, заполненных реагентами.

В **заключении** сформулированы следующие основные результаты и выводы по проведенной автором диссертационной работе.

1. Разработана методика численного моделирования процессов соударения частиц с конструкциями на основе метода сглаженных частиц с использованием программного комплекса ANSYS/Autodyn. На основе разработанной методики проведен комплекс исследований процессов высокоскоростного соударения защитных экранов с компактными частицами применительно к расчету экранной защиты космических аппаратов, позволяющий повысить точность определения параметров стойкости к ударному воздействию.

2. Проведен анализ характеристик облака вторичных осколков, образующегося при соударении частицы и металлического экрана. Масса продуктов разрушения, образующих обратный выброс материала, составляет, 20 – 25% массы разрушенной части экрана и не более 1% массы частицы. Величина импульса обратного выброса составляет 2 – 8% от начального импульса частицы. Для тонких экранов ($dp/h > 2$) импульс облака вторичных осколков составляет не менее 95% от начального импульса частицы. По результатам анализа подтверждены предположения инженерных методик, используемых для определения параметров ударной прочности защитных конструкций.

3. На основе ряда расчетов получены зависимости, определяющие удельный импульс облака мелкодисперсных вторичных осколков, воздействующего на защищаемую стенку, от скорости удара, массы частицы, соотношения толщины экрана и диаметра частицы для наиболее практически важного случая, когда материалы частицы и экрана – алюминиевые сплавы. Полученные зависимости применимы при $2 < dp/h < 5$, в средне- и высокоскоростном диапазонах ударного воздействия. Полученные зависимости необходимы для повышения точности расчета прочности защищаемой конструкции.

4. Анализ результатов численного исследования образования откольных разрушений в защищаемой конструкции (гермооболочке) при

воздействии на нее облака вторичных осколков показывает хорошее соответствие экспериментальным данным. Установлено, что откольные разрушения необходимо учитывать при построении баллистических предельных зависимостей.

5. Проведено расчетное уточнение баллистических предельных зависимостей для Служебного модуля и Многоцелевого лабораторного модуля Российского сегмента Международной космической станции. Полученные результаты рекомендуется использовать для уточнения инженерных методик расчета БПЗ, применяемых в практике проектирования экранной защиты.

6. Анализ результатов расчетов, сравнение с экспериментальными данными, полученными в ЦНИИмаш и Центре им. Л. Джонсона (NASA) позволяют заключить, что разработанная методика с необходимой для практики точностью позволяет моделировать процессы деформирования, разрушения и отколообразования в тонкостенных элементах конструкций космических аппаратов при ударе частиц космического мусора и метеороидов и может использоваться для расчета баллистических предельных зависимостей.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Юдин Е.Ю. Численное моделирование откольных явлений при высокоскоростном соударении пластин // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Молодежь в ракетно-космической отрасли», ФГУП ЦНИИмаш, 2009, с. 34.

2. Юдин Е.Ю. Численное моделирование плоских ударных волн в конденсированных средах // Труды 52-й научной конференции МФТИ, Часть 3, Том 1, 2009, с. 127-129.

3. Юдин Е.Ю. Расчет диаметра отверстия, пробиваемого в защитном экране алюминиевой сферической частицей при ударе по нормали // Космонавтика и ракетостроение №1(58), 2010, с. 75-81.

4. Юдин Е.Ю. Методика численного расчета ударной стойкости многоэкранных защитных конструкций космических аппаратов при воздействии метеороидов и техногенных осколков // Тезисы докладов научных чтений, посвященных 90-летию со дня рождения Ю.А. Мозжорина, 2010, с. 121-123.

5. Юдин Е.Ю. Использование SPH-метода при расчете ударной стойкости многоэкранных защитных конструкций космических аппаратов при воздействии метеороидов и техногенных осколков // Труды 53-й научной конференции МФТИ, Часть 3, Том 1, 2010, с. 78-80.

6. Буслев Е.П., Юдин Е.Ю. Расчетно-экспериментальное исследование повреждений защитных экранов космических аппаратов при ударах высокоскоростных частиц // Космонавтика и ракетостроение №1(66), 2012, с. 82-92.

7. Абашкин Б.И., Буслев Е.П., Юдин Е.Ю. и др., Защита космических аппаратов от метеороидов и осколков космического мусора. Результаты и перспективы // Тезисы докладов XXXIII Всероссийской конференции по проблемам науки и технологии, 2013, с. 56.