

На правах рукописи

Нечунаев Алексей Федорович

**Моделирование процессов высокоскоростного удара  
и взрыва методом частиц с учетом фазовых превращений**

Специальность 01.02.04 - механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

**Фрадков Александр Львович**

Официальные оппоненты: **Киселев Алексей Борисович**

доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры газовой и волновой динамики  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский государственный университет  
имени М.В.Ломоносова»

**Медведев Сергей Павлович,**

доктор физико-математических наук,  
заведующий лабораторией гетерогенного горения  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт химической физики им. Н.Н. Семенова  
Российской академии наук (ИХФ РАН)

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного  
совета Д 212.232.30 при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу:  
198504, г. Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28, математико-  
механический факультет, ауд. \_\_\_\_.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им.М.Горького Санкт-  
Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург,  
Университетская наб., 7/9 и на сайте

<https://dissert.spbu.ru/dissert/soiskatelyu-uchjonoj-stepeni/dis-list/details/14/1651.html>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Е.В. Кустова

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы

Актуальность рассматриваемых в диссертационной работе задач обусловлена прежде всего тем, что имеется практическая потребность в расчете последствий высокоскоростного удара и взрыва в целом ряде практически важных ситуаций, среди которых можно отметить три задачи.

Во-первых, для задач исследования эффективности гашения энергии ударника при ударе на высоких скоростях в условиях космоса, для защиты космических аппаратов от микрометеороидов и частиц техногенного космического мусора. Объем техногенного космического мусора растет с каждым годом. Известно, что многослойные защитные экраны, щиты Уиппла, вообще разнесенные преграды эффективно поглощают энергию ударника, синтезируя после пробития первой преграды вместо летящего компактного тела облако осколков, кинетическая энергия частиц которого во много раз меньше энергии компактного ударника. Однако эффективные вычислительные модели для многослойных и разнесенных преград в настоящее время отсутствуют, а существующие эмпирические и статистические модели для однослойных преград не удовлетворяют потребностям практического создания современных космических аппаратов.

Во-вторых, для исследования эффективности гашения энергии удлинённого ударника-стержня в задачах защиты военной техники и оборудования от попадания кумулятивной струи. Известно, что кумулятивную струю в модельной постановке можно заменить удлинённым ударником-стержнем определенного диаметра, задав скоростной градиент частиц. Проектирование эффективных защитных экранов от кумулятивной струи – основная задача, которая ложится на вычислительные модели.

В-третьих, актуальными являются защита и предупреждение террористических актов в Российской Федерации. Детектирование взрывных устройств на основе взрывчатых веществ, размещенных на теле террориста-самоубийцы, является непростой задачей. Различные методы и технологии, включая детектирование паров взрывчатых веществ с помощью масс-спектрометрии, газовой хроматографии, хемилюминесценции, спектрометрии ионной подвижности, а также других подобных методов, неэффективны в условиях непрерывного потока людей (у входов в транспортный терминал или места большого скопления людей). Одним из способов снижения опасности и разрушительной силы теракта является применение специальных шлюзов с большой пропускной способностью. Известно, что взрывную волну хорошо гасит двухфазная среда, однако эффективные вычислительные модели распространения ударной волны внутри шлюза такого рода в настоящее время отсутствуют. Без предварительного анализа последствий взрыва внутри шлюза при помощи вычислительной модели невозможно качественно спроектировать такой шлюз. Кроме этого, ежедневно, на станциях и в вагонах метро обнаруживаются бесхозные предметы. Таким образом, вопросы анализа последствий взрыва в малых компактных устройствах различных конфигураций, предназначенных для подавления взрыва и состоящих в основном из двухфазной среды, также весьма актуальны.

## **Цель работы**

Построить вычислительные модели высокоскоростного удара и взрыва для ударного нагружения преграды телом различной формы и исследования распространения ударной волны внутри шлюза

**Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:**

- 1.Высокоскоростной удар алюминиевой сферы в тонкую алюминиевую преграду
- 2.Высокоскоростной удар алюминиевой сферы в игольчатую структуру
- 3.Задача распространения ударной волны внутри шлюза (шлюз представлен двухфазной средой)
- 4.Высокоскоростной удар алюминиевого цилиндра в монолит
- 5.Высокоскоростной удар куба, масса которого эквивалентна массе сферы (задача 1)
- 6.Высокоскоростной удар в постановке плоского напряженного состояния
- 7.Высокоскоростной удар кубика миллиметрового размера в тонкую наклонную алюминиевую пластину
- 8.Распространение ударной волны внутри сфер из воды
- 9.Высокоскоростной удар двух ударников

## **Научная новизна**

1. Построена вычислительная модель высокоскоростного удара сферического ударника в тонкую алюминиевую преграду. Найдены значения параметров модели материала по Джонсону-Куку, которая учитывает возникновение жидкой фазы материала. Адекватность модели с найденными параметрами подтверждена хорошим согласием с известными результатами натуральных экспериментов, учитывая весьма точную картину образования авангарда облака осколков, а также его эволюцию.

2. В вопросах, связанных с проектированием защитных экранов космических аппаратов, диссертантом предложено применять игольчатую структуру типа «щетка».

Показано, что игольчатая структура гораздо эффективнее противостоит высокоскоростному удару, чем монолитная, т.к. при сравнении с монолитом пробой наступает при большей начальной скорости (масса ударника та же).

3. Построена вычислительная модель распространения ударной волны внутри шлюза, состоящего из двухфазного материала, учитывающая поглощение определенной доли энергии двухфазной средой, а также частичное отражение волн от стенок.

4. Показано, что при высокоскоростном ударе в разнесенную преграду несферическим ударником, ударником цилиндрической или кубической формы, когда удар происходит ребром ударника, интенсивность нагружения второй преграды не может быть значительно уменьшена увеличением расстояния между первой и второй преградой, так как облако осколков расширяется неравномерно, а большая масса осколков от пробития первой преграды сосредоточена на оси удара.

5. Выявлено, что при детонации взрывчатого вещества внутри водяной сферы передача кинетической энергии воде в постановке, когда между взрывчатым зарядом сферической формы и водой присутствует прослойка с плотностью, которая много ниже плотности воды, в 2 раза ниже по сравнению с постановкой, когда такая прослойка отсутствует.

### **Научная ценность**

1. Найденные значения параметров модели материала по Джонсону-Куку, которая учитывает возникновение жидкой фазы материала, позволяют строить другие вычислительные модели высокоскоростного удара, с другой геометрией, с другими размерами частиц SPH, на других скоростях (в пределах заданного диапазона), и т.д.

2. Исследована эволюция облака осколков при высокоскоростном ударе куба: для случая, когда удар происходит гранью куба и для случая, когда удар происходит ребром куба. Построены поля скоростей для указанных случаев, проведен анализ.

3. Установлено, что эволюция наклонного удара в игольчатую структуру (под углом 5 градусов) качественно такая же, как и при нормальном ударе; игольчатая структура при высокоскоростном ударе под углом также эффективно противостоит ударному нагружению, как и нормальном ударе.

4. Установлено, что при работе вычислительной модели распространения ударной волны внутри шлюза на периферии можно получить ударную волну, которая по амплитуде практически в 4 раза меньше по сравнению с открытым подрывом (шлюз представлен двухфазной средой).

### **Практическая значимость**

1. Полученный результат по эффективности игольчатой структуры позволяет проектировать защитные экраны для космических аппаратов, существенно превышающие по характеристикам существующие.

2. Вычислительную модель распространения ударной волны внутри шлюза можно применять для проектирования взрывозащитного шлюза, который в 4 раза лучше гасит взрывную волну по сравнению с открытым подрывом. Представляется возможность вести проектирование других шлюзов для транспортных терминалов с различной геометрией и толщиной стенки.

3. Поскольку при детонации взрывчатого вещества внутри водяной сферы передача кинетической энергии воде в постановке, когда между взрывчатым зарядом сферической формы и водой присутствует прослойка с плотностью, которая много ниже плотности воды, в 2 раза ниже по сравнению с постановкой, когда такая прослойка отсутствует; то это позволяет проектировать мобильные устройства для подавления взрывов, в которых будет присутствовать аналогичная пустотная прослойка.

## **Достоверность**

Достоверность основных утверждений диссертации подтверждена компьютерным моделированием, а также верификацией базовой вычислительной модели - сравнением с результатами натурального эксперимента.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Для задачи высокоскоростного удара сферического ударника найдены значения параметров модели материала по Джонсону-Куку, которая учитывает возникновение жидкой фазы материала.

Адекватность модели с найденными параметрами подтверждена хорошим согласием с известными результатами натуральных экспериментов.

2. Игольчатая структура гораздо эффективнее противостоит высокоскоростному удару, т.к. при сравнении с монолитом пробой наступает при большей начальной скорости (масса ударника одинаковая). Эволюция отклоненного удара (5 градусов) качественно такая же, как и при нормальном ударе.

3. Создана вычислительная модель распространения ударной волны внутри шлюза, состоящего из двухфазного материала, учитывающая поглощение определенной доли энергии двухфазной средой, а также частичное отражение волн от стенок.

## **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на XX Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности» 3-6 апреля 2017г., Санкт-Петербург; на XI Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму», 12-14 апреля, 2016г., Санкт-Петербург; на XII Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы обеспечения безопасности и противодействия терроризму», 25-27 апреля, 2017г.; ежегодных IV, V и VI Мемориальных семинарах профессора Б.Е. Гельфанда в университете ГП МЧС РФ в 2015, 2016, 2017гг.; на XIX Всероссийской научно-практической конференции РАН 4-7 апреля 2016г., Санкт-Петербург; на XIV конференции молодых ученых посвященной дню космонавтики «Фундаментальные и прикладные космические исследования», 12-14 апреля 2017г.; на международном симпозиуме Безопасность космических полетов «Space flight safety», 3-5 июля 2017г., Санкт-Петербург. Результаты работы докладывались на семинаре кафедры физической механики Санкт-Петербургского государственного университета.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1-6], из них 4 в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, из них 3 в журналах из базы данных SCOPUS.

Работы [1-6] написаны в соавторстве. В работе [1] Нечунаеву А.Ф. принадлежит описание теоретических подходов и выбор метода, вычислительное моделирование, Поняеву С.А, Куракину Р.О., Седову А.И, Бобашеву С.В., Жукову Б.Г. – общая постановка задачи, подготовка рельсотрона, проведение натурального эксперимента, анализ экспериментальных данных. В [2] Нечунаеву А.Ф. принадлежит вычислительное моделирование и подбор параметров к модели материала по Джонсону-Куку, Сильникову М.В. - общее руководство исследованием, Гуку И.В. – обширный анализ результатов вычислительного моделирования, Смирнову Н.Н. – идея исследования, анализ и сравнение с уже опубликованными соавторами результатами экспериментов. В [3] Нечунаеву А.Ф. принадлежит идея исследования и модель высокоскоростного удара в игольчатую структуру; Гуку И.В. – анализ результатов вычислительного моделирования и расчет сравнения с монолитом, Михайлину А.И. - выбор методов решения, анализ перспектив практического применения защитных экранов с использованием игольчатых структур; Сильникову М.В. – общее руководство исследованием и анализ полей скоростей на этапе эволюции осколков. В [4] Нечунаеву А.Ф. принадлежит идея исследования и вычислительное моделирование распространения ударной волны внутри шлюза; Михайлину А.И. – общая постановка задачи, выбор методов решения, анализ практического приложения полученных результатов; Смирнову Н.Н. – анализ эффектов сжимаемости диспергента и путей увеличения отбора энергии взрыва двухфазной средой. В [5] Нечунаеву А.Ф. принадлежит идея решения задач в постановке плоского напряженного состояния и проведение показательного вычислительного эксперимента; Сильникову Н.М. – описание методологии защиты и верификация численного решения; Чернышову М.В. - общее руководство исследованием. В [6] Нечунаеву А.Ф. принадлежит вычислительная модель высокоскоростного удара двух ударников, Поняеву С.А. – подготовка и проведение натурального эксперимента на рельсотроне.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, приложения и списка литературы из 102 наименований. Общий объем диссертации составляет 148 страниц, включая 93 рисунка.

### **Содержание работы**

Во **введении** кратко описано современное состояние изучаемой проблемы, обоснована его актуальность. Сформулированы цели работы, обозначены научная новизна, теоретическая ценность и практическая значимость полученных результатов, перечислены результаты, выносимые на защиту.

В **Главе 1** вводится метод SPH (Smoothed particle hydrodynamics), приводятся его преимущества перед другими методами, показывается приведение системы механики сплошной среды к той форме, в которой в пакете ANSYS/LS-DYNA идет ее численное решение. Рассматривается алгоритм нахождения kern-функции и поиска соседей частиц

SPH. Рассматривается последовательность вычисления для всех частиц производных полевых функций и вычисление шага по времени для каждой частицы. Рассматривается алгоритм интегрирования на основе знания производных для каждой частицы и общего шага по времени.

В основе метода SPH лежит хорошо известная система уравнений механики сплошной среды (1):

$$\begin{aligned}\frac{d\rho}{dt} &= -\rho \frac{\partial U^\beta}{\partial x^\beta} \\ \frac{dU^\alpha}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma^{\alpha\beta}}{\partial x^\beta} \\ \frac{dE}{dt} &= -\frac{\sigma^{\alpha\beta}}{\rho} \frac{\partial U^\alpha}{\partial x^\beta} \\ \frac{dx^\alpha}{dt} &= U^\alpha,\end{aligned}\tag{1}$$

где  $\rho$  - плотность (скаляр),  $E$  - удельная внутренняя энергия,  $U^\alpha$  - вектор скорости,  $\sigma^{\alpha\beta}$  - тензор напряжений,  $x^\alpha$  - пространственные координаты,  $t$  - время,

$\frac{d}{dt}$  - полная производная по времени, взятая в движущейся лагранжевой системе отсчета;

После введения в систему (1) kern-функции (или функции ядра) система принимает удобный вид (2) для реализации в пакетах вычислительного моделирования:

$$\begin{aligned}\frac{d\rho_i}{dt} &= -\rho_i \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} (U_i^\beta - U_j^\beta) W_{ij\beta} \\ \frac{dU_i^\alpha}{dt} &= -\sum_j m_j \left( \frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} \right) W_{ij\beta} \\ \frac{dE_i}{dt} &= -\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} \sum_j m_j (U_i^\alpha - U_j^\alpha) W_{ij\beta}\end{aligned}\tag{2}$$



В (2)  $W_{ij}$  находится, как  $W_{ij} = W(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h)$ ; частная производная  $\frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}$  есть  $W_{ij\beta}$ ; индекс  $i$  отвечает за рассматриваемую в цикле программы текущую частицу SPH,  $j$  - за перебор соседей текущей  $i$ -той частицы.

В **Главе 2** описывается проведенный верификационный вычислительный эксперимент на основе натурального эксперимента удара алюминиевой сферы диаметром 5,01 мм в тонкую алюминиевую преграду толщиной 1 мм. Эксперимент был зафиксирован при помощи лазерных тенеграмм авторами КЕ Fa-wei и др. На рисунке 1 представлена постановка вычислительной задачи. Начальная скорость ударника принималась, как в эксперименте, 4,19 км/с.

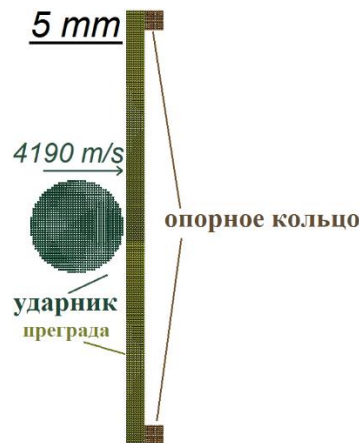


Рис.1 Постановка задачи высокоскоростного удара алюминиевой сферы в тонкую алюминиевую преграду

Параметры разрушения для модели материала по Джонсону-Куку, а также коэффициенты сглаживания SPH подбирались итерационным способом путем проведения большого числа вычислительных экспериментов. Как видно из рисунков 2 и 3, обеспечивается хорошее согласие вычислительного и натурального экспериментов – см.соответствующие картины облаков осколков после пробития ударником первой преграды. Параметры модели материалов и коэффициенты в уравнениях состояний для данного вычислительного эксперимента приведены в таблицах 1-3.

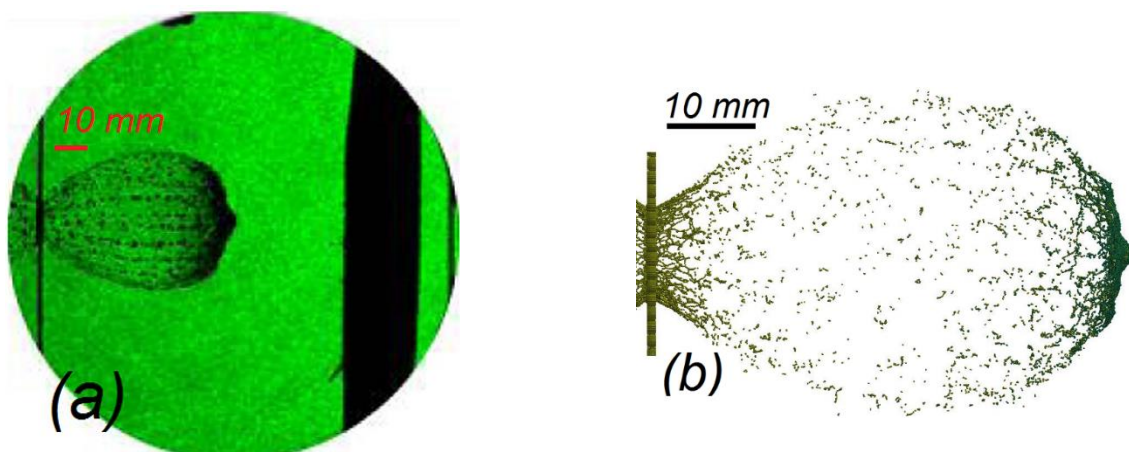


Рис.2 Сравнение результата высокоскоростного удара алюминиевой сферы в тонкую алюминиевую преграду, зафиксированного лазерными тенеграммами в натурном эксперименте, с полученным вычислительным моделированием,  $t = 16$  мкс

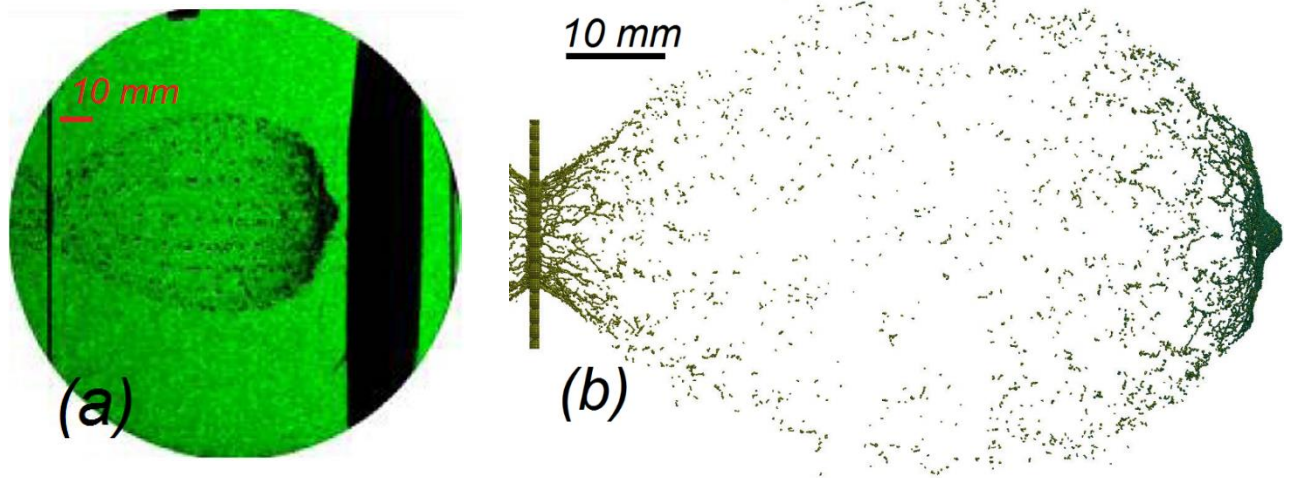


Рис.3 Сравнение результата высокоскоростного удара алюминиевой сферы в тонкую алюминиевую преграду, зафиксированного лазерными тенеграммами в натурном эксперименте, с полученным вычислительным моделированием,  $t = 24$  мкс

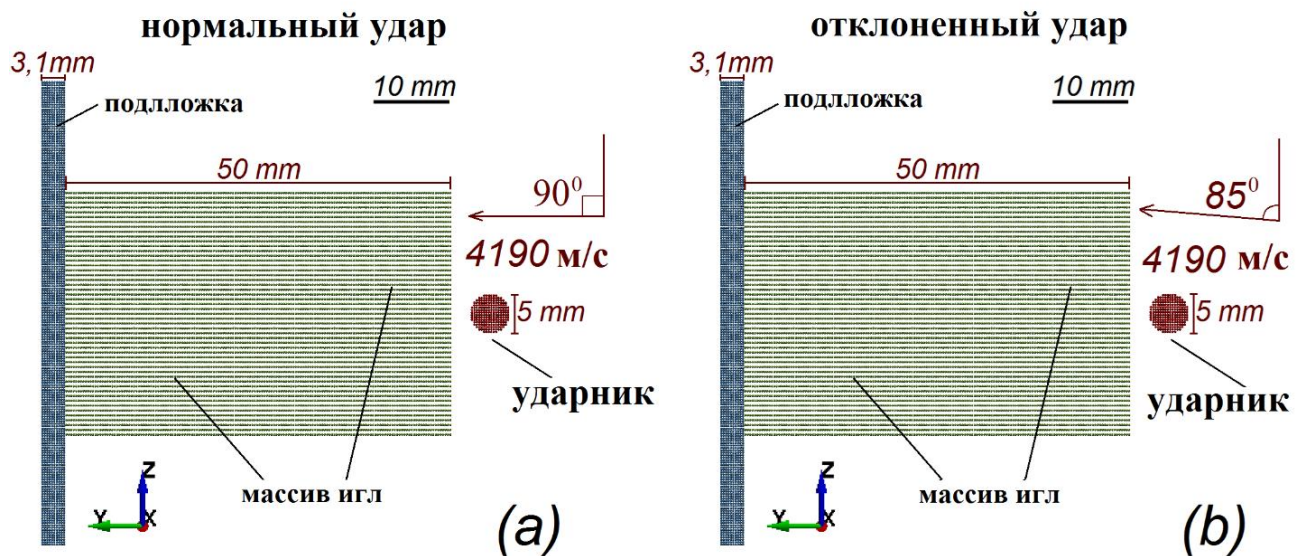


Рис.4 Осевого разрез модели (а) – нормальный удар, (б) – отклоненный удар.

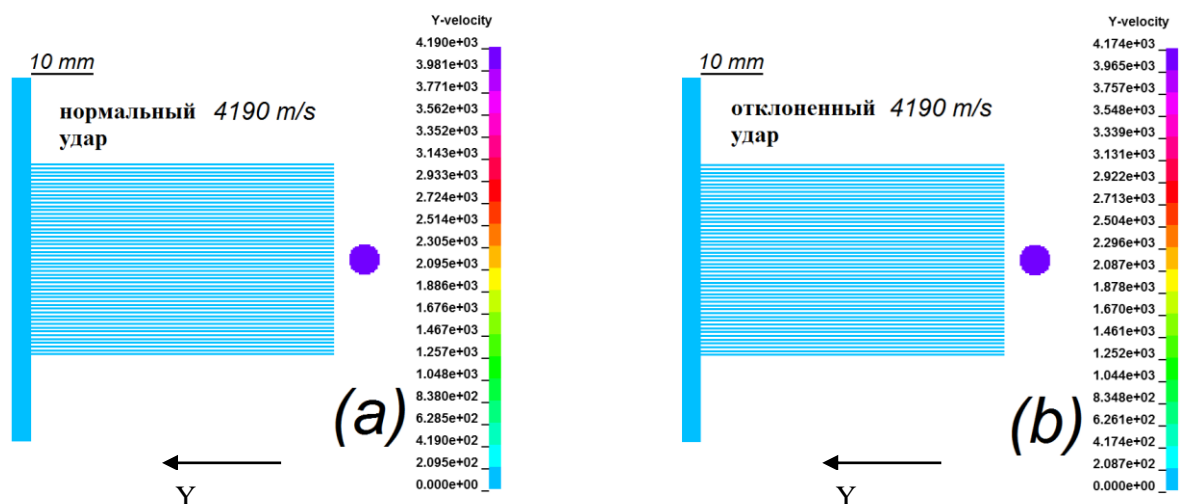


Рис.5 Начальное положение, 0 мкс. (a) – нормальный удар при скорости ударника 4190 м/с, (b) – отклоненный удар (5 градусов от нормали) при скорости ударника 4190 м/с.

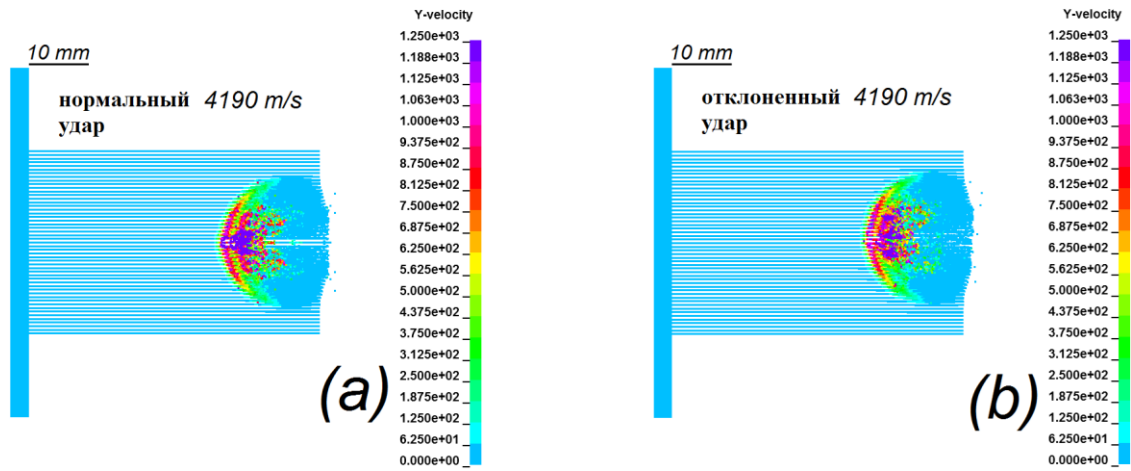


Рис.6 Картины взаимодействия ударника с игольчатой структурой  $t = 6$  мкс; (a) – нормальный удар при скорости ударника 4190 м/с; (b) – отклоненный удар (5 градусов от нормали) при скорости ударника 4190 м/с

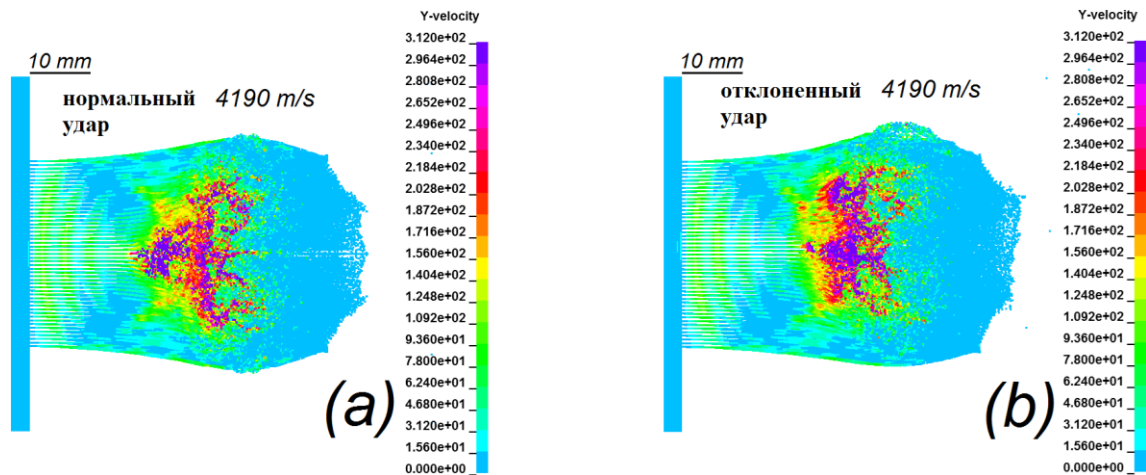


Рис.7 Картины взаимодействия ударника с игольчатой структурой, (a) – нормальный удар при скорости ударника 4190 м/с,  $t=25$  мкс; (b) – отклоненный удар (5 градусов от нормали) при скорости ударника 4190 м/с, 25.14 мкс после начала взаимодействия.

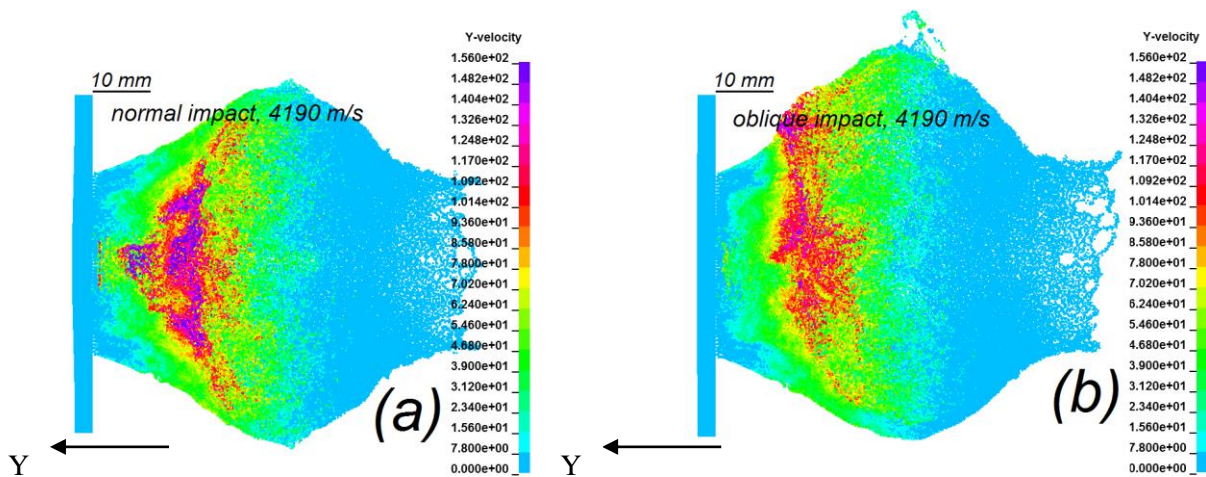




Рис.8 Картины взаимодействия ударника с игольчатой структурой, 80 мкс после начала взаимодействия. (а) – нормальный удар при скорости ударника 4190 м/с, (б) – отклоненный удар (5 градусов от нормали) при скорости ударника 4190 м/с

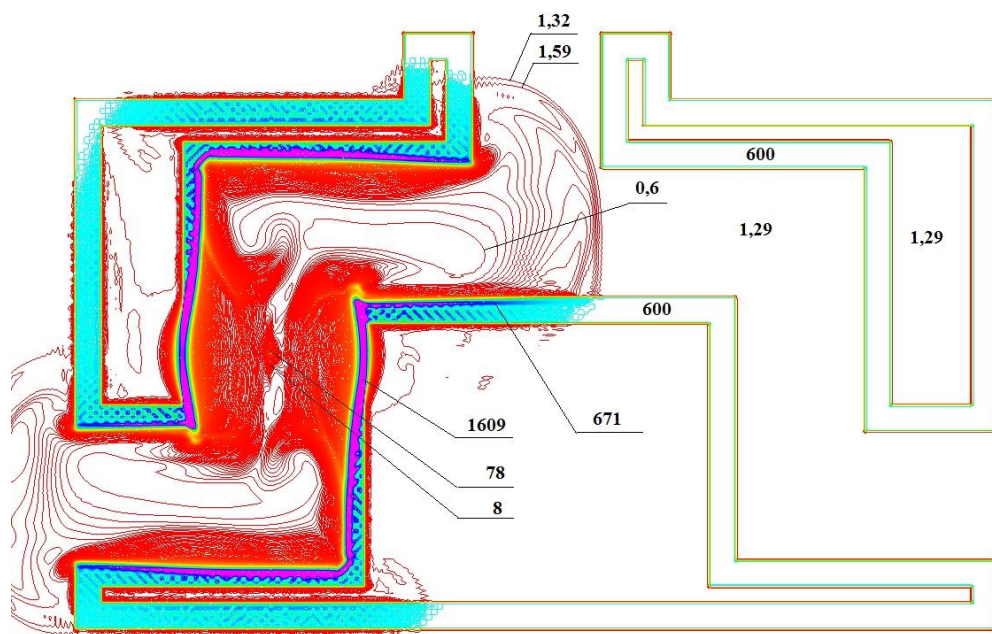


Рис.9 Результаты вычислительного моделирования. Поля плотности в момент времени  $t=1200$  мкс после детонации. Цифрами указаны числовые значения плотности,  $\text{кг}/\text{м}^3$

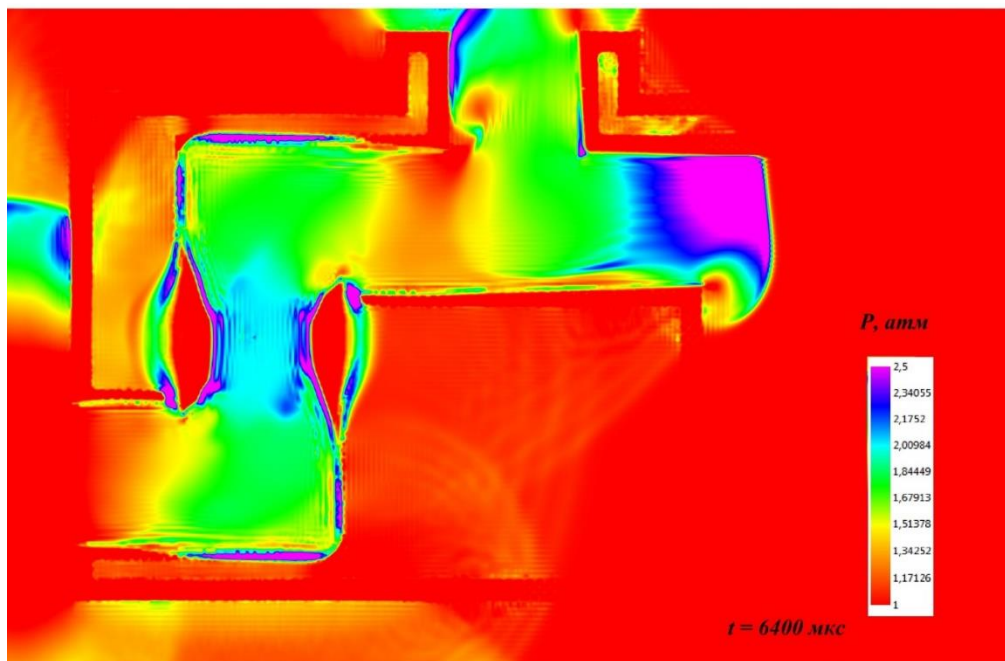


Рис.10 Результаты вычислительного моделирования. Поля давления в момент времени  $t=6400$  мкс после детонации. Область защиты условно не показана.

Таблица 1. Константы и параметры материалов

Параметр	Ед. изм.	Al-1100	Al-6061-T6
Плотность, $\rho$	кг/м <sup>3</sup>	2770	2770
Модуль сдвига, $G$	Па	25.9 x 10 <sup>9</sup>	25 x 10 <sup>9</sup>
Константа по Джонсону-Куку А	Па	4.1 x 10 <sup>7</sup>	3.241 x 10 <sup>8</sup>
Константа по Джонсону-Куку В	Па	1.25 x 10 <sup>8</sup>	1.138 x 10 <sup>8</sup>
Показатель прочности на растяжение, $n$		0.183	0.42
Константа по Джонсону-Куку, $c$		0.001	0.002
Коэффициент термической податливости, $m$		0.859	1.34
Температура при испытаниях	К	293	293
Температура плавления	К	893	893
Скорость деформации при испытании образцов материала	1/с	1	1
Удельная теплоемкость, $C_p$	Дж/(кг*К)	910	910
Коэффициенты в модели разрушения по Джонсону-Куку, $D_1$		0.071	-0.77
$D_2$		1.248	1.45
$D_3$		-1.142	-0.47
$D_4$		0.0097	0
$D_5$		0	1.6

Таблица 2. Коэффициенты уравнения состояния – линейный полином

Материал	$C_0$	$C_1$ , ГПа	$C_2$ , ГПа	$C_3$ , ГПа	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$E_0$	$V_0$
Al-1100	0	74.2	60.5	36.5	1.96	0	0	0	1

Таблица 3. Коэффициенты уравнения состояния по Ми-Грюнайзену

Материал	$C$ , м/с	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$a$	$E_0$	$\Gamma_0$	$V_0$
Al-6061-T6	3935	1.578	0	0	0	0	1.69	1

В п.2.4 проведено сравнение эволюции облаков осколков при ударе куба гранью и ребром. Масса куба выбиралась такой, что она была равна массе сферы. Получены картины эволюции облака осколков в динамике. Получено поле скоростей частиц SPH для случая удара куба ребром, а также - гранью к преграде.

В п. 2.5 выполнено вычислительное моделирование высокоскоростного удара медного стержня в медный монолит в постановке плоского напряженного состояния. Выполнен верификационный анализ по известным формулам.

В п.2.6 представлено моделирование удара кубика миллиметрового размера в тонкую пластину. Кубик в задаче принимался таким же размером, как и в натурном эксперименте - со стороной 2 мм, тонкая алюминиевая преграда - толщиной 0,5 мм. Начальная скорость ударника составляла 5000 м/с. Угол между вектором скорости и нормалью к поверхности составлял 60 градусов. Из анализа эволюции облака осколков в динамике можно заключить, что первичное облако осколков возникает в направлении перпендикуляра к ударной плоскости, а вторичное облако осколков возникает в направлении между нормалью к плоскости и вектором скорости снаряда. Из моделирования видно, что вторичное облако связано с материалом снаряда и возникает из-за его разрушения. Такая эволюция облака осколков полностью подтверждена натурными экспериментами на рельсотроне, проведенными С.А.Поняевым в Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН (г.Санкт-Петербург).

В главе 3 рассматривалась модель высокоскоростного удара в игольчатую структуру. Осевое сечение модели представлено на рисунке 4(а). Игольчатая структура состояла из массива 51 x 51 игла. Толщина подложки составляла 3,1 мм. Длина каждой иглы 50 мм, ее диаметр 0,31 мм, расстояние между иглами 0,31 мм. Иглы, подложка и ударник были разделены на частицы SPH одинакового размера диаметром 0,31 мм. Диаметр одной частицы был равен диаметру иглы. Подложка была разделена на 10 SPH по толщине, а сферический ударник – на 16 SPH по диаметру. Подложка жестко закреплялась по четырем сторонам. Ввиду сложности постановки задачи допускалось упрощение, что удар происходит в условиях абсолютного вакуума. Вычислительные эксперименты на скоростях 6200 м/с, 7200 м/с и 8200 м/с показали, что игольчатая структура успешно выдерживает высокоскоростной удар. Вычислительный эксперимент на скорости 9200 м/с дал повреждение тыльной поверхности подложки – были обнаружены небольшие продольные трещины в подложке с обратной стороны, как результат попадания вторичных обломков от сферического ударника и игольчатой структуры в подложку.

Для оценки толщины монолитной алюминиевой преграды, способной противостоять высокоскоростному удару сферического 5-мм ударника с начальной скоростью 8500 м/с, использовалось хорошо известное эмпирическое уравнение:

$$P = 5.24d^{19/18}H^{-0.25}\left(\frac{\rho_p}{\rho_t}\right)^{2/3}\left(\frac{V}{C}\right)^{2/3} \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр ударника,  $H$  – твердость по Бринеллю,  $\rho_p$  – плотность материала ударника,  $\rho_t$  – плотность материала монолитной преграды,  $V$  – начальная скорость ударника,  $C$  – скорость звука.

По уравнению (3) было получено, что плотность рабочей поверхности сплошной монолитной плиты составляет 107,25-145,75 кг/м<sup>2</sup>. Также в исследовании было рассчитано, что поверхностная плотность рабочей поверхности рассматриваемой конструкции игольчатой структуры составляет 35,96 кг/м<sup>2</sup>. Сравнение поверхностной плотности монолитного экрана с поверхностной плотностью игольчатой структуры

(совместно с подложкой) показало, что алюминиевая игольчатая структура в 3-4 раза эффективнее по весу, чем монолитный алюминиевый экран.

В п.3.3 для понимания того, не возникает ли каких-либо аномальных явлений при высокоскоростном ударе в игольчатую структуру при ударе под углом, была поставлена сопряженная задача – рисунок 4(б), которая отличалась от задачи, приведенной на рисунке 4(а) тем, что вектор скорости имел отклонение на 5 градусов к нормали (нормаль восстановлена к плоскости подложки).

Вычислительные эксперименты показали, что исследуемая игольчатая структура успешно выдерживает как нормальный, так и отклоненный от нормали высокоскоростной удар. На рисунках 5 – 8 (а,б) показаны результаты расчета взаимодействия ударника со структурой игольчатого типа в одни и те же моменты времени – от 0 до 80 мкс после начала взаимодействия. Как видно из рисунков, эволюция разрушения игольчатой структуры и динамики осколков внутри этого пространства при ударе под 5 градусов к нормали качественно та же.

В главе 4 было выполнено вычислительное моделирование эволюции ударной волны в геометрически различных конфигурациях - системах для подавления взрыва. В п. 4.3 построена вычислительная модель распространения ударной волны внутри шлюза (далее взрывозащитного шлюза - ВШ). Предполагалось, что для работы в условиях транспортного терминала эффективная геометрия ВШ будет такая, как показана на рисунке 9. Стенка шлюза с указанием значения  $600 \text{ (кг/м}^3\text{)}$  внутри стенки представлена двухфазной средой соответствующей плотности. В задаче задавался сферический заряд - ТНТ - тринитротолуол (далее взрывчатое вещество - ВВ) массой 1,45 кг.

На рисунке 11 представлен график записи давления по виртуальному датчику, находящемуся за пределами защитной зоны, которое показывает, что амплитудное значение в 1,7 атм на датчике за пределами защитной области ВШ (на расстоянии 1,7м от центра ВВ) ниже порога летальности, который составляет около 2,5 атм (250кПа), когда происходит разрыв легких. Стоит отметить, что давления порядка  $\sim 1,5 - 1,8 \text{ атм}$  наблюдаются по большинству датчиков, находящихся за защитной стенкой ВШ, кроме входа и выхода в ВШ.

В результате вычислительного моделирования, используя модель распространения ударной волны внутри шлюза, было установлено, что шлюз с наполнением из двухфазной пузырьковой среды (диспергента) плотностью  $600 \text{ кг/м}^3$  практически в 4 раза гасит взрывную волну и по существу является "глушителем" террориста-самоубийцы. Таким диспергентом может служить пена, специально подобранная по плотности. Необходимым свойством для использования пены является ее плотность ( $600 \text{ кг/м}^3$ ), а также негорючесть.

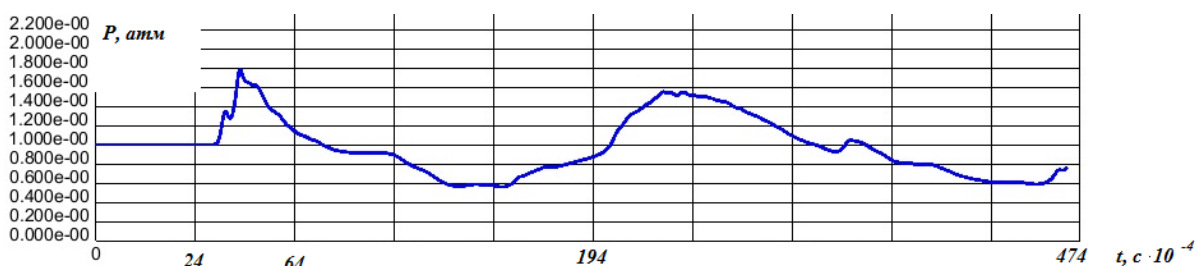


Рис.11 Показание датчика давления за пределами защитной области ВШ

Несколько вычислительных расчетов в такой же постановке, но с плотностью двухфазной среды, имеющей пониженные (повышенные) значения относительно 600, дают повышенные значения по амплитуде (виртуальные датчики). Проводились вычислительные расчеты со значениями 300, 400, 500, 700, 750, 800 кг/м<sup>3</sup>. Таким образом, двухфазная среда с иной плотностью, чем 600 кг/м<sup>3</sup>, является менее эффективной. Сравнение такого вычислительного эксперимента с аналогичным, но в котором задано полное отражение волн от стенок шлюза (абсолютно жесткая стенка) показало, что давления по исследуемым виртуальным датчикам имеют завышенные в 1,5-3 раза значения относительно базового эксперимента.

В п.4.4 выполнено вычислительное моделирование распространения ударной волны внутри сфер из воды. Рассматривалась задача, когда сферический заряд (ВВ) находился в водяной сфере без пустотной прослойки, а также сопряженная задача, когда сферический заряд и водяную прослойку отделяло некоторое пространство.

В результате вычислительного моделирования установлено, что передача кинетической энергии воде в постановке, когда между зарядом и водой присутствует прослойка с плотностью, которая много ниже плотности воды, в 2 раза ниже по сравнению с постановкой, когда такая прослойка отсутствует.

В п.5.1 выполнено моделирование последовательного высокоскоростного удара двух ударников, летящих след в след, в толстую преграду. Рассмотрены случаи: два ударника приближаются к толстой преграде на расстоянии между собой порядка диаметра ударника, и случай, когда расстояние между ударниками достаточно высоко ~20 диаметров. Получены картины эволюции облака осколков, проанализированы графики скоростей частиц SPH в указанных случаях.

В п.5.2 исследован высокоскоростной удар двух ударников, летящих след в след, в тонкую преграду, а также получена картина эволюции облака осколков после пробития двумя ударниками, летящими параллельно, тонкой преграды. Найдена площадь пробоины.

В **заключении** представлены основные результаты диссертационной работы:

1. Для задачи высокоскоростного удара сферического ударника найдены значения параметров модели материала по Джонсону-Куку, которая учитывает возникновение жидкой фазы материала.

Адекватность модели с найденными параметрами подтверждена хорошим согласием с известными результатами натуральных экспериментов.

2. Игольчатая структура гораздо эффективнее противостоит высокоскоростному удару, т.к. при сравнении с монолитом пробой наступает при большей начальной скорости (масса ударника одинаковая). Эволюция отклоненного удара (5 градусов) качественно такая же, как и при нормальном ударе.

3. Создана вычислительная модель распространения ударной волны внутри шлюза, состоящего из двухфазного материала, учитывающая поглощение определенной доли энергии двухфазной средой, а также частичное отражение волн от стенок.



### **Практическая значимость результатов диссертационной работы:**

1. Полученный результат 2 позволяет проектировать защитные экраны для космических аппаратов, существенно превышающие по характеристикам существующие.
2. Вычислительную модель распространения ударной волны внутри шлюза можно применять для проектирования взрывозащитного шлюза, который в 4 раза лучше гасит взрывную волну по сравнению с открытым подрывом.

### **Публикации автора по теме диссертации в журналах, рекомендованных ВАК:**

#### Из индексируемых в наукометрической базе данных SCOPUS

1.S.A. Poniaev, R.O. Kurakin, A.I. Sedov, S.V. Bobashev, B.G. Zhukov, A.F. Nechunaev, Hypervelocity impact of mm-size plastic projectile on thin aluminum plate, Acta Astronautica 135 (2017) 26-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.11.011>

2.M.V.Silnikov, I.V.Guk, A.F.Nechunaev, N.N.Smirnov. Numerical simulation of hypervelocity impact problem for spacecraft shielding elements, Acta Astronautica, Published online. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.08.030>

3.Mikhail Silnikov, Igor Guk, Andrey Mikhaylin, Alexey Nechunaev. Efficiency of needle structure at hypervelocity impact, Acta Astronautica, Published online. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.10.026>

#### Другие публикации в журналах, рекомендованных ВАК:

4.А.Ф.Нечунаев, Н.Н.Смирнов, А.И.Михайлин. Вычислительное моделирование функции взрывозащитного шлюза для работы в условиях транспортного терминала. Поиск эффективной защитной геометрии., Вестник кибернетики, электронный журнал, 3 (23) (2016) 107-119. <http://jc.surgu.ru/index.php/ru/arkhiv-statej/2016/3-23>

#### **Другие публикации:**

5.А.Ф.Нечунаев, Н.М.Сильников, М.В. Чернышов. От методологии защиты танка к математическому моделированию высокоскоростного удара методом сглаженных частиц. Труды XIX Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (4–7 апреля 2016 г.), Т.3, Бронетанковая техника и вооружение, - М.: Издание ФГБУ «Российской академии ракетных и артиллерийских наук», 2016, С.243-248. [https://www.npro-sm.ru/userfiles/files/1475051250\\_tom3.pdf](https://www.npro-sm.ru/userfiles/files/1475051250_tom3.pdf)

6.А.Ф.Нечунаев, С.А.Поняев. Вычислительное моделирование последовательного высокоскоростного удара двух ударников, летящих след в след. Материалы XIV конференции молодых ученых посвященной дню космонавтики. В сб. «Фундаментальные и прикладные космические исследования», под ред. А.М.Садовского, - М.: ИКИ РАН, 12-14 апреля, 2017, С.14. <http://kmu2017.cosmos.ru/sites/kmu2017.cosmos.ru/files/KMU2017-absract-book.pdf>