

УТВЕРЖДАЮ

Начальник управления научно-  
организационной деятельности Санкт-  
Петербургского политехнического  
университета Петра Великого.

А.М. Митрофанов

«14» мая 2018 г.



### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого на диссертационную работу Нечунаева Алексея Федоровича «Моделирование процессов высокоскоростного удара и взрыва методом частиц с учетом фазовых превращений», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 — механика деформируемого твердого тела.

Работа посвящена численному исследованию процессов высокоскоростного удара с учетом фазовых превращений. Кроме этого, в работе затронуты вопросы детонации заряда внутри шлюза, представленного двухфазной средой. При компьютерном моделировании указанных процессов широко используется метод сглаженных частиц и метод частиц в ячейках.

#### **Актуальность темы диссертации**

При решении прикладных инженерных задач необходимо заранее представлять полную картину последствий высокоскоростного удара и взрыва. Такая необходимость возникает, например, при исследовании гашения энергии ударника на высоких скоростях

в условиях космоса (при защите космических аппаратов от микрочастиц различного происхождения, движущихся с огромными скоростями). Поведение материалов ударника и преграды на высоких скоростях характеризуется многообразием внутренних процессов: тепловыделение, волновые эффекты, неупругие деформации и другие процессы, что существенно усложняет разработку вычислительных моделей. Поэтому тема диссертационной работы А.Ф. Нечунаева, связанная с исследованием вышеперечисленных процессов и свойств материалов в условиях высокоскоростного нагружения с учетом фазовых превращений, является, несомненно, актуальной для механики деформируемого твердого тела. Также большой интерес представляют прикладные задачи, рассмотренные в диссертации: защита от микрометеороидов космического происхождения и техногенного космического мусора, создание дополнительных препятствий для распространения ударной волны в полузамкнутом пространстве с целью предупреждения и уменьшения последствий террористических актов.

### **Основные результаты диссертации**

#### **На защиту диссертантом вынесены следующие результаты исследования:**

- для задачи высокоскоростного удара сферического ударника диссертантом найдены значения параметров модели материала Джонсона-Кука, которая учитывает возникновение жидкой фазы материала; при высокоскоростном взаимодействии сферического ударника с тонкой преградой возникает слой расплавленного алюминия как у ударника, так и в преграде, такие слои взаимодействуют между собой при внедрении ударника в преграду; диссертантом получено хорошее согласие построенной вычислительной модели с известными экспериментальными данными (лазерными теннеграммами);

- диссертантом показано, что игольчатая структура эффективнее противостоит высокоскоростному удару по сравнению с монолитом; при сравнении нормального удара в игольчатую структуру с отклоненным на 5 градусов ударом диссертантом выявлено, что картина разрушения качественно не меняется;
- диссертантом разработана вычислительная модель распространения ударной волны внутри шлюза, состоящего из двухфазного материала, учитывающая поглощение энергии двухфазной средой и частичное отражение волн от стенок, проведено сравнение с распространением ударной волны в условиях открытого подрыва заряда, а также сравнение с таким же шлюзом с условием полного отражения волн от стенок.

На основе вычислительных экспериментов сделаны важные практические выводы. В частности, что при распространении ударной волны внутри шлюза, представленного двухфазной средой, амплитудные значения на периферии в 4 раза меньше, чем в случае открытого подрыва аналогичного сферического заряда. Этот и другие выводы диссертации имеют важное теоретическое и практическое значение и могут быть использованы при проектировании экранов для защиты космических аппаратов от микрометеороидов и техногенного космического мусора, а также при проектировании систем защиты транспортных терминалов от взрывов при непрерывном потоке пассажиров.

### **Достоверность и новизна результатов диссертации**

Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью вычислительного моделирования, выполнением «принципа соответствия» и совпадением в частных случаях с известными результатами других авторов, а также хорошим согласием результатов вычислительного моделирования с натурными экспериментами,



описанными в литературе. Результаты апробированы на пяти российских и международных научных конференциях, опубликованы в 6 научных работах, 4 в изданиях, рекомендованных ВАК, 3 из которых в международных научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Научная новизна в диссертации А.Ф. Нечунаева состоит в том, что:

- построена новая вычислительная модель высокоскоростного удара сферического ударника в тонкую алюминиевую преграду. Найдены значения параметров модели материала Джонсона-Кука, 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;
- 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);
- 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;
- 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.

Практические результаты диссертации могут быть использованы в таких крупных организациях, как СПбГУ, ФГУП ЦНИИМАШ (г. Королев, МО), НПО «Специальные материалы» (г. Санкт-Петербург), Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (ИХФ РАН) (г. Москва), ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург). Так, при обучении магистрантов СПбГУ по программе «Механика и математическое моделирование» практические результаты диссертации могут быть использованы в курсах «Механика деформируемых наноматериалов», «Математическое моделирование в механике деформируемого твердого тела», а также в элективных курсах «Деформирование и разрушение твердых тел: статические и динамические задачи» и «Математическое моделирование в механике». В ФГУП ЦНИИМАШ практические результаты исследования могут использоваться при проектировании современных эффективных защитных экранов. В институте химической физики им. Н.Н. Семенова и в НПО «Специальные материалы» – для прогнозирования эффективности систем подавления взрыва и уменьшения затрат на натурные испытания, в ФТИ им. А.Ф. Иоффе – для создания вычислительных моделей, точно воспроизводящих высокоскоростной удар различными элементами на рельсотроне, и как следствие – для уменьшения финансовых затрат на испытания, сокращения продолжительности трудоемких серий экспериментов.

#### **Оценка ясности изложения**

Диссертация объемом 148 страниц написана понятным научным языком, текст сопровождается поясняющими рисунками в достаточном количестве, достаточно представлен библиографический список из 102 наименований. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

## ЗАМЕЧАНИЯ:

1. Требуются пояснения по выбору параметров уравнения состояния Ми-Грюнайзена;
2. Желательно более подробно остановиться на вопросе реализации фазовых переходов (твёрдое тело – жидкость – газ) при использовании метода сглаженных частиц (SPH);
3. В результатах экспериментов по высокосортному удару (см., например, Рис. 2-3 в автореферате) на ударном облаке наблюдается система направленных полос. Насколько возможно воспроизведение и анализ данного эффекта на численных экспериментах?
4. Для практического использования игольчатой структуры желателен более подробный анализ влияния отклонения скорости ударника от направления игл;
5. Желательно пояснить, насколько принципиально использование для защиты направленных структур (в т.ч. игольчатых), возможно, близкий эффект может быть получен при использовании изотропных высокопористых структур и материалов (например, аэрогелей), имеющих такую же эффективную плотность.

Сделанные замечания не ставят под сомнение результаты, выносимые на защиту, и не влияют на общее положительное заключение по диссертации.

Диссертация по своему содержанию и оформлению отвечает требованиям пунктов 9-11, 13, 14 Положения "О порядке присуждения ученых степеней" утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 21.04.2016), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, соответствует паспорту научной специальности 01.02.04 механика деформированного твёрдого тела, области исследования «постановка и решение краевых задач для тел различной конфигурации и структуры при механических, электромагнитных, радиационных, тепловых и прочих воздействиях, в том числе применительно к объектам новой техники»; а также области исследования «математические модели и численные методы анализа применительно к задачам, не



допускающим прямого аналитического исследования», а ее автор Алексей Федорович Нечунаев — заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Выступление А.Ф. Ненучаева по материалам диссертации обсуждалось 06 апреля 2018 года на заседании кафедры «Теоретическая механика» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

Кандидат физико-математических наук,  
Доцент кафедры «Теоретическая механика» СПбПУ



Кузькин В.А.

Почтовый адрес: 195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая, 29  
Веб-сайт: <http://tm.spbstu.ru/VK>  
Телефон: +7-981-707-87-02  
Адрес электронной почты: [kuzkinva@gmail.com](mailto:kuzkinva@gmail.com)

