

На правах рукописи

Шумихин Тимофей Александрович

**ФРАГМЕНТАЦИЯ УДАРНИКА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ
ПРОБИТИИ ТОНКИХ ДИСКРЕТНЫХ ПРЕГРАД**

Специальность 01.02.04 - «Механика деформируемого твердого тела»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте прикладной механики Российской академии наук (ИПРИМ РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Мягков Николай Николаевич

Официальные оппоненты: **Крахин Олег Иванович,**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ), профессор кафедры «Конструирование антенно-фидерных систем»

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

Ведущая организация: **Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (Государственный научный центр Российской Федерации)**

Защита состоится 24 апреля 2013 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.05, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета), в зале заседаний Учёного совета МАИ по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

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

Автореферат разослан «22» марта 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Федотенков Г.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Практика проведения оценок надежности космических аппаратов (КА), рассчитанных на длительную работу в космосе, показывает, что защитные мероприятия, повышающие стойкость КА к ударам метеороидов и техногенных тел (МТТ), необходимы. Принципиальным отличием разработки защитных конструкций для КА является то, что стоимость дополнительных затрат, связанных с установкой этих конструкций на КА, является ключевым параметром. При площади защищаемой поверхности современных космических модулей 100 - 200 м² массовые затраты на построение защиты, например, для некоторых модулей Международной космической станции превосходят 10 кг/м². При высокой стоимости вывода на орбиту каждого килограмма массы, которая составляет более 10 тыс. долларов США, экономия в размере даже 1 кг/м² в расходах массы на защиту приводит к значительному уменьшению финансовых затрат и даёт возможность увеличения массы полезной нагрузки. Отсюда следует задача построения защиты, имеющей минимальную массу при максимальной ее эффективности.

Защитные конструкции КА должны защищать КА от МТТ, которые не могут быть отслежены средствами наземного базирования. Верхняя граница размеров частиц, от которых может быть построена защита, составляет, примерно, 1-2 см. В качестве защиты КА от МТТ в настоящее время используется т.н. экранная схема защиты (предложенная американским астрономом Ф.Л. Уипплом в 40-е годы прошлого века). В этой схеме защиты экран устанавливается перед защищаемой стенкой на некотором расстоянии от нее. При высоких скоростях соударения, характерных для космических условий, происходит интенсивная фрагментация ударника на экране, приводящая к перераспределению импульса, действующего на защищаемую стенку. Традиционно в качестве экрана использовалась тонкая алюминиевая пластина. Применение алюминиевой пластины в качестве экрана позволяет уменьшить суммарную массу защиты (экран плюс стенка) до 5 раз по сравнению с одинарной толстой стенкой при одном и том же уровне защищенности. Интенсивные исследования фрагментации ударников на сплошных преградах были предприняты в 60-х годах в связи с началом пилотируемых полетов в космос и с новой силой возобновились с конца 80-х, когда количество космического мусора в околоземном космическом пространстве увеличилось настолько, что это стало прямой угрозой безопасности космических полетов. Исследования велись в направлении совершенствования экранной защиты за счет использования нескольких экранов, различающихся по своим физическим и механическим свойствам, чтобы еще больше уменьшить массу защиты. В 90-е годы в космическом центре им. Джонсона Национального комитета по аэронавтике и исследованию космического пространства США (JSC NASA) были предложены концепции улучшенных экранных защит "Multi-Shock", "Mesh Double Bumper Shield", "Stuffed Whipple". Они позволили уменьшить массу защиты еще приблизительно на тридцать процентов. На российском модуле «Заря» (модуль Международной космической станции (МКС)) впервые в качестве элемента конструкции составного экрана использовались стальные сетки. Защита

“Mesh Double Bumper Shield” также включает сетку как элемент конструкции составного экрана. Важно также, что модификация конфигураций защиты позволяет оптимизировать защитные конструкции, размещаемые в различных зонах КА.

Однако на сегодняшний день не существует вычислительных или иных теоретических методов, позволяющих однозначно предсказывать защитные свойства всего доступного многообразия конструкционных материалов и их конфигураций, чтобы подобрать нужную конструкцию защитной схемы, продиктованную техническим заданием. Главным способом оценки работоспособности схемы и поиска путей её совершенствования является эксперимент. Очевидно, что в этих условиях задачу оптимизации защитной схемы следует начинать с изучения свойств индивидуальных элементов защитной схемы. Высокоскоростной удар сферического ударника по сплошной преграде (в основном алюминиевой пластине) исследован достаточно хорошо. Здесь мы ограничимся ссылками на превосходные экспериментальные работы Пекутовского (A.J. Piekutowski, *Int. J. Impact Engng.*, 17 (1995) 627-638) и Грэди с сотрудниками (D.E. Grady, M.E. Kipp, *Int. J. Impact Engng.*, 20 (1997) 293-308; D.E. Grady, N.A. Winfree, *Int. J. Impact Engng.*, 26 (2001) 249-262). Эффективность сетки, как элемента конструкции составного экрана, была впервые показана в работах сотрудников космического центра им. Джонсона (NASA). Довольно детальные эксперименты, исследующие интегральные дисперсионные и фрагментационные свойства сеток при их взаимодействии с ударником, были выполнены Херцем и др. (F. Horz, et. al., *Int. J. Impact Engng.*, 17 (1995) 431-442; Horz F, et al., NASA TM-104749, April 1992). Однако в этих работах зависимость фрагментации от соотношений между геометрическими параметрами сетки и размером ударника не была изучена. В целом, как экспериментальный, так и теоретический анализ высокоскоростного взаимодействия ударника с дискретными и, в частности, с сеточными преградами представлен в литературе в значительно меньшем объеме, чем это имеет место для сплошной преграды. Вероятно это связано с тем, что дискретные преграды обладают дополнительными возможностями вариации геометрических параметров (диаметр струн и размеры ячеек), что требует проведения большего объема экспериментов. В настоящей работе, посвященной исследованию фрагментации ударника на дискретных преградах (экранах) при высоких скоростях соударения, сделана попытка восполнить этот пробел

Целью диссертационной работы является экспериментальное и численное исследование особенностей разрушения ударника при его высокоскоростном взаимодействии с тонкими дискретными преградами и изучение влияния геометрических параметров преграды на фрагментацию ударника.

Решаемые задачи

1. Экспериментальное изучение механизма высокоскоростной фрагментации ударника на дискретной (струнной и сеточной) преграде.
2. Экспериментальное исследование зависимости свойств формирующегося облака фрагментов от геометрических параметров дискретной преграды.

3. Численное моделирование высокоскоростной фрагментации ударника на дискретных преградах с различными геометрическими параметрами (диаметр струн и размер ячейки) и сравнение с выполненными экспериментами.
4. Сравнительный анализ фрагментации ударника на сплошных и дискретных преградах.

Научная новизна работы

1. В серии экспериментов с алюминиевым ударником и стальными сеточными преградами показано, что выбор геометрических параметров дискретной преграды может приводить к более значительной фрагментации ударника, чем простое увеличение массы преграды.
2. Эксперименты с полиэтиленовым и алюминиевым ударником, а также численное моделирование этих экспериментов, позволили выявить два возможных механизма разрушения ударника на дискретных преградах. Какой из механизмов является преобладающим в данном эксперименте, зависит от геометрических параметров ячейки дискретной преграды.
3. Показано, что главной особенностью разрушения ударника на струнной и сеточной преграде является формирование струй фрагментов, выбрасываемых от фронтальной поверхности ударника в направлении движения ударника и в поперечных направлениях. Интенсивность струй зависит от скорости удара и геометрических параметров ячейки преграды, а их действие на пластину - свидетель (оцениваемое по глубине кратеров) может превышать действие остальной массы ударника. Численное моделирование дало следующую оценку возникающего кумулятивного эффекта: при прицеливании ударника в центр ячейки скорость фрагментов в струях превышает начальную скорость ударника примерно в полтора раза.
4. Численное моделирование позволило объяснить механизм формирования групп кратеров, линейнообразно распределенных по поверхности свидетеля, которые наблюдаются в экспериментах по фрагментации алюминиевого ударника на сеточных преградах.
5. Экспериментально показано, что фрагментация алюминиевого ударника на дискретной преграде идет при скоростях удара меньших, чем пороговая скорость фрагментации ударника на сплошной преграде той же удельной массы.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки и проведения экспериментальных исследований, сравнением результатов экспериментов с выполненными численными расчетами.

Практическая значимость работы. Результаты исследований позволили выявить особенности высокоскоростного разрушения ударников на дискретных преградах, которые важны при конструировании экранной защиты КА. Например, выявленный кумулятивный эффект показывает, что при определенных условиях (низкоплотный материал ударника, высокое значение отношения размера ячейки к диаметру проволоки сетки) применение сеточных экранов для защиты от высокоскоростного удара может производить обратный эффект, т.е. создавать дополнительную угрозу пробития защищаемой стенки.

Связь работы с научными проектами

Работа связана со следующими научными проектами:

1. Тема Института прикладной механики РАН «Высокоскоростной удар, разрушение и волновая динамика неоднородных сред», номер гос. регистрации 0120.0 803568, выполненной в 2008-2010 гг.

2. Тема Института прикладной механики РАН «Высокоскоростной удар, разрушение и волновая динамика неоднородных и химически активных сред», номер гос. регистрации 01201154234, выполняемой в 2011-2013 гг.

3. Проект МНТЦ 1917 «Разработка технологии построения облегченной экранной защиты гермокорпуса космических аппаратов: теоретическое, экспериментальное и программное обеспечение» (2002-2004 гг., коллаборатор проекта: Космический центр им. Джонсона США (NASA, Jonson Space Center, USA)).

4. Проект МНТЦ 3412 «Исследование астрозолей в околоземном космическом пространстве с использованием результатов бортовых измерений и математического моделирования. Анализ воздействия потоков астрозолей на элементы конструкции космических аппаратов» (2006-2010 гг., коллаборатор проекта: Европейское космическое агентство (ESA)).

5. Проект РФФИ 06-08-00127 «Высокоскоростное ударное взаимодействие компактных ударников с сеточными экранами» (2006-2008 гг.).

6. Проект РФФИ 12-01-00027 «Исследование высокоскоростной фрагментации ударника на экранах, изготовленных из различных конструкционных материалов» (2012-2014 гг.)

Личный вклад автора состоял в планировании и подготовке представленных в работе экспериментов, обработке и анализе экспериментальных данных. А также в проведении расчетов и сравнении результатов расчетов с экспериментальными данными.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Зависимость массы наиболее крупных фрагментов ударника от геометрических параметров ячейки струнной и сеточной преграды.

2. Два механизма высокоскоростной фрагментации ударника на дискретных преградах, зависимость характера фрагментации от геометрических параметров ячейки дискретной преграды.

3. Формирование струй фрагментов, выбрасываемых от фронтальной поверхности ударника в направлении его движения и в поперечных направлениях - главная особенность разрушения ударника на струнной и сеточной преграде.

4. Механизм формирования групп кратеров, линейнообразно распределенных по поверхности свидетеля, которые наблюдаются в экспериментах по фрагментации алюминиевого ударника на сеточных преградах.

5. Кумулятивный эффект, возникающий при высокоскоростном разрушении ударника на струнной и сеточной преграде, и его оценка по вычислению скорости фрагментов в формирующихся струях.

6. Экспериментальный результат, показывающий, что фрагментация алюминиевого ударника на дискретной преграде идет при скоростях удара

меньших, чем пороговая скорость фрагментации ударника на сплошной преграде той же удельной массы.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях:

1. Международная конференция “Advanced Problems in Mechanics” (APM 2008), St. Petersburg, Russia, 2008

2. Международная конференция “Advanced Problems in Mechanics” (APM 2010), St. Petersburg, Russia, 2010

3. Международная конференция “Advanced Problems in Mechanics” (APM 2012), St. Petersburg, Russia, 2012

4. 4-я Европейская конференция по космическому мусору (Fourth European Conference on Space Debris, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany, 2005).

5. 5-я Европейская конференция по космическому мусору (Fifth European Conference on Space Debris, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany, 2009).

6. Всероссийская конференция «Механика наноструктурированных материалов и систем», Москва, 2010

7. Всероссийская конференция «Механика наноструктурированных материалов и систем», Москва, 2011

8. IV Всероссийский симпозиум «Механика композиционных материалов и конструкций», Москва, 2012

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 9 печатных работах, из них 5 статей в реферируемых журналах из списка ВАК, 3 статьи в реферируемых зарубежных журналах и одна статья в сборнике трудов 4-й Европейской конференции по космическому мусору.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Общий объем работы 118 страниц, включая 47 рисунков, 12 таблиц, 52 библиографические ссылки в списке литературы

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, формулируются цели и задачи работы, научная новизна полученных результатов, говорится о практической значимости исследований.

В первой главе диссертации представлены эксперименты, в которых исследовалась морфология повреждений свидетеля облаком фрагментов ударника при его взаимодействии со струнными и сеточными преградами. Цель экспериментов – установить возможные особенности повреждений свидетеля облаком фрагментов ударника и выявить качественную зависимость повреждений от параметров преграды. Схема экспериментов на легкогазовой баллистической установке (ЛГБУ) показана на Рис.1. В качестве ударников использовались шарики из сплава алюминия диаметром 6.35 мм. В качестве мишени использовались стальные струнные преграды (набор параллельных струн, лежащих в одной плоскости; изготавливались самостоятельно) и сеточные преграды (сетки промышленного производства). Преграды отличались как по

массе, так и по геометрическим характеристикам, таким как диаметр проволоки d_w и апертура ячейки l_a (l_a -видимое на просвет расстояние между ближайшими параллельными проволоками) (Рис. 2). Для характеристики преград были введены параметры:

- $\varepsilon = d_p / (d_w + l_a)$, показывающий число ячеек сетки, попадающих на диаметр ударника;
- $\kappa = l_a / d_w$, характеризующий степень дискретности преграды. Предельное значение $\kappa = 0$ соответствует сплошной преграде.

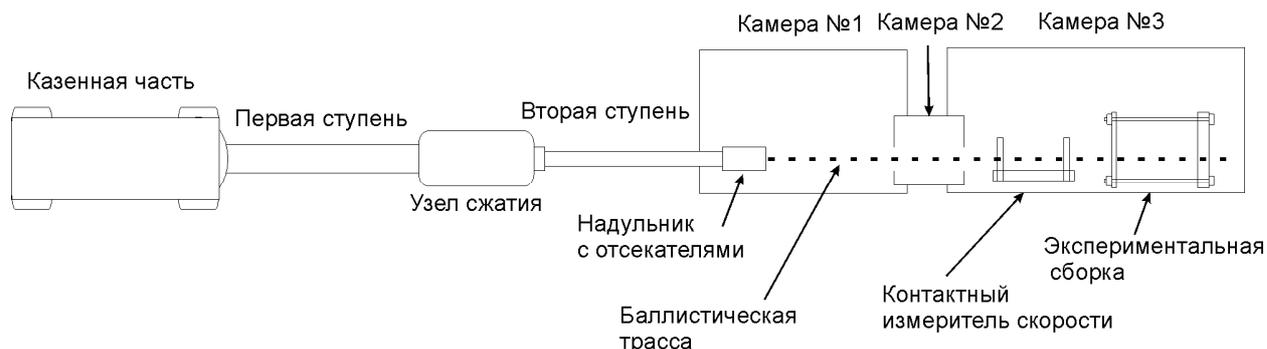


Рис. 1. Схема экспериментов на ЛГБУ.

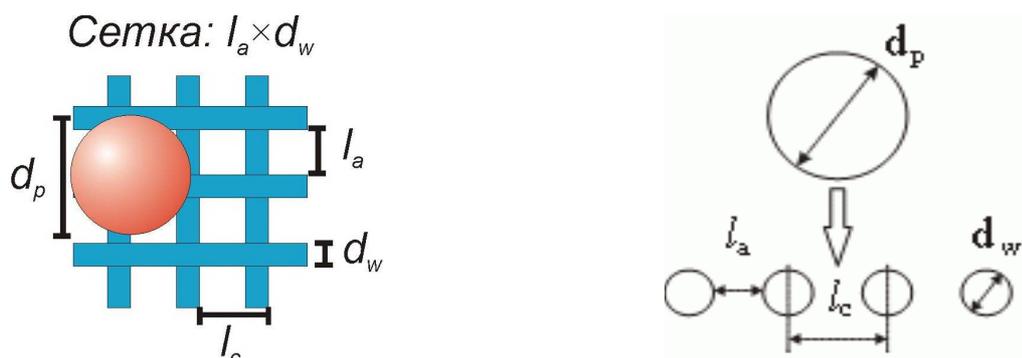


Рис. 2 Геометрические характеристики сеточной и струнной (вид сбоку) преграды

Для регистрации частиц запреградного облака фрагментов ударника использовались толстые алюминиевые пластины-свидетели, располагавшиеся на некотором расстоянии от преграды параллельно её плоскости и нормально к линии выстрела.

Были выполнены две серии экспериментов: одиннадцать экспериментов со струнными преградами на ЛГБУ ФГУП ГосНИИАС (диапазон полученных скоростей соударения составил 2.44-3.83 км/с) (Таблица 1) и восемь экспериментов с сеточными преградами на ЛГБУ ФГУП ГосНИИМАН (диапазон скоростей 3.25-3.40 км/с) (Таблица 2).

По результатам экспериментов со струнными преградами на большинстве свидетелей были зафиксированы морфологически отличные структурные особенности повреждений в виде центрального самого крупного кратера, лежащего на линии выстрела и линейно распределенных цепочек кратеров,

расположенных как соосно к направлению струн преграды, так и под прямым углом к ней (Рис. 3). Цепочки кратеров, расположенные соосно струнам, появляются при скорости 2.77 км/с, с увеличением скорости протяженность цепочек возрастает.

Таблица 1 Алюминиевый ударник 6.35 мм, струнные преграды^{*)}

Номер выстрела	Скорость ударника (км/с)	Параметры струнной преграды, $l_a \times d_w$, (мм)	Удельная масса преграды, (кг/м ²)	ε	κ
#38959-2	3.10	1.2×0.4	0.570	3.97	3.00
#38988-1	2.69	2.1×0.6	0.815	2.35	3.50
#38988-2	3.08	0.8×0.4	0.800	5.29	2.00
#38988-3	2.44	1.3×0.5	0.833	3.53	2.60
#38988-4	2.86	1.3×0.5	0.833	3.53	2.60
#39013-1	2.54	2.1×0.6	0.815	2.35	3.50
#39013-2	3.06	2.1×0.6	0.815	2.35	3.50
#39028-2	2.77	2.1×0.6	0.815	2.35	3.50
#39030-1	3.10	2.1×0.6	0.815	2.35	3.50
#39034-2	3.83	2.0×0.7	1.089	2.35	2.86

*) Производилось вакуумирование баллистической трассы

Таблица 2 Алюминиевый ударник 6.35 мм, сеточные преграды^{*)}

Номер выстрела	Скорость удара, (км/с)	Параметры сетки $l_a \times d_w$, (мм)	Пов. плотн. (кг/м ²)	ε	κ
1-01	3.40	2,00×0,60	1,71	2.44	3.33
1-02	3.35	2,00×0,60	1,71	2.44	3.33
1-03	3.35	2,00×0,60	1,71	2.44	3.33
1-04	3.20	2,00×1,00	3,83	2.12	2.00
1-05	3.37	2,00×1,00	3,83	2.12	2.00
1-06	3.36	2,00×1,00	3,83	2.12	2.00
1-07	3.31	2,00×1,20	5,24	1.98	1.67
1-08	3.25	1,80×0,70	2,33	2.54	2.57

*) Выстрелы проводились при нормальном атмосферном давлении воздуха

Также можно отметить, что расположение цепочки относительно центрального кратера изменяется и зависит, по всей видимости, от расположения точки начального контакта ударника с элементами дискретной преграды. В эксперименте #38988-2 ярко выраженная цепочка кратеров отсутствовала. По всей видимости, это обусловлено относительно малым значением параметра κ и большим значением ε , что делает данную дискретную преграду более похожей по свойствам на сплошную, чем другие преграды, использованные в данной серии экспериментов.

Типичный вид повреждений свидетелей в серии экспериментов со стальными сетками представлен на Рис. 4 (эксперимент 1-08, Таблица 2). В геометрическом центре всех повреждений свидетеля находится группа четырех крупных кратеров (они обведены окружностью). Всего из восьми экспериментов в четырех случаях при $\varepsilon > 2.12$ (выстрелы 1-01, 1-02, 1-03, 1-08) центральная группа кратеров состояла из четырех участников. В остальных случаях кратеров было два. Такое

поведение центральных фрагментов ударника указывает на существование зависимости процесса фрагментации от геометрического параметра ε дискретной преграды.



Рис. 3. Эксперимент #39034-2 (Таблица 1).
Повреждения свидетеля

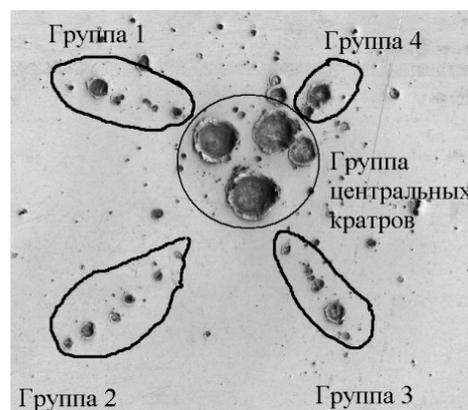


Рис. 4. Эксперимент 1-08 (Таблица 2). Повреждения свидетеля

Существенная особенность распределения повреждений – это четыре группы линейно распределенных кратеров (группы 1, 2, 3 и 4, Рис. 4). Можно выделить следующие свойства этих повреждений: во-первых, во всех восьми случаях появление четырех таких групп, состоящих из достаточно крупных кратеров, имеет место в каждом эксперименте; во-вторых, группы представляют собой цепочки кратеров, вытянутых вдоль линий, идущих от каждого из центральных кратеров; в-третьих, на всех свидетелях цепочки кратеров развернуты относительно проволок сетки на 45 градусов, кроме выстрела 1-01, где цепочки параллельны проволокам сетки; в-пятых, размеры кратеров в цепочках увеличиваются с удалением от центра повреждений к периферии, что отличается от поведения кратеров при фрагментации ударников на сплошных преградах, когда с удалением от центра размеры кратеров уменьшаются.

В разделе 1.3 главы 1 представлены результаты изучения распределения кинетической энергии между фрагментами, образовавшими центральную группу кратеров, и фрагментами, ответственными за образование линейно распределенных цепочек кратеров. Анализировались эксперименты, представленные в Таблице 2. Поскольку в рассматриваемом диапазоне скоростей объем кратера, производимого быстролетящим компактным объектом, линейно пропорционален его кинетической энергии, то, оценив объемы всех кратеров, можно оценить распределение по кинетической энергии между этими группами фрагментов. В работе объемы кратеров на свидетеле оценивались по весу засыпаемого в них песка.

Представленные на Рис. 5 зависимости нормированных суммарных объемов кратеров, отражают распределение кинетической энергии между соответствующими группами фрагментов в зависимости от диаметра проволоки. Нормированные данные показывают, что удельная кинетическая энергия группы центральных фрагментов понижается относительно общей кинетической энергии облака фрагментов с увеличением диаметра проволоки. Данное поведение

является характерным также и для сплошных преград, где центральный фрагмент теряет кинетическую энергию за счет потери массы с увеличением толщины преграды. Отделяющиеся от центрального фрагмента более мелкие фрагменты образуют облако, расположенное позади центрального фрагмента, в котором частицы центрально симметрично распределены относительно линии выстрела. Плотность же частиц и их размеры в облаке уменьшаются при движении от центра к периферии. В нашем случае размеры линейно-распределенных кратеров растут по мере удаления от центра. Таким образом, несмотря на схожую динамику перераспределения кинетической энергии фрагментов от центральных к периферийным, физические процессы, отвечающие за это перераспределение, имеют, по всей видимости, иную природу. График на Рис. 5, показывающий изменение отношения объемов кратеров линейно-распределенной группы к центральной группе в зависимости от диаметра проволоки (маркировка - «x»), монотонно возрастает с увеличением диаметра проволоки.

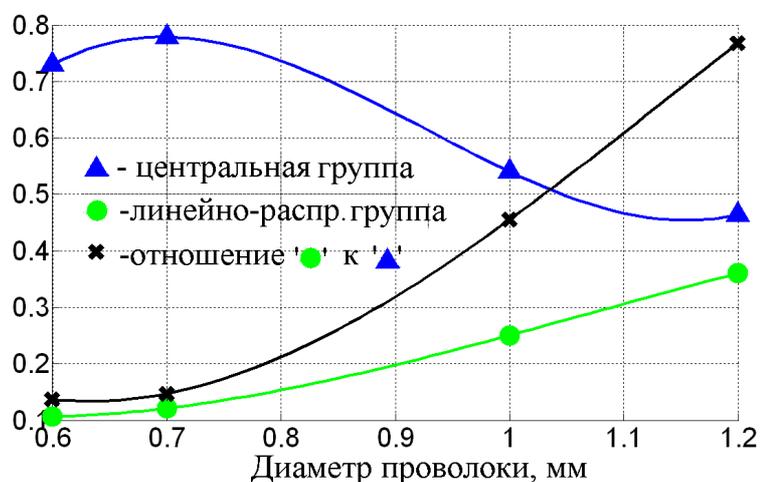


Рис. 5 Нормированные значения объемов кратеров центральной и линейно-распределенной группы

Как и в случае высокоскоростного внедрения тела в полубесконечную преграду, внедрение проволок сетки в материал ударника должно приводить к образованию эжекционных выбросов, сопровождающих внедрение элементов преграды в материал ударника. Зависимость объема линейно-распределенных кратеров от диаметра проволоки приобретает близкий к линейному характер в масштабе квадратов диаметров проволок (т.е. фактически в масштабе удельной массы проволок), что согласуется с феноменологическим фактом о линейной зависимости между кинетической энергией внедряющегося в вещество объекта и объемом вытесняемого при этом вещества в виде эжекционных частиц.

Результаты первой главы опубликованы нами в работах [5, 8, 9].

Во второй главе диссертации представлены серии экспериментов, выполненные с одиночными сеточными и одиночными струнными преградами, позволившие нам прояснить механизм фрагментации ударника на этих преградах. В основной части экспериментов использовались ударники, изготовленные из полиэтилена, диаметром 15 мм. Полиэтилен имеет меньшее по сравнению с алюминием сопротивление внедрению, поэтому все эффекты, характерные для

фрагментации ударника на дискретных преградах, должны проявиться более отчетливо для полиэтиленового ударника, приводя к более различным особенностям, образуемым облаком фрагментов на поверхности свидетеля. Кроме этого часть экспериментов была выполнена с использованием алюминиевых ударников диаметром 6.35 мм. Также для сравнительного анализа несколько экспериментов было сделано со сплошными и двойными струнными преградами. Зарегистрированная скорость ударников составила 1.7–3.8 км/с. Преграды располагались нормально к линии выстрела. В качестве свидетеля использовались плиты из алюминиевого сплава Д16 толщиной 15 мм. Схема экспериментов показана на Рис. 1. Во всех экспериментах производилось вакуумирование баллистической трассы. Параметры экспериментов с полиэтиленовым ударником и струнными преградами представлены в Таблице 3.

Таблица 3 Полиэтиленовый ударник 15 мм, струнные преграды

Номер выстрела	Апертура и диаметр проволоки, $l_a \times d_w$ (мм)	Удельная масса преграды, (кг/м ²)	ε	κ	Скорость, (км/с)
#39034-3	3.5×1.0	1.333	3.33	3.50	2.95
#39041-1	1.7×0.5	0.682	6.82	3.40	1.71
#39041-3	2.8×0.5	1.083	4.17	3.50	1.78
#39041-4	2.3×0.5	0.536	5.36	4.60	2.08
#39041-5	3.1×0.5	0.417	4.17	6.20	2.97
#39043-1	1.7×0.5	0.682	6.82	3.40	2.65
#39043-2	2.3×0.5	0.536	5.36	4.60	2.67
#39043-3	3.1×0.5	0.417	4.17	6.20	2.15
#39052-1	0.9×0.5	1.071	10.71	1.80	2.82
#39056-1	0.4×0.5	1.667	16.67	0,80	2.94
#39058-1	0.4×0.5	1.667	16.67	0,80	1.49

Изучение свидетелей показало, что в экспериментах с $\kappa > 1.8$ (Рис. 6(б, в)) на свидетелях присутствуют ярко выраженные нитеобразные кратеры, расположение которых параллельно струнам преграды. Число нитевидных кратеров коррелирует с параметром ε , т.е. шесть кратеров для $\varepsilon = 6.82$, пять кратеров для $\varepsilon = 5.36$, три кратера для $\varepsilon = 4.17$. Нитевидные кратеры образуются в результате действия плоских выбросов материала с фронтальной поверхности ударника, возникающих в результате перемещения материала ударника сквозь струны преграды. Наличие плоских выбросов обуславливает аномальную глубину нитевидных кратеров, которая была бы не характерна для случая компактных фрагментов при данном соотношении плотностей материала ударника и свидетеля. При ширине центрального нитевидного кратера 4 мм его глубина достигает 12 мм (Рис. 6(в))

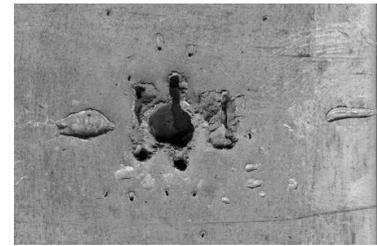
Центральный самый крупный воронкообразный кратер образован фрагментом тыльной части ударника. Характер повреждений в местах пересечения нитевидных и центральных кратеров указывает, что образование последних протекало, когда процесс формирования первых уже был завершен. Это означает, что выбросы имеют более высокую скорость относительно скорости фрагмента тыльной части ударника. Также это означает, что перемещение материала ударника сквозь ячейки вызывает его дополнительный разгон.



(а)#39052-1, 0.9×0.5(мм),
 $v=2.82\text{км/с}, \rho_b=1.07\text{кг/м}^2,$
 $\kappa=1.8, \varepsilon=10.7$



(б)#39043-2, 2.3×0.5(мм),
 $v=2.67\text{км/с}, \rho_b=0.54\text{кг/м}^2,$
 $\kappa=4.6, \varepsilon=5.36$



(в)#39043-3, 3.1×0.5(мм),
 $v=2.15\text{км/с}, \rho_b=0.42\text{кг/м}^2,$
 $\kappa=6.2, \varepsilon=4.17$

Рис. 6 Полиэтиленовый ударник, струнная преграда. Расположение струн вертикально. Размер изображенной области 150 мм×100 мм.

При $\kappa \leq 1.8$ (Рис. 6(а)) фронтальные выбросы отсутствуют. Это означает, что из-за конечной вязкости материала ударника уменьшение расстояния между струнами преграды приводит к исчезновению эффекта струеобразования.

Таким образом, по характеру повреждений свидетеля можно утверждать, что при контакте со струнной преградой имеет место фрагментация, реализующаяся на фронтальной части ударника – фрагментация фронтального типа. Этот тип фрагментации кардинально отличается от ударно-волновой фрагментации тыльной части, характерной для взаимодействия ударника со сплошной преградой. Крайне неоднородный рельеф дна центрального воронкообразного кратера на Рис. 6(а) указывает на то, что тыльная часть ударника начинает разрушаться и находится в незавершенной стадии фрагментации (в отличие от центрального кратера на Рис. 6(в), который имеет правильную форму с гладкими стенками). С учетом того, что при уменьшении κ уменьшается доля повреждений свидетеля нитеобразными кратерами, можно сделать вывод, что происходит перераспределение энергии из области фронтальной фрагментации в область ударно-волновой фрагментации, характерной для сплошных преград.

С целью уточнения особенностей фрагментации на сетках была выполнена серия экспериментов на сеточных преградах с полиэтиленовым и алюминиевым ударником (Таблица 4) в условиях вакуумирования баллистической трассы. Измерялись объемы наибольших кратеров на свидетеле.

Таблица 4 Эксперименты с сеточными и сплошными преградами

Номер выстрела	Тип преграды $l_a \times d_w$ (мм) или толщина (мм)	Пов. плотн. преграды (кг/м ²)	ε / κ	v (км/с)	Объем наиб. кратера (мм ³)
Эксперименты с полиэтиленовым ударником диаметром 15 мм (расстояние до мишени: 235, 235 и 215 мм соответственно):					
#39378-1	стальная сетка 5.9 × 0.6	0.75	2.308 / 9.83	3.32	-
#39384-1	стальная сетка 5.9 × 0.6	0.75	2.308 / 9.83	1.85	-
Эксперименты с алюминиевым ударником диаметром 6.35 мм (расстояние до мишени: 150 мм во всех выстрелах):					
#38936-3	стальная сетка 2 × 0.6	1.770	2.442 / 3.33	3.30	682
#38959-1	латунная сетка 2 × 0.5	1.400	2.540 / 4.00	2.42	198
#38936-2	пластина Д16М 0.69	1.900	-	2.70	751

Изображение свидетеля эксперимента #38936-3, проведенного с алюминиевым ударником и сеточной преградой, представлено на Рис. 7. Как и в случае экспериментов с сеточными преградами, проведенными при нормальном атмосферном давлении, можно отметить наличие на свидетеле цепочек линейно-распределенных кратеров, расходящихся от центра. При этом более крупные кратеры в каждой цепочке находятся на максимальном удалении. В отличие от выстрела в воздушной среде дробление центрального лидера не происходит, но интенсивность линейно распределенных кратеров и разлет аналогичны. Структура поверхности дна центрального кратера указывает на высокую неоднородность центрального фрагмента после взаимодействия с сеткой. В эксперименте #38959-1, проведенном при меньшей скорости с более легкой сеточной преградой, состояние центрального кратера также указывает на сильную поврежденность центрального фрагмента, при этом его объём в 3.5 раз меньше, чем объём центрального кратера, полученного в эксперименте #38936-2 с более тяжелой сплошной преградой, квадрат скорости которой лишь в 1.3 раза больше квадрата скорости в эксперименте #38959-1. Учитывая то, что объём кратера линейно зависит от кинетической энергии фрагмента, из замеров объёмов центральных кратеров следует, что при данной скорости фрагментация на сплошной преграде только начинается, но при меньшей скорости фрагментация уже идет полным ходом на сеточной преграде.



Рис. 7 Выстрел #38936-3, (Таблица 4)



Рис. 8 Выстрел #39378-1, (Таблица 4)



Рис. 9 Выстрел #39384-2, (Таблица 5)

Изображение свидетеля для эксперимента с полиэтиленовым ударником (выстрел #39378-1, Таблица 4) представлено на Рис. 8. Морфологию повреждений можно описать как центральный кратер с лепесткообразными кратерами, расходящимися в стороны под углом в 45 градусов к направлению струн в сетке. В удаленных от центра вершинах лепесткообразных кратеров имеются глубокие узкие кратеры. При диаметре около 3 мм их глубина достигает 6-7 мм. Кратер в левом нижнем углу при диаметре 4 мм проходит почти на всю глубину пластины (порядка 15 мм). Лепесткообразные кратеры, расходящиеся от центра на Рис. 8, соответствуют линейно распределенным цепочкам кратеров на Рис. 4 и Рис. 7. Они образованы воздействием струеобразных выбросов материала ударника, генерация которых происходит в результате перемещения материала ударника сквозь ячейки сетки. Наличие по краям лепесткообразных кратеров тонких глубоких кратеров, соответствующих максимальной интенсивности генерируемых выбросов вещества ударника, соответствует тому факту,

установленному в экспериментах с алюминиевыми ударниками и сеточными преградами, что размеры линейно распределенных кратеров увеличиваются с удалением от центра повреждений.

Также было проведено семь экспериментов с двойными струнными преградами большой апертуры. Двойная струнная преграда - это две разнесенные одиночные струнные преграды последовательно расположенные друг за другом нормально к линии выстрела. Разнесение составляет 30 мм. Ударник – алюминиевая сфера диаметром 6.35 мм. Стандартная экспериментальная сборка включает в себя пластину–свидетель из алюминиевого сплава Д16 толщиной 15.4 мм, помещаемую на расстоянии 150 мм или 240 мм за тестируемой преградой. Баллистическая трасса вакуумировалась. Анализ фрагментации ударника проводился по характеру повреждений поверхности свидетеля. Были произведены замеры объемов наибольших кратеров. Параметры экспериментов даны в Таблице 5

Таблица 5 Двойные струнные преграды. Алюминиевый ударник 6.35 мм

Номер выстрела	Параметры преграды $l_a \times d_w$ (мм)	Пов.плотность двойной преграды (кг/м ²)	Расстояние до свидетеля (мм)	Скорость ударника (км/с)	Объем наиб. кратера (мм ³)
#39384-2	5.4×0.6	0.80	255	2.37	222
#39384-3	5.4×0.6	0.80	240	2.65	407
#39386-2	4.4×0.6	0.98	240	3.24	1083
#39386-3	3.4×0.6	1.21	240	3.35	194
#39409-1	2.4×0.6	1.21	240	2.63	417
#39442-1	1.2×0.6	2.70	240	2.63	220
#39442-2	1.2×0.6	2.70	240	2.67	-

Характерной особенностью фрагментации ударника на двойной преграде является наличие двух крупных кратеров (или двух локализованных групп повреждений), лежащих вдоль линии перпендикулярной расположению струн (Рис. 9).

Сравнение объемов самых крупных кратеров показало, что эффективность дробления ударника на двойной струнной преграде выше, чем в экспериментах с одиночными сеточными и сплошными преградами, выполненными при близких скоростях:

- Из сравнения экспериментов #38959-1 (Таблица 4) и #39384-2 (Таблица 5) видно, что при скорости около 2.4 км/с отношение объемов наибольших кратеров близко к единице. При этом на одиночной сеточной преграде, поверхностная плотность которой почти в два раза выше, фрагментация только начинается, а на двойной струнной преграде центральный лидер разделился на три крупных фрагмента: один крупный одиночный кратер и два примыкающие друг к другу кратера поменьше (Рис. 9).
- Сравнение экспериментов #38936-2 (Таблица 4) и #39384-3 (Таблица 5) показывает, что на скорости порядка 2.7 км/с при поверхностной плотности

сплошной преграды более чем в два раза выше, объем наибольшего кратера, полученного на двойной струнной преграде, почти в два раза меньше. Этот интервал скоростей является наиболее опасным для экранной защиты Уиппла, так как соответствует пороговой скорости начала фрагментации на сплошной преграде (т.е. минимуму на баллистической кривой). Двойная струнная преграда в этом интервале скоростей обеспечивает эффективное дробление ударника и перераспределение ударного импульса по большей площади свидетеля

- Сравнение экспериментов #38936-3 (Таблица 4) и #39386-3 (Таблица 5) также даёт отношение объемов наибольших кратеров в пользу двойных струнных преград в диапазоне скоростей близких к 3.3 км/с.

Результаты второй главы опубликованы нами в работах [3, 8].

В главе 3 дана сравнительная оценка начала фрагментации ударника на дискретной и сплошной преграде в зависимости от скорости удара. Разумно предположить, что из-за различия механизмов фрагментации ударника на сплошной и дискретной преграде, значение скорости ударника, при которой начинается интенсивная фрагментация на дискретной преграде, может отличаться от значения пороговой скорости фрагментации ударника на сплошной преграде, имеющей ту же массу на единицу поверхности. Для проверки этого предположения нами было выполнено четырнадцать экспериментов, в которых алюминиевый ударник диаметром 6.35мм ударял по одиночным сплошным или струнным преградам, имеющим близкое значение поверхностной плотности (Таблица 6). В качестве сплошной преграды была пластина из алюминиевого сплава (АМгб) толщиной 0.33 мм с удельной плотностью 871 г/м². В качестве дискретной преграды была стальная струнная преграда $l_a \times d_w = 2.1 \text{ мм} \times 0.6 \text{ мм}$ с поверхностной плотностью 889 г/м². Были выполнены четыре эксперимента со сплошной преградой в диапазоне скоростей 1.98-3.74 км/с и десять со струнной преградой в диапазоне скоростей 1.6-3.43 км/с. Баллистическая трасса вакуумировалась. Преграда располагалась нормально к выстрелу. В качестве свидетеля использовалась алюминиевая плита толщиной 25 мм. В Таблице 6 даны объёмы центрального кратера на свидетеле, образованного центральным фрагментом.

Результаты экспериментов представлены на Рис. 10. Для сплошной преграды зависимость объема кратера, образованного центральным фрагментом, от начальной скорости удара (маркировка – «■») хорошо аппроксимируется квадратичной зависимостью, что согласуется с утверждением о пропорциональности объема кратера кинетической энергии фрагмента. Пороговая скорость для данной сплошной преграды находится в районе 4 км/с и не была достигнута в эксперименте. Данные для струнной преграды (маркировка – «∇») показывают, что фрагментация ударника начинается в районе трех километров.

Потеря массы ударника при этом на скорости 3.43 км/с составила примерно 50%. Результаты третьей главы опубликованы нами в работе [4].

Таблица 6. Объемы центрального кратера (струнные и сплошные преграды)

№	Тип преграды	Скорость ударника, км/с	Объем кратера, образованного центральным фрагментом, мм ³
1		1.60	461.1
2		2.17	642.7
3		2.34	488.9
4	Струнная преграда, 2.1мм ×0.6мм, пов. плотность 889г/м ² , материал струн - сталь	2.50	666.8
5		2.68	806.8
6		2.86	990.6
7		3.00	688.2
8		3.00	875.4
9		3.25	860.7
10		3.43	618.7
11	Сплошная преграда, 0.33мм, пов. плотность 871г/м ² , материал АМгб	1.98	480.8
12		2.15	600.2
13		3.13	1089.1
14		3.74	1568.1

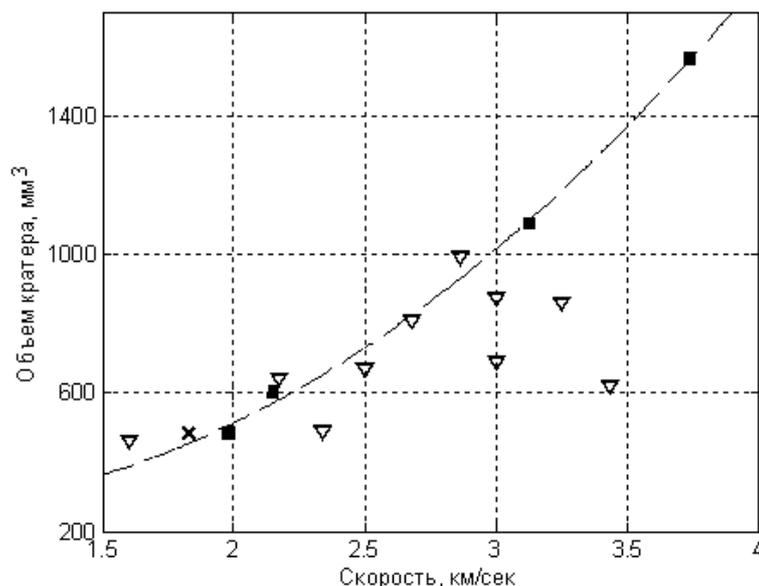


Рис. 10 Зависимости объема кратера на свидетеле, образованного центральным фрагментом, от начальной скорости ударника после пробития сплошной алюминиевой преграды толщиной 0.33 мм (маркировка – (■)) и струнной преграды 2.1×0.6 (мм) (маркировка - (∇)). Пунктирная линия – аппроксимация объема кратеров после пробития сплошной преграды квадратичной зависимостью от скорости

Четвертая глава посвящена численному моделированию экспериментов, представленных в предыдущих главах. Расчеты производились методом гладких частиц (smoothed particle hydrodynamics - SPH) с помощью лицензионной программной системы LS-DYNA версии 971.

В разделе 4.1 дается краткое описание метода SPH и представлены модели материалов, которые использовались нами в расчетах.

Метод SPH является сравнительно новым бессеточным лагранжевым численным методом, чрезвычайно удобным для моделирования высокоскоростных ударных явлений. С 1977 года метод SPH развивался применительно к уравнениям гидродинамики в астрофизических приложениях (Monaghan J.J., *Rep. Prog. Phys.*, 2005, v.68, pp. 1703–1759), а с 90-х годов он был обобщен на задачи механики деформируемого твердого тела (см., например, (Libersky, L.D., et al., *J. Comput. Phys.*, 1993, v.109(1), pp.67-75; Stellingwerf R.F. and C.A. Wingate, *J. Impact Engng.*, 1993, v.14(1-4), pp.707–718)). Отсутствие сетки позволяет SPH естественно моделировать процессы, очень трудно поддающиеся описанию другими методами, а именно: 1) большие деформации и смешивание материалов; 2) интенсивную фрагментацию и движение облака осколков. В расчетах поведение ударника и преграды описывались уравнением состояния Ми-Грюнайзена, моделью Стейнберга-Гуинана и моделью Джонсона-Кука. Эти модели применимы для высокоскоростного деформирования многих материалов, включая большинство металлов.

В отличие от модели Стейнберга-Гуинана, модель Джонсона-Кука остается действующей для более низких скоростей деформации. В модели Джонсона-Кука предел текучести имеет вид

$$Y = (A + B(\bar{\epsilon}^P)^n) \cdot (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \cdot (1 - (T^*)^m) \quad (1)$$

где $\bar{\epsilon}^P$ - эффективная пластическая деформация; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\bar{\epsilon}}^P / \dot{\epsilon}_0$; $T^* = (T - T_0) / (T_m - T_0)$, где T_0 - начальная температура и T_m - температура плавления. Параметры A , B , C , n и m в (1) являются параметрами материала. Известно, что механическое поведение полиэтилена сильно зависит от скорости деформации и температуры. Проведенный нами анализ результатов экспериментов, выполненных в работе (Brown E.N, et. al., *Experimental Mechanics.*, 2007, v.47, pp. 381-393), показывает, что поведение полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) может быть описано в рамках модели (1) с параметрами, представленными в Таблице 7.

В разделе 4.2 представлены результаты численного моделирования экспериментов по высокоскоростному взаимодействию полиэтиленового и алюминиевого ударника со струнными преградами, выполненными в главе 2. Полиэтилен имеет меньшее (по сравнению с алюминиевым ударником) сопротивление внедрению, поэтому эффекты, характерные для внедрения дискретной преграды в ударник, должны проявляться здесь более отчетливо.

Таблица 7 Параметры ПЭВП для модели Джонсона-Кука

	ρ_0 , г/см ³	Теплоемкость кДж/(кг·°К)	A , ГПа	B , ГПа	C	n	m	T_m , К ⁰	T_0 , К ⁰
ПЭВП	0.95	2.5	0.0427	0.0083	0.04	0.40	1.0	407	293

Для моделирования экспериментов с полиэтиленовым ударником была произведена серия расчетов внедрения полиэтиленового ударника диаметром $d_p = 15$ мм в струнную преграду (материал струн – сталь, диаметр струн $d_w = 0.5$ мм) в 2D приближении (соответствующем условиям плоской деформации). В

вычислениях использовалось 19577 SPH частиц для ударника и 189 частиц для струнной преграды; начальное расстояние между частицами как для ударника, так и преграды составляло ~ 0.095 мм. Начальная скорость удара принималась равной 3 км/с. Апертура струнной преграды l_a изменялась от 0.5 мм до 3 мм. На Рис. 11 показаны результаты расчетов для максимального и минимального значения апертуры из этого интервала. Расчеты показывают, что разрушение ударника начинается с фронтальной стороны сразу после контакта ударника со струнами преграды и характеризуется формированием струй, выбрасываемых в направлении удара (Рис. 11). Это является главной особенностью фрагментации ударника на струнной преграде в отличие от фрагментации на сплошной преграде. Число струй коррелирует с числом ячеек, попадающих на ударник. Таким образом, расчеты подтверждают выводы, сделанные в главе 2 на основании экспериментов. Из расчетов также видно, что при уменьшении апертуры струнной преграды доля массы ударника, фрагментируемого за счет струеобразования, существенно уменьшается. После контакта ударника со струнами, от места внедрения каждой струны вглубь ударника распространяются ударные волны. Через некоторое время они сливаются, образуя единую ударную волну, подобную той, которая формируется при взаимодействии ударника со сплошной преградой, однако ее интенсивность сильно зависит от апертуры струнной преграды: при уменьшении апертуры интенсивность ударной волны растет (предельный случай апертуры равной нулю соответствует сплошной преграде). Ударная волна отражается от свободной тыльной поверхности ударника, что приводит к откольному разрушению тыльной части ударника. Это наглядно демонстрируется Рис. 11(а) и (б) в момент времени 10 мкс. Разрушение тыльной части ударника на Рис. 11(б), соответствующей апертуре $l_a = 0.5$ мм, уже подобно разрушению, наблюдаемому на сплошной преграде.

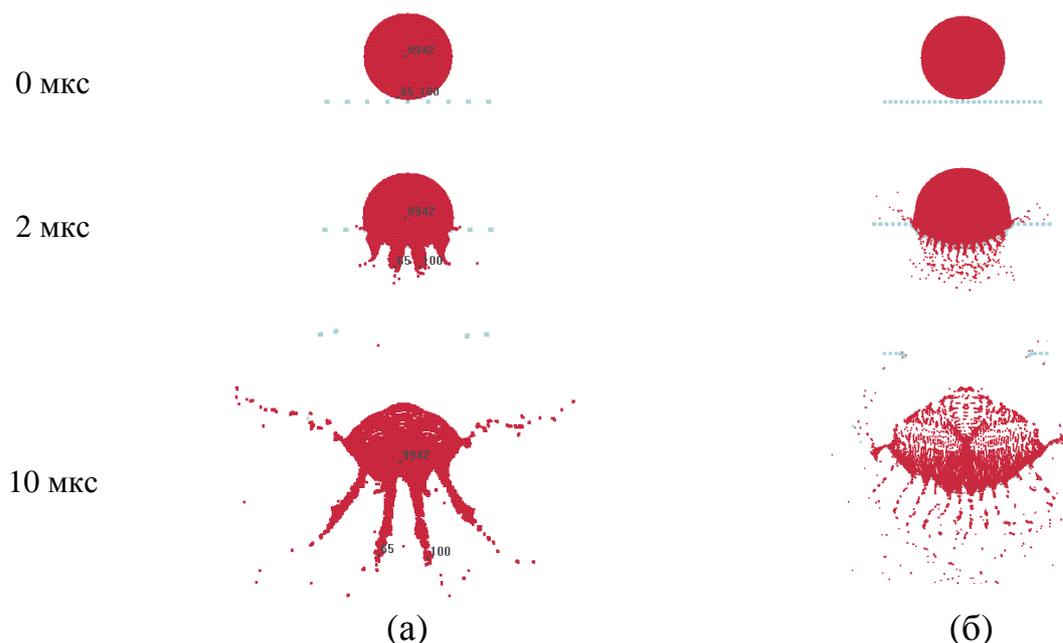


Рис. 11 Численное моделирование разрушения полиэтиленового ударника на стальной струнной преграде. $l_a = 3$ мм (а), 0.5 мм (б). Скорость удара – 3 км/с.

Таким образом, численные расчеты показывают, что разрушение и фрагментация ударника на струнной преграде характеризуется как формированием струй, выбрасываемых с фронтальной части ударника, так и ударно-волновым разрушением тыльной части ударника. Какой из этих механизмов превалирует, зависит от отношения l_a/d_p . При больших апертурах преобладает фронтальная фрагментация, но при уменьшении апертуры доля массы ударника, фрагментируемого за счет струеобразования, существенно уменьшается и преобладает ударно-волновой механизм разрушения ударника. Для фиксированного диаметра струны можно выделить характерное расстояние между струнами $(l_a)_c$ такое, что при $l_a < (l_a)_c$ характер разрушения ударника на струнной преграде будет подобен разрушению ударника на сплошной преграде.

В разделе 4.3 представлены результаты численного 3D моделирования экспериментов по высокоскоростному взаимодействию полиэтиленового и алюминиевого ударника со стальной сеточной преградой, выполненных в главе 2. Вычисления использовали 67451 SPH частиц для ударника и 9730 частиц для преграды. Результаты вычислений для полиэтиленового ударника при скорости удара 3 км/с представлены на Рис. 12 и Рис. 13. В вычислениях диаметр ударника 15 мм, параметры сетки $l_a \times d_w = 5.9 \text{ мм} \times 0.6 \text{ мм}$. Геометрические параметры ударника и сетки соответствуют эксперименту #39378-1 (Таблица 4). Расчеты на Рис. 12 отличаются друг от друга различным положением точки прицеливания, под которой понимаем точку пересечения линии, проходящей через центр ударника, направленную по вектору скорости ударника, с поверхностью преграды. Из Рис. 12 видно, что фронтальная фрагментация сопровождается формированием струй, «вытекающих» через ячейки сетки. Когда ударник нацелен на центр ячейки (Рис. 12(1)) формируется пять основных струй, выбрасываемых от фронтальной части ударника (одна центральная струя и четыре боковых струи). Кроме того, четыре поперечные струи выбрасываются под углом 45° к струнам сетки и почти перпендикулярно направлению движения ударника. Очевидно, что поперечные струи имеют значительно меньшую массу, чем струи выбрасываемые по направлению движения ударника. Когда ударник нацелен в узел (Рис. 12(2)), формируются четыре основных струи, выбрасываемые от фронтальной части ударника в направлении движения ударника. Таким образом, вычисления подтверждают сделанное в главе 2 предположение, что необычная форма лепесткообразных кратеров, полученных в эксперименте #39378-1 (Рис. 8), создается струеобразными выбросами материала ударника. Кроме того, форма струй, имеющая загнутые во внутрь головные части (Рис. 12(1с)), обеспечивает пробивание пластины-свидетеля на краях лепесткообразных кратеров.

Из Рис. 13 видно, что после взаимодействия ударника с сеточной преградой, массовая скорость в струях, выбрасываемых по направлению движения ударника, значительно превышает массовую скорость центрального фрагмента. Это также подтверждает вывод, сделанный нами на основании экспериментов в главе 2, касательно более высокой скорости струй по сравнению со скоростью центрального фрагмента. Из Рис. 13 видно, что наибольший кумулятивный

эффект достигается в центральной струе, чья массовая скорость превышает начальную скорость ударника примерно в полтора раза.

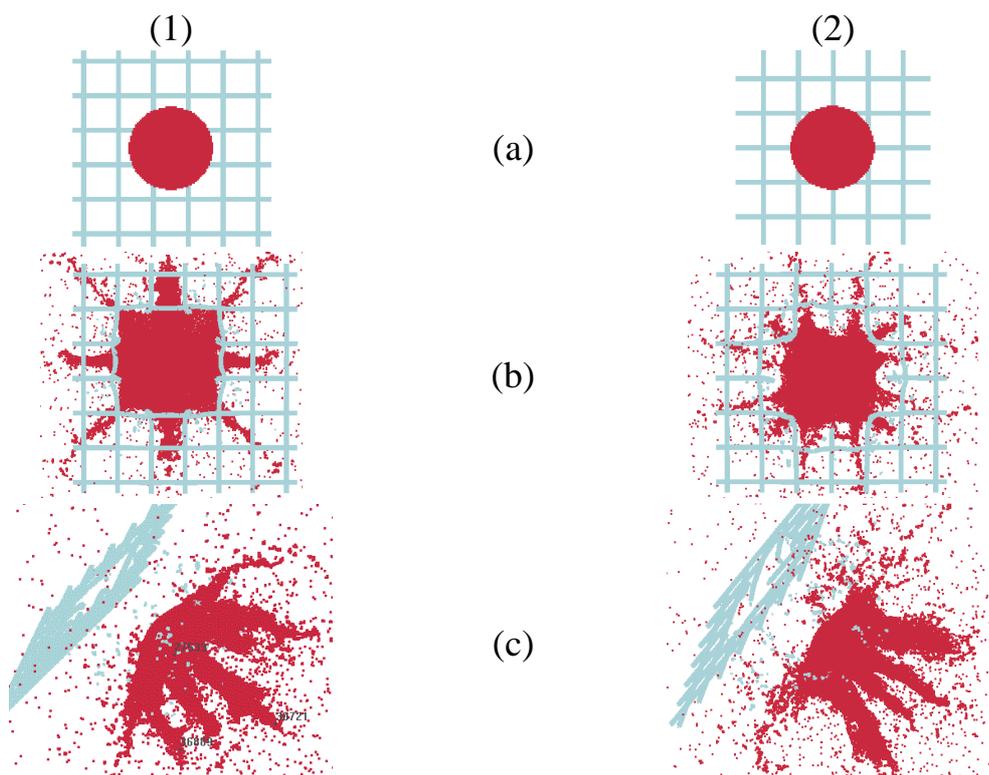


Рис. 12 Нормальный удар полиэтиленового ударника по стальной сеточной преграде. Скорость 3 км/с, диаметр ударника $d_p = 15$ мм, параметры сетки $l_a \times d_w = 5.9$ мм \times 0.6 мм. Центр ударника нацелен на: (1) центр ячейки сетки; (2) узел сетки. Вид сверху: 1(a,b) и 2(a,b); вид сбоку: 1(c),2(c). Время:(a) 0; (b) и (c) 10мкс

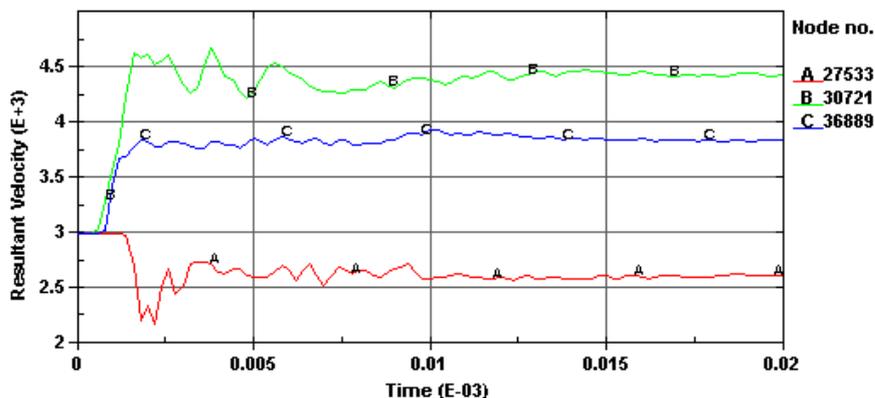


Рис. 13 Зависимость массовой скорости (м/с) от времени (с) для частиц полиэтиленового ударника показанных на Рис. 12 (1): (А) – характерная скорость частиц, движущихся с массивным центральным фрагментом; (В) и (С) – характерные скорости частиц, расположенных на переднем крае центральной струи и боковой струи, соответственно



Рис. 14 Численное моделирование нормального удара сферического алюминиевого ударника по стальной сеточной преграде со скоростью 3 км/с; $d_p=6.35$ мм, параметры сетки: $l_a \times d_w = 2.0$ мм \times 0.6 мм. Ударник нацелен на центр ячейки сетки. Рисунки соответствуют моменту времени 10 мкс. Левый рисунок показывает вид сверху

Аналогично, было проведено моделирование нормального удара сферического алюминиевого ударника по стальной сеточной преграде со скоростью 3 км/с. Диаметр ударника составлял 6.35 мм, параметры сетки были $l_a \times d_w = 2.0$ мм \times 0.6 мм. Диаметр ударника и геометрические параметры сетки соответствуют эксперименту #38936-3 (Таблица 4). Вычисления использовали 17269 SPH частиц для ударника и 9180 SPH частиц для сеточной преграды. Рис. 14 представляет результаты для случая, когда ударник нацелен на центр ячейки сетки. Видно, что фронтальная фрагментация алюминиевого ударника сопровождается формированием струй фрагментов на фронтальной части ударника. Формируются одна центральная струя и четыре боковые струи. Скорость фрагментов в головной части центральной струи здесь также приблизительно в полтора раза превышает начальную скорость ударника.

Рис. 14 подобен Рис. 12, на котором представлены результаты расчетов для полиэтиленового ударника. Однако масса струй в случае алюминиевого ударника значительно меньше, а боковые струи расходятся под углом к направлению движения ударника. Таким образом, формирование струй фрагментов при фрагментации алюминиевого ударника может объяснить механизм формирования групп кратеров, линейно распределенных по поверхности пластины-свидетеля, имеющих форму вытянутых цепочек, расходящихся от центра (Рис. 4 и 7). Отметим, что кроме струй, выбрасываемых от фронтальной части алюминиевого ударника в направлении движения ударника, существуют струи меньшей интенсивности, выбрасываемые в поперечных направлениях, как это видно из Рис. 14.

Для сравнения важно отметить, что при разрушении алюминиевого ударника на сплошной преграде фрагментация имеет ударно-волновой характер и начинается с развития откольного разрушения тыльной стороны ударника, формируя облако осколков вокруг большого центрального фрагмента. Картины фрагментации при различных скоростях удара (V_i) и отношениях толщины пластины к диаметру ударника (t/d_p) показаны на Рис. 15 (взято из Piekutowski A.J., Int. J. Impact Engng., 1995, v.17, p.627-638).

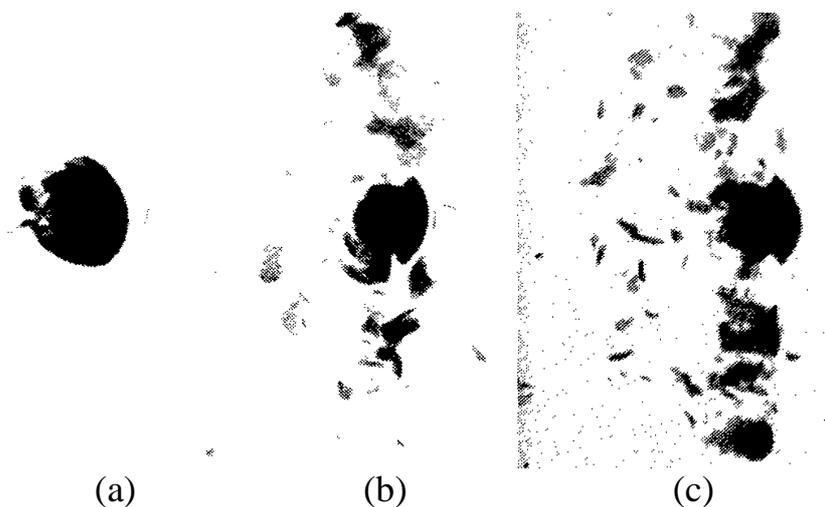


Рис. 15 Рентгенограммы [Piekutowski 1995], показывающие развитие облака откольных фрагментов после пробития алюминиевым ударником диаметром 9.53 мм алюминиевой пластины (движение слева направо в плоскости рисунка):

(a) $V_i = 3.65$ км/с, $t/d_p = 0.062$; (b) $V_i = 3.47$ км/с, $t/d_p = 0.084$;

(c) $V_i = 3.64$ км/с, $t/d_p = 0.084$

В разделе 4.4 представлены результаты численного моделирования экспериментов, представленных в разделе 2.3 главы 2, по фрагментации ударника на двойных струнных преградах большой апертуры. Эксперименты показывают, что при приблизительно одной и той же скорости ударника двойная струнная преграда (эксп. #39384-3, Таблица 5) обеспечивает более эффективную фрагментацию ударника, чем сплошная преграда (эксп. #38936-2, Таблица 4), при существенно меньшей удельной массе преграды. Причем апертура струнных преград в эксперименте #39384-3 больше радиуса ударника.

Для того, чтобы понять механизм фрагментации ударника на двойной струнной преграде большой апертуры было выполнено численное моделирование. Вычисления использовали 17269 SPH частиц для ударника и 8010 SPH частиц для преграды. Рис.16 показывает результаты 3D моделирования разрушения алюминиевого ударника диаметром 6.35 мм на двойной стальной струнной преграде с апертурой $l_a = 3.4$ мм и диаметром струн $d_w = 0.6$ мм. Расстояние разнесения между преградами 25.4 мм. Скорость удара в моделировании составляла 3 км/с. Видно, что при взаимодействии ударника с первой преградой он повреждается частично, но при этом «раскрывается» и его размер увеличивается. Последнее делает взаимодействие ударника со второй преградой более эффективным. При взаимодействии со второй преградой ударник разделяется на несколько крупных фрагментов, каждый из которых имеет значительно меньшую кинетическую энергию, чем исходный ударник.

Результаты четвертой главы опубликованы нами в работах [1, 2, 6, 7, 8].

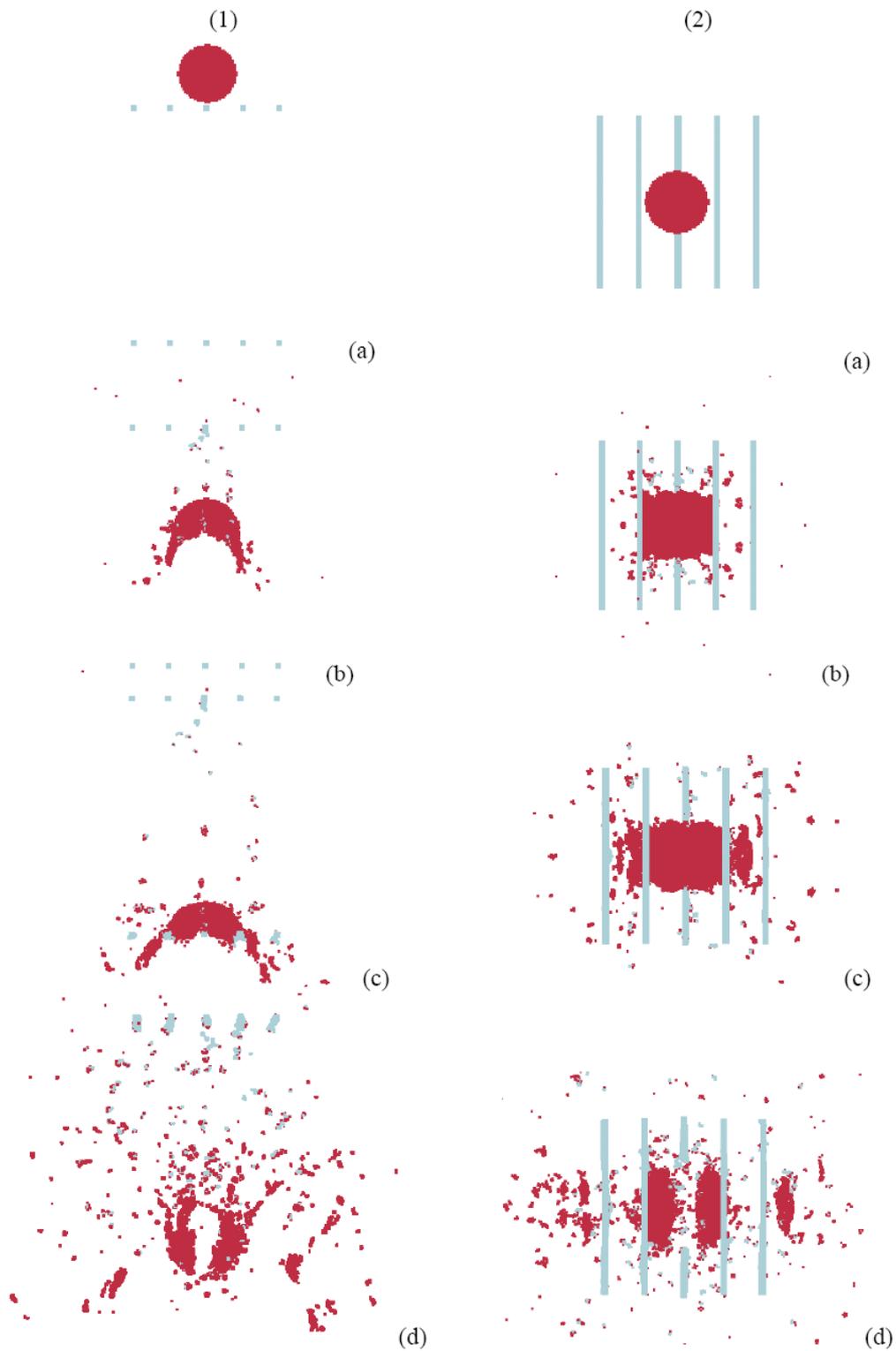


Рис. 16. 3D моделирование разрушения алюминиевого ударника на двойной струнной преграде, $V_i = 3.0$ км/с. Показано: (1) вид сбоку; (2) вид сверху. Время: (a) 0; (b) 5 мкс; (c) 10 мкс; (d) 20 мкс

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные в работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- 1) Впервые показано, что главная особенность разрушения ударника на струнной и сеточной преграде состоит в том, что разрушение ударника сопровождается формированием струй фрагментов, выбрасываемых от фронтальной поверхности в направлении движения ударника и в поперечных направлениях. Число струй коррелирует с числом ячеек дискретной преграды, попадающих на ударник.
- 2) Перемещение материала ударника между струнами, как показывает эксперимент и численные расчеты, вызывает его дополнительный разгон. Интенсивность струй зависит от скорости удара и значений геометрических параметров ячейки струнной и сеточной преграды, а их действие на пластину-свидетель (оцениваемое по глубине кратеров) может превышать действие остальной массы ударника. Численное моделирование дало следующую оценку возникающего кумулятивного эффекта: при прицеливании ударника в центр ячейки скорость фрагментов в струях превышает начальную скорость ударника примерно в полтора раза.
- 3) Разрушение и фрагментация ударника на струнной и сеточной преграде характеризуется не только формированием струй, но и ударно-волновым разрушением тыльной части ударника, которое свойственно разрушению на сплошной преграде. Какой из этих механизмов является преимущественным, зависит от соотношения геометрических параметров ячейки преграды.
- 4) Выбор геометрических параметров сеточной преграды может приводить к более глубокой фрагментации ударника, чем простое увеличение удельной массы преграды.
- 5) Формирование струй осколков при фронтальной фрагментации алюминиевого ударника объясняет механизм формирования на поверхности свидетеля групп линейнообразно распределённых кратеров (т.е. вытянутых в расходящиеся от центра цепочки), наблюдаемых экспериментально.
- 6) Экспериментально показано, что фрагментация алюминиевого ударника на дискретной преграде идет при скоростях удара меньших, чем пороговая скорость фрагментации ударника на сплошной преграде той же удельной массы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Н.Н. Мягков, В.А. Головешкин, А.В. Сулимов, Т.А. Шумихин, О ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ВНЕДРЕНИИ СЕТОЧНОЙ ПРЕГРАДЫ В УДАРНИК, *Механика композиционных материалов и конструкций*, 12 (2006) 407-419.
2. Н.Н. Мягков, А.В. Сулимов, Т.А. Шумихин, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНИКА С ДИСКРЕТНЫМИ ЭКРАНАМИ, *Механика композиционных материалов и конструкций*, 14 (2008) 532-546.
3. Т.А. Шумихин, Л.Н. Безруков, Н.Н. Мягков, МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ, ПРОЯСНЯЮЩИЙ МЕХАНИЗМ ФРАГМЕНТАЦИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРНИКА НА ДИСКРЕТНЫХ ЭКРАНАХ, *Механика композиционных материалов и конструкций*, 13 (2007) 341-355.
4. Т.А. Шумихин, Н.Н. Мягков, Л.Н. Безруков, СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАЧАЛА ФРАГМЕНТАЦИИ УДАРНИКА НА ДИСКРЕТНОМ И СПЛОШНОМ ЭКРАНЕ, *Механика композиционных материалов и конструкций*, 17 (2011) 61-70.
5. A. Semenov, L. Bezrukov, A. Malkin, N. Myagkov, M. Kononenko, T. Shumikhin, IMPACT FRAGMENTATION DEPENDENCE ON GEOMETRICAL PARAMETERS OF SINGLE MESH BUMPERS, *Механика композиционных материалов и конструкций*, 12 (2006) 256-262.

В других научных изданиях:

6. N.N. Myagkov, V.A. Goloveshkin, T.A. Shumikhin, A.V. Sulimov, ON HYPERVELOCITY PENETRATION OF THE MESH-BUMPER STRINGS INTO A PROJECTILE, *Int. J. Impact Engng.*, 36 (2009) 468-475.
7. N.N. Myagkov, T.A. Shumikhin, CHARACTERISTIC FEATURES OF PROJECTILE FRAGMENTATION ON A MESH BUMPER AT HIGH-VELOCITY IMPACT, *Composites: Mechanics, Computations, Applications, An International Journal*, 3 (2012) 35-49.
8. N.N. Myagkov, T.A. Shumikhin, L.N. Bezrukov, EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF PECULIARITIES AT HIGH-VELOCITY INTERACTION BETWEEN A PROJECTILE AND DISCRETE BUMPERS, *Int. J. Impact Engng.*, 37 (2010) 980-994.
9. T.A. Shumikhin, A.S. Semenov, L.N. Bezrukov, e. al., ON FRAGMENTATION OF ALUMINUM PROJECTILE ON MESH BUMPERS, in: *Proceedings of Fourth European Conference on Space Debris, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany, 2005*, pp. 471-476.