ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Орлов Юрий Николаевич

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ УДАРНИКОВ

01.02.04 - механика деформируемого твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Томск-2007

Работа выполнена в ОСП НИИ прикладной математики и механики и кафедре механики деформируемого твердого тела физико-технического факультета Томского госуниверситета

Научный руководитель:	кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Глазырин В.П.
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Люкшин Б.А.
	доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Зелепугин С.А.
Ведущая организация:	Томский политехнический университет

Защита состоится 5 октября 2007 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при Томском госуниверситете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского госуниверситета по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 34^a.

Автореферат разослан «____» _____ 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета доктор технических наук _____ Ю.Ф.Христенко Актуальность работы. Высокоскоростные процессы, протекающие в твердых телах при их ударном или взрывном нагружении, являются в наше время предметом интенсивных фундаментальных и прикладных исследований.

К актуальным направлениям техники, в которых задачи удара могут найти приложение, можно отнести создание эффективных противоударных защит гражданских и военных объектов и техники, гидроштамповку, ударноволновое прессование, сварку и резание взрывом, взрывное упрочнение, безопасность оболочек ядерного реактора в случаях попадания в них предметов извне (летательных аппаратов, осколков и пр.) или нагружения изнутри (опасно высокие давления, возникающие при нарушении работы реактора) и т.д. Кроме этого, надо отметить необходимость защиты космических аппаратов от воздействия на них микрометеоритов и частиц техногенного происхождения. Накопленный опыт в области высокоскоростного деформирования твердых тел представляет интерес в медицине и астрофизике.

Наиболее эффективный и информативный способ моделирования высокоскоростного соударения твердых тел базируется на решении основной системы уравнений механики деформируемого твердого тела (МДТТ). В общем случае, для задач удара такая система уравнений с определяющими соотношениями, граничными и начальными условиями аналитического решения не имеет. Для ее решения используют численные методы.

Целью диссертационной работы является создание методики компьютерного моделирования и проведения с её помощью численных исследований процессов деформации и разрушения при взаимодействии с преградами комбинированных ударников, в том числе наполненных взрывчатым веществом.

Научная новизна заключается в том, что на основе предлагаемого подхода разработана новая расчетно-математическая модель, описывающая высокоскоростное деформирование и разрушение твердых тел, явно учитывающая фрагментацию и позволяющая моделировать ударное и взрывное нагружение неоднородных конструкций.

Практическая значимость Созданная методика численного моделирования может быть полезна при проведении фундаментальных и прикладных исследований. В плане фундаментальных НИР использование данной методики позволяет выяснять закономерности процесса высокоскоростного деформирования и разрушения конструкционных материалов и, кроме того, получать результаты в недоступной для эксперимента области начальных условий. В плане прикладных исследований, а также при проведении НИОКР, методика позволяет прогнозировать поражающие способности проектируемых комплексных ударников, и, напротив, ударостойкость защитных гражданских и военных сооружений.

Результаты работы внедрены и использованы при выполнении следующих НИР:

- «Создание методов прогнозирования стойкости бронепреград различного состава», шифр «Ибрис», заказчик: Секция прикладных проблем при Президиуме РАН, 1999-2001г;

- «Создание математических методов исследования конструкционных материалов при ударных и взрывных нагрузках». Код НИР: 03.01.015. межотраслевая программа Министерства образования РФ и Министерства обороны РФ «Научно-инновационное сотрудничество», 2001-2002г;

- «Исследование деформирования и разрушения материалов конструкций в усло-

виях интенсивного нагружения» № гос. регистрации 01.200.1 12393, УДК 532.546, 2001-2005г.

Диссертационная работа выполнялась при частичном финансировании по программе Минобразования РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 годы) (проект РНП 2.1.2.2398)» и частичной поддержке гранта РФФИ (код проекта № 07-08-00623а).

Достоверность результатов численного моделирования подтверждена решением ряда тестовых задач, результаты которых сравнивались с аналитическим решением и экспериментальными данными. Рассмотрены задачи о распаде разрыва, об ударе цилиндра по жесткой стенке, о пробитии ударником однородных и двухслойных преград, об отколе в стальной пластине, о глубоком внедрении ударников в полубесконечные преграды.

Положения, выносимые на защиту.

1. Расчетно-математическая модель для описания процессов высокоскоростного деформирования и фрагментации повреждаемых твердых тел, вызванных разрушениями отрывного и сдвигового характера.

2. Методика компьютерного моделирования проникания, перфорации, действия продуктов детонации при многоконтактных взаимодействиях, с возможностью явного выделения поверхностей разрыва сплошности материала.

3. Результаты численного исследования взаимодействия с преградами оболочечных ударников с оживальной и затупленной головными частями.

4. Результаты численного исследования взаимодействия с преградами неоднородных и резиновых ударников.

5. Результаты численного исследования взаимодействия с преградами крупногабаритных ударников наполненных ВВ.

Личный вклад автора заключается в разработке численного метода, создании компьютерной программы расчета и программы обработки полученных результатов, проведении расчетов и анализе результатов.

Апробация работы:

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Межд. конф. по судостроению (С.-Петербург, 1994); Межд. конф., посвященная акад. Н.Н. Яненко (Новосибирск, 1996); Межд. конф. «Сопряженные задачи механики и экологии» (Томск, 1996); Межд. конф. «Всесибирские чтения по мат-ке и механике» (Томск, 1997); Всеросс. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 1998, 2000, 2001, 2002, 2004, 2006); Конф. волжского регионального центра РАРАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения», Саров, 2000 г; VI Всеросс. науч.-техн. конф. «Механика летательных аппаратов и современные материалы» (Томск, 1998, 1999); Межд. конф. «Вычислительные и информационные технологи в науке, технике, образовании» (Алма-Ата, 2002); IX Всеросс. науч.-техн. конф. «Физика и химия высокоэнергетических систем» (Томск, 2003); Международная конф. «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» ВИТ-2003 (Усть-Каменогорск, 2003); Научная конф. волжского регионального центра РАРАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллер. вооружения» (Саров, 2003); VI, VII Всеросс. науч.-техн. конф. «Наука. Промышленность. Оборона 2005» (Новосибирск, 2005, 2006); V Межд. конф. по внутрикамерным процессам и горению в установках на твердом топливе и ствольных системах ICOC'2005 (Москва, 2005); VIII Межд. конф. «Забабахинские научные чтения» (Снежинск, 2005); III Межд. конф. «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2006); IX Всеросс. съезд по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2006); Межд. конф.

«Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» ВИТ-2006 (Павлодар, 2006).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 16 печатных работах.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы; содержит 72 рисунка, 12 таблиц, библиографический список из 97 наименований – всего 161 страница.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** диссертации проведен обзор и анализ методов в механике деформируемого твердого тела для решения задач высокоскоростного взаимодействия, обоснована актуальность проводимых исследований; сформулирована цель работы; раскрыты ее научная новизна и практическая значимость, изложены положения, выносимые на защиту, дано краткое содержание диссертации.

Первая глава посвящена математической постановки задачи соударения твердых тел с позиций феноменологической макроскопической теории сплошной среды на основе уравнений неразрывности, сохранения импульса и энергии для объема V сплошной среды в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla_i (\rho v_i) &= 0, \ \rho \dot{v}_i - \nabla_j \sigma_{ij} = 0, \ \rho \dot{E} - \sigma_{ij} e_{ij} = 0, \\ \sigma_{ij} &= \sigma_{ij} (\varepsilon_{ij}, E), \ \nabla_i = \frac{\partial}{\partial x_i}, \ i, j = 1, 2, 3, \end{aligned}$$

где ρ - плотность вещества; v_i - компоненты вектора скорости; σ_{ij} , ε_{ij} , e_{ij} - компоненты тензоров напряжений, деформаций и скоростей деформаций, E - удельная внутренняя энергия.

Для решения задачи используется модель, в основе которой лежит упругопластическое поведение материала. Определяющие соотношения задаются в форме Прандтля – Рейса при условии текучести Мизеса. Среда предполагается повреждаемой, повреждения в материале трактуются как эволюционирующие в волнах напряжений изначальные микропустоты, которые описываются кинетическим уравнением порообразования. Рост и накопление микроповреждений учитываются посредством коррекции характерных параметров моделируемой среды.

В работе использовались уравнения состояния Уолша и Жукова (НИИ ПММ, г. Томск), константы которого определены для ряда материалов, в том числе для оргстекла, полистирола, текстолита, стеклотекстолита и асботекстолита.

Разрушение хрупких и пластичных материалов в процессе ударноволнового нагружения может происходить по отрывному или сдвиговому механизму. Будем считать, что отрывные разрушения происходят при достижении главным растягивающим напряжением значения откольной прочности σ_k , либо при достижении микроповреждениями (пористостью) предельного значения ξ^* : (1.5^B)

$$\sigma_l \geq \sigma_k, \, \xi \geq \xi^*$$

Для прогнозирования сдвиговых разрушений используется критерий, где мерой повреждения материала является удельная работа сдвиговых пластических деформаций A_p .

При выполнении условия:

$$A_p \ge A_p^*; \ A_p = \int_0^{t^*} dA_p = \int_0^{t^*} \frac{\sigma_{ij} d\mathcal{E}_{ij}^p}{\rho}$$

материал считается разрушенным по типу сдвига (A_p^* - критическое значение удельной работы сдвиговых пластических деформаций).

Начальные условия в задачах ударного взаимодействия твердых тел предполагают задание (возможно и равное нулю) компонентов напряжений, давления и внутренней энергии, плотность и скорость заданы, граничные условия на свободных поверхностях задают равенство нулю вектора напряжений $\overset{1}{\sigma}_{n}$ на площадке с нормалью $\overset{1}{n}$.

Условия на контактной поверхности реализуются через алгоритм скольжения. Глубокое проникание моделируется посредством алгоритма эрозии.

Одним из ключевых моментов, при моделировании разрушения тела на фрагменты, является выбор метода образования трещин. В настоящее время существует несколько распространенных методов трещинообразования.

В одном из таких методов (назовем его первым), в каждом элементе периодически вычисляются главные напряжения в предположении использовать их минимаксные свойства. При выполнении условия разрушения вычисляется площадка к максимальному отрывному напряжению, соотнесенная к центру элемента. Затем вычисляются расстояния от узлов элемента до линии, обозначающей площадку, которая и переносится в ближайший узел. После этого узел расшепляется по сторонам этого узла.

В другом методе (втором), в отличие от предыдущего, главные напряжения определяются в узлах и вычисляются как среднее значение главных напряжений в элементах, ассоциированных с данным узлом, остальное как в предыдущем методе.

Метод, предложенный автором работы (третьем), предназначен в основном для образования трещин по объёмным критериям расщепления, когда направление трещины напрямую не определено природой критерия (пористость, работа пластических деформаций). В этом методе критерий расщепления вычисляется в узлах, через его значения в элементах. В случае его выполнения, из всех возможных, выбирается такое направление трещины, при котором градиент значений критерия между её концами минимален (рис. 16,1в).

Для иллюстрации приведенных способов расщепления узлов смоделировано срезание пробки в 10 мм дюралевой пластине, помещенной в штамп (рис. 1г – 1ж). Критерием расщепления в данном случае выбрана удельная работа сдвиговых пластических деформаций.

Во второй главе проведено тестирование разработанной методики численного моделирования на качественное и количественное соответствие параметрам моделируемого процесса, а также бесспорным физическим соотношениям.

С этой целью решены задачи о распаде разрыва (рис. 2а), об ударе стального ци -

(1.11) (1.12)

(1.10)













Рисунок 4



линдра по жесткой стенке (рис. 26), о сквозном пробитии сферическим ударником однородных и двухслойных преград (рис. 2в), о глубоком внедрении сердечников винтовочных пуль в полубесконечные алюминиевые преграды.

Расхождения между укорочением (отношение конечной длины к начальной $l_{x'}/l_{0}$), зафиксированные в расчете и эксперименте при решении задачи об ударе цилиндра по жесткой стенке, не превышали 2%. Начальная скорость варьировалась от 161 м/с до 367 м/с.

Моделирование процесса пробития однородных и двухслойных преград из стеклотекстолита и алюминия осуществлялось для диапазона начальных скоростей удара от 373 м/с до 932 м/с. Сравнивались запреградные скорости центра масс ударников, зафиксированные в расчете и эксперименте. Во всех случаях расхождения не превысили 4,5%.

Результаты расчетов внедрения ударников с оживальной головной частью в преграды для диапазона от 336 м/с до 1031 м/с показали, что расхождения между расчетной глубиной проникания и зафиксированной в эксперименте не превышают 5%.

На рис. За показано высокоскоростное соударение с образованием осколочного облака, на рис. Зб – глубокое проникание (расхождение с экспериментом 7.5%), на рис. 4а – откол в стальной пластине, на рис. 4б – взрывное нагружение свинцовой пластины.

В **третьей главе** отмечается тот факт, что существует потребность в бесшумном (или малошумном) оружии, которое используется спецподразделениями силовых ведомств государств. Одним из способов уменьшения шума при выстреле является применение оружия с начальными скоростями стрельбы ниже скорости звука в воздухе. Поскольку пробивное действие пули при уменьшении начальной скорости уменьшается, важно выяснить, возможны ли такие изменения в компоновке штатной пули, которые бы, в какой-то мере, компенсировали уменьшение её пробивного действия.

Для этого численно исследуется изменение пробивной способности 9 мм пули, вызванное модификацией её сердечника. Ударники, полученные в результате такой модификации, изображены на рис. 5.

На рис. 6 изображены расчетные конфигурации после соударения ударников B1–B4 с дюралевой плитой толщиной 4 мм, а на рисунках 7, 8 и 9 с 8 мм дюралевой, 4 мм стальной и 8 мм стальной преградами соответственно. Сводные данные по этим расчетам приведены в табл. 1.

Из таблицы видно, что наибольшим пробивным действием для исследуемых здесь преград, обладает ударник В4, а наименьшим – В1. Объяснением этого с точки зрения устоявшихся представлений, неожиданного результата служит разница в механизме перфорации преград. В случае В1 перфорация преграды происходит по типу прокола, а в случае В4 - по типу срезания пробки, при котором затрачивается меньше энергии. В таблице также приведены расчеты по соударению компоновок В1–В4 с 4миллиметровыми преградами из ВПС (высокопрочной стали, предел текучести 0.8ГПа) и титана (предел текучести 0.6ГПа).

Далее исследовалось влияние материала сердечника на пробивное действие ударников. В качестве материалов сердечников использовались: сталь марки Ст10, свинец, вольфрамо-никелево-железный сплав (ВНЖ), уран и золото.

На рис. 10 изображены текущие конфигурации при соударении ударников В1–В4 (золотой сердечник) с 4 мм пластиной из стали. Характерным для этого взаимодейст



вия можно считать образование у сердечника грушевидной формы в процессе внедрения. С увеличением поперечного сечения сердечника в контакт с ним вовлекается всё большее количество материала преграды, отчего увеличивается её прогиб, а также возрастает торможение ударника. Перфорация преграды происходит вследствие разрушения материала, вызванного растягивающими радиальными напряжениями, и диаметр пробоины, очевидно, больше, чем в случае жесткого ударника. Такой механизм перфорации можно определить как продавливание.

			Запреградная скорость (м/с)				
	Т	Треграда →	Д16	Д16	Ст3	ВПС	Титан
	преграда →			(8 мм)	(4 мм)	(4 мм)	(4 мм)
	D1	Эксперимент	190	95	166		
	Ы	Расчет	196	98	167	17*	115
н	DJ	Эксперимент	241	135	186		
ИНС	D2	Расчет	232	131	182	19*	148
Дај	D2	Эксперимент	216	87	147		
$\mathbf{>}$	Б3	Расчет	226	103	149	128	138
	D4	Эксперимент	258	173	188		
	D4	Расчет	252	174	182	161	216

Таблица 1 - Запреградные скорости сердечников из стали У10А ударников В1-В4.

На рис. 11 приведены текущие конфигурации внедрения ударника B1 и B4 со свинцовым сердечником в 8 мм свинцовую преграду. В начале внедрения B1 свинцовый сердечник, сдерживаемый стальной оболочкой, формирует входное отверстие, примерно равное диаметру ударника. После разрушения оболочки сердечник в процессе движения расширяется, поэтому выходное отверстие почти в два раза превышает входное. В ещё большей степени экспансивный эффект проявляется в случае B4, поскольку в этом варианте ударника оболочка срезана и меньше препятствует расширению сердечника в радиальном направлении. Входное отверстие в этом варианте – 14 мм, а выходное – 20 мм.

На рис. 12 изображены результаты соударения ударников В1 и В4 (сердечник из сплава ВНЖ) с преградами из высокопрочной стали толщиной 4 и 8 мм. Видно, что оба ударника перфорируют только 4 мм преграду. Что касается 8 мм преграды, то В1 застревает в ней, едва проколов, а В4, хотя и сформировал пробку, но не смог её выбить.

На рис. 13 представлены текущие конфигурации взаимодействия ударников В1 и В4, в которых сердечник изготовлен из свинца, с 4 мм преградой из стали Ст3. Перфорации преград нет, однако по центру удара наблюдается разрушение в виде небольшого отверстия, несколько большим в случае В4, чем в В1. Необходимо также отметить значительную радиальную деформацию свинцовых сердечников в обоих случаях.

В табл. 2 приведены расчетные запреградные скорости сердечников В1 и В4, изготовленных из различных материалов после их соударения с 4 мм стальной (Ст3) преградой. Далее исследовалось пробивное действие разрезных ударников. Сердечники ударников В2 и В4 разрезаются по линии сопряжения оживальной ГЧ с цилиндрической частью надвое. Передняя часть сердечника, подталкиваемая задней частью, пробивает преграду в том же режиме, что и неразрезанный сердечник, а предполагаемый эффект от разрезания состоит в том, что передний фрагмент несколько меньшего диаметра, поэтому испытывает меньшее сопротивление внедрению. Кроме того, защемление, вызванное упругой разгрузкой, и трение о преграду принимает на себя

Таблица 2 - Запреградные скорости сердечников В1 и В4, изготовленных из различных материалов (4 мм стальная преграда).

Ma	териал	Запреградная скорость сердечника (м/сек)					
серде	чника→	Рь Ст10 У10А Аи ВНЖ U					U
Тип	B1	0-	124	167	163	233	250
уд-ка	B4	0-	143	182	197	249	254

задняя часть, не осложняя движение лидирующего фрагмента. Подбирая материал носового фрагмента (пробойника) и заднего фрагмента (толкателя) с различными физико-механическими характеристиками, можно добиться нужных свойств ударника в целом, а также снизить его стоимость, применяя дешевые материалы для изготовления толкателя.

Таблица 3 - Запреградные скорости ударников В2 и В4, снаряженные сплошным и разрезным сердечниками (4 мм стальная преграда).

	Запреградная скорость (м/с)				
Ударник	сплошной	разрезной			
B2	186	197			
B4	188	212			

На рис. 14, 15 изображены текущие конфигурации при соударении разрезного варианта ударника B2 и B4 с 4 мм стальной преградой. В табл. 3 приведены запреградные скорости ударников B2 и B4, снаряженные сплошным и разрезным сердечниками после пробития 4 мм стальной преграды. Разница между соответствующими табличными данными составляют для B2 – 11, а для B4 – 24 м/с.

Запреградная скорость у пробойников разрезных сердечников выше, чем у неразрезных, однако необходимо помнить, что масса фрагментов значительно меньше массы сердечника в целом.

Так, масса пробойника сердечника B2 – 3.85 г, B4 – 2.5 г, масса сердечника в целом 9.9 г, поэтому кинетическая энергия первых фрагментов сравнительно невелика. Кроме этого, вследствие небольших размеров, у пробойников уменьшается продольная устойчивость и в реальной ситуации они могут сместиться или повернутся боком в процессе внедрения. Такой вариант событий вполне может уменьшить пробивную способность ударника в целом.

Далее исследовалось поведение оболочки ударника при её соударении с преградой. Расчеты проводились для удара оболочки применяемой в ударнике В1 без рубашки и для оболочки снаряженной свинцовой рубашкой по дюралевой и стальной пластинам толщиною 4 мм (рис. 16, 17). Начальная скорость соударения 290 м/с.

На рисунках видно, что преграда получает незначительные повреждения на лице



вой стороне, деформированная боковая часть оболочки приобретает характерный «виньеточный» профиль, на сгибах оболочка разрушается.

Далее исследовалось влияние формы головной части ударника на его пробивное действие, которое, в частности, зависит от скоростных, прочностных и инерционных параметров соударяющихся тел.

В настоящей работе представлены для рассмотрения ударники, ГЧ которых описывается сферическими сегментами положительной и отрицательной кривизны, а также плоская ГЧ. Веса этих ударников, диаметр, параметры материалов, а также скорость взаимодействия те же, что и у сердечников ударников В1–В4, т.е. вес – 9.9 г, диаметр – 7.4 мм, начальная скорость – 290 м/с. Для исключения влияния на процесс пробития боковой поверхности, ударникам придана специальная форма. Все три типа ударников изображены на рис. 18.

На рис. 19 изображены результаты соударения ударников 1, 2 и 3-го типов с 8 мм дюралевой преградой. Визуально можно определить, что диаметр пробки практически соответствует диаметру ударника, её поверхность со стороны ударника повторяет форму ГЧ Во всех случаях пробка приобретает большую, чем у ударника, скорость и отделяется от него. Длительность перфорации дюралевой преграды составила примерно 53 мкс для ударника первого, 45 мкс для второго и 50 мкс для третьего типов.

В итоговой табл. 4 приведены запреградные скорости ударников после пробития ими дюралевой и стальной преград. Из табл. 4 видно, что запреградная скорость ударника первого типа после перфорации преграды из Д16 меньше остальных запреградных скоростей, а скорости ударников второго и третьего типов выше и почти совпадают.

При пробитии стальных преград соотношения запреградных скоростей меняются. Наибольшее значение скорости у 1-го ударника, а соотношения скоростей 2-го и 3-го, хотя и сохранились, но их разница увеличилась.

и излици т запреградные екорости ударников е разли нижи т т.					
		Запреградная скорость (м/с)			
Преграда	\rightarrow	Д16 (8 мм, 3 кБар) Сталь (4 мм, 3			
Tur	1	178	181		
гип удар- ника	2	192	167		
	3	190	151		

Таблица 4 - Запреградные скорости ударников с различными ГЧ.

Далее моделировалось глубокое проникание сердечников ударников B1, B4 с целью исключить влияние тыльной поверхности преград на процесс соударения. В качестве преграды использовалась плита из дюраля с пределом текучести 0.274 ГПа.

Результаты этого расчета изображены на рис. 20. Можно отметить обширные разрушения, вызванные сдвиговыми деформациями в преграде, перед носовой частью сердечника В4, которые отсутствуют при внедрении сердечника В1. Глубина внедрения сердечника В4 в почти в два раза превышает глубину внедрения сердечника В4. Этот факт объясняется тем, что ударник с более обтекаемой ГЧ обладает большей пробивной способностью. Действительно, величина коэффициента формы г.ч. сердечника В1, очевидно, меньше этого параметра В4.

Для более детального анализа процесса соударения рассчитано внедрение ударников типа 1, 2, 3 в толстую дюралевую плиту. Глубина внедрения ударника первого типа 5.1 мм, второго – 3.5 мм по краю ударника, 2.7 мм по центру и третьего – 3.8 мм. Соответствующие конфигурации ударников и преграды изображены на рис. 21.

Далее исследовалось влияние начальной скорости соударения и предела текучести преграды на пробивное действие ударников.

В начале третьей главы были отмечены превосходящие способности ударника В4 к поражению определенного класса преград по сравнению с В1 при скорости соударения 290 м/с. Объяснением этого факта служит, и это уже отмечалось ранее, различный механизм перфорации преграды. Имеется в виду совокупная возможность ударника и преграды взаимодействовать так, что кинетическая энергия, форма ударника, его жесткость, с одной стороны, и прочность, плотность, толщина преграды, с другой, в зависимости от их сочетания, реализуют механизм разрушения по типу пробки или прокола или их сочетания в разных пропорциях. Конкретный набор вышеперечисленных параметров составляет необходимую часть начальных условий соударения. Поскольку число параметров существенно влияющих на ударное взаимодействие значительно, автор ограничился рассмотрением двух из них. Во-первых, варьировалась начальная скорость соударения, во-вторых, динамический предел текучести материала преграды.

На рис. 22 представлены конфигурации, иллюстрирующие соударение ударника В1 (рис. 22а) и В4 (рис. 22б) с 8 мм дюралевой преградой с различными начальными скоростями. На рисунке видно, как изменяется характер перфорации преграды в зависимости от начальной скорости ударника. Например, оболочка ударника при скорости 320 м/с, разрушаясь в носовой части, незначительно деформируется и полностью снимается с сердечника. В дальнейшем, с увеличением начальной скорости, оболочка и рубашка, не снимаясь с сердечника, проникают за преграду.

Были также проведены численные расчеты соударения с различными начальными скоростями ударников В1 и В4 с 4 мм дюралевой плитой и стальными плитами толщиной 4 и 8 мм. Графики относительных запреградных скоростей сердечников этих ударников в зависимости от начальных скоростей приведены на рис. 24а – 24г.

На этих графиках хорошо видна точка инверсии пробивного действия B1 и B4 относительно начальной скорости соударения, т.е. для каждого рассмотренного типа преграды существует начальная скорость соударяющихся с ней ударников B1 и B4, при которой оба ударника имеют равное пробивное действие, выраженное в их равных запреградных скоростях. Влево от этой точки выше запреградная скорость B4, вправо – B1. Так, для 4 мм дюралевой преграды точка инверсии имеет место при начальной скорости ударников равной 920 м/с, для 8 мм –430 м/с. Для стальной 4 мм преграды т. инверсии равна 350 м/с.

Существование точки инверсии легко объяснимо, если рассматривать ударное разрушение материала как результат действия сил прочностного и инерционного сопротивления внедрению ударника. Эти силы в разной степени зависят от скорости соударения. Поэтому соотношение пробивных способностей ударника при разных скоростях будет различным, смещаясь либо в область преобладания влияния прочностных, либо инерционных свойств материала.

Для доказательства существования точки инверсии при изменении прочности материала преграды были проведены численные расчеты соударения сердечника В1 и В4 со стальной 4 мм плитой. В этих расчетах, при фиксированной скорости 290 м/с, варьировался предел текучести стали от 0.1 до 0.7ГПа. Результаты расчета, в виде





Рисунок 24

зависимости относительной запреградной скорости от предела текучести стали, приведены на рис. 24д, из которого следует, что предположение о существование точки инверсии пробивных способностей ударников В1, В4, при изменение прочности материала преграды, имеет место.

В четвертой главе представлены результаты численного моделирования взаимодействия ударников с преградами, с целью выявления и прогнозирования их поражающих способностей, а также возможного проектирования пуль с заранее заданными характеристиками. Прототипами рассматриваемых ударников A1-A6 (рис. 23) являются 9 мм пули пистолетных (револьверных) патронов, массы которых лежат в диапазоне от 3.5 до 10.2 г, начальные скорости от 300 до 470 м/с, а также пистолетные резиновые пули травматического действия.

На рис. 25 изображены конфигурации соударения A1-A6 с 10 мм дюралевой преградой, на которых хорошо виден преимущественно пробивной характер взаимодействия с преградой ударников A2 и A6 и ярко выраженный экспансивный - ударников A4 и A5, которые не смогли перфорировать преграду.

На рис. 26 изображены конфигурации соударения A1-A6 с 4 мм стальной преградой. В целом характер перфорации тот же, что и при соударении с дюралевой преградой.

На рис. 27 представлены изображения ударников всех типов при внедрении в толстую дюралевую плиту. При внедрении всех ударников их оболочки разрушаются, пластичные свинцовые сердечники сильно деформируются, а свинцовая рубашка разламывается на тыльной стороне стального сердечника.

На графиках рис. 28 и 29 изображены относительные скорости соударения всех типов ударников с 4 мм (V_0 =470 м/с) стальной и 4 мм (V_0 =300 м/с) дюралевыми преградами соответственно. По этим графикам (и таблице 6) можно проследить различие во взаимодействии с преградами ударников разных типов и оценить их пробивные и экспансивные возможности. Так, наибольшим экспансивным эффектом, выражающимся в данном случае, в наименьшей запреградной скорости обладают А5 затем А4. Наибольшие пробивные возможности у А6, затем у А2. Пробивные и экспансивные качества других ударников располагаются в интервале между аналогичными качествами выше отмеченных пуль.

В сводной таблице 6, в последнем столбце, приведены данные о глубинах и диаметрах кратеров, образованных ударниками при внедрении в толстую дюралевую плиту. Из таблицы видно, что глубже других внедряются сердечники ударников А2 и А6, соответственно они образуют кратера наименьших диаметров. Остальные ударники образуют кратера, примерно, одинаковых диаметров и глубин.

В последнее время для целей охраны общественного правопорядка и личной самообороны получило распространение травматическое оружие с использованием резиновых пуль. Это в основном и определяет актуальность исследований поведения резины при ударе.

На рис. 30 приведены результаты расчета удара резинового ударника сферической формы диаметром d = 10 мм, весом 0.75 г по медной пластине толщиной h = 0,6 мм с начальной скоростью $V_0 = 270$ м/с. На рис. 31a - хронограмма относительного изменения радиуса ударника, на рис. <math>316 - относительной скорости движения его крайней радиальной точки. На этих графиках фиксируется время достижения пикового значения скорости. Хорошо видно, что период времени между этими значениями



Рисунок 25 - А1-А6->Д16 (10 мм), $V_0 = 470$ м/с.



40 мкс



	a, (r)	L)	Запрегр	Глубина кратера (мм)			
Тип	цечника	/д-ка, (1	V3an/V ₀			Диаметр кратера (мм)	
уд-ка	cep,	Bec y	<i>V</i> ₀ :	= 470 (м/	c)	$V_0 = 300$ (M/c)	$V_0 = 470$ (M/c)
	Bec		Д16 (10 мм)	Д16 (4 мм)	Ст (4 мм)	Д16 (4 мм)	Д16 (40 мм)
	5.6	7.0	117	365	131	87	6
	5,0	7.0	0,25	0.78	0.28	0.29	6.9
	2.5	7.0	119	382	227	186	9
	2,5	7.0	0,25	0.81	0.48	0.62	6
2 🗙	5.0	7.0	67	375	103	110	6.5
	3,8	7.0	0,14	0.8	0.22	0.37	7
	5.(7.1	17	376	129	68	5.7
4	5,0	/.1	0,04	0.8	0.27	0.23	6.9
5	5.6	7.0	0	373	133	22	5.9
	3,0	7.0	0	0.79	0.28	0.07	7
	1.1	7.0	233	419	210	239	7
	1,1	7.0	0,5	0.89	0.45	0.8	6

Таблица 6 - Сводная таблица характеристик ударников A1 – A6 и результатов их соударений с преградами.







Рисунок 29



стабилен и равен, примерно, 18 мкс. Расчетная глубина вмятины в медной пластине составила 9.6 мм, а экспериментальная – 9 мм.

На рис. 32 представлены результаты расчета соударения резинового ударника в форме шара со слоистой преградой, состоящей из резины толщиной 1,5 мм, лежащей на парафиновой подложке, на рис. 346 – хронограмма давления в парафине в точке на расстоянии 1 мм от контактной поверхности и расположенной на оси соударения. Глубина вмятины в парафине составила 6 мм.

На рис. 33 представлены результаты соударения ударника в виде стального шара в резиновой оболочке со слоистой преградой. Диаметр стального шара 6 мм, диаметр ударника 10 мм, вес пули 1.5 г, начальная скорость 270 м/с. На рис. 34а – хронограмма давления в парафине в точке на расстоянии 1 мм от контактной поверхности и расположенной на оси соударения Глубина вмятины в парафине составила 10 мм.

Сравнивая соударения резинового шара и стального шара в резиновой оболочке можно сделать вывод, что двукратная разница в массах пуль двух последних рассмотренных случаев предопределяет расхождение в конечных результатах, а именно, глубину проникания пули и давление за контактной поверхностью.

В **пятой главе** решается задача нагружения стальных преград ударниками, наполненными имитаторами взрывчатых веществ (ВВ).

Для решения поставленной задачи рассматриваются механизмы и закономерности процесса возбуждения детонации BB, определяются характеристики чувствительности и их количественное описание, анализируются критерии чувствительности BB к ударноволновому нагружению, а также обосновывается выбор критерия детонации.

С учетом вышейзложенного проведены расчеты соударения наполненного цилиндрического ударника (рис. 41а) и ударника с оживальной ГЧ (рис. 41б) со стальными преградами толщиной 35 и 41 мм. В качестве наполнителя используется смесь, состоящая из пяти компонентов: цемент – 15%, природный песок – 62%, опилки древесные – 6%, воды – 11%, стекло жидкое – 6%. Плотность такой смеси 1.71 г/см³, динамический предел текучести в пределах 0.01–0.05 ГПа. Суммарный вес снаряженного ударника 235.3 кг.



Замена ВВ имитирующим его физико-механические свойства наполнителем вызвана необходимостью описания и прогнозирования результатов той части стендовых испытаний, в которой исследуются не только вероятность самодетонации, но и параметры соударения ударников с преградами до момента детонации. К таким парамет



Рисунок 36

рам, в частности, относится укорочение ударника, его пробивная способность, давление и массовая скорость в наполнителе. На рис. 36 представлены графические результаты расчета взаимодействия цилиндрического ударника с наполнителем со стальной, 35 мм преградой. Предел текучести стальной оболочки ударника 0.6ГПа, стальной преграды 0.8ГПа. Начальная скорость соударения 300 м/с. Расчет прекращен через 1.56 мс после столкновения.

Преграда разрушается в месте среза пробки, вызванной сдвиговыми напряжениями. Оболочка ударника и наполнитель не разрушаются. Максимальное значение радиуса ударника в процессе соударения составило 216 мм, т.е. он увеличился на 27% от первоначального размера.

На рис. Зба изображен график относительного укорочения длины оболочки (на 9.3%) и наполнителя (11%) цилиндрического ударника во времени.

На рис. 36б изображен график относительной осевой скорости носовой и тыльной частей наполнителя цилиндрического ударника. Осцилляции скорости обусловлены волновым характером деформирования и разрушения преграды, и наиболее заметны в носовой части. На рис. 36г изображен график относительной осевой скорости носовой и тыльной частей оболочки цилиндрического ударника. В отличие от донной части наполнителя донная часть оболочки теряет скорость в большей степени. Вследствие этого в момент времени 1.56 мс между этими частями оболочки и наполнителя образуется зазор величиной 31 мм. На рис. 36в изображены кривые давления по оси наполнителя в моменты времени 10, 20, 30 и 50 мкс. Максимальное давление равно 1.1ГПа. Критерий детонации при таком давлении выполняется только для высокочувствительного наполнителя в момент 8.2 мкс.

На рис. 37 показана эволюция давления (а) и эквивалентной пластической деформации (б) в наполнителе цилиндрического ударника в процессе соударения. В момент времени 10 мкс в преграде и оболочке ударника зафиксировано максимальное давление 4.6ГПа (на рисунке показаны изолинии 4ГПа). В момент времени 20 мкс в носовой части оболочки начинается разгрузка (изолиния –0.1ГПа).

Пластические деформации в начале процесса концентрируются в углах цилиндрического наполнителя (рис. 37б), распространяясь впоследствии к оси ударника. Максимальное значение эквивалентной пластической деформации, зафиксированное за 1.56 мс процесса, равнялось 0.89.

На рис. 37 изображены временные развертки давления (37в) и массовой скорости (37г) в носовой части наполнителя.

В предположении влияния прочностных свойств наполнителя на пробивные способности ударника, проведены расчеты соударения наполненного цилиндра с 35 мм стальной преградой при различных значениях динамического предела текучести наполнителя. Расчет проводился при трех значениях динамического предела текучести наполнителя: 0.05, 0.025 и 0.01Гпа. Результаты этих расчетов приведены в табл 9. Снижение пробивной способности ударника с уменьшением прочности наполнителя можно объяснить увеличением радиальной деформацией ударника в целом.

На рисунке 38 представлены графические результаты расчета взаимодействия наполненного ударника с оживальной головной частью со стальной, 70 мм преградой. Начальная скорость соударения 270 м/с. Суммарный вес снаряженного ударника 445.2 кг.





$V_0(M/c)/Z_p(MM)$	300/41	300/35	600/35	900/35
$P^{O}_{ m max}$, ГПа	4.9	4.9	10.3	16.3
$P_{ m max}^{H}$, ГПа	1.1	1.1	2.8	4.8
$T_{_{m heta}}$, мкс	8.2	8.2	6.7	6.23
$T_{_{\scriptscriptstyle H}}$, мкс			13.7	12.6
$V_{\scriptscriptstyle 3anp}$, м/с	106	222	518	785
$\overline{L}_{ m max}$	0.097	0.065	0.14	0.173
T_p , мкс	419	395	232	130

Таблица 7 – Параметры взаимодействия цилиндрического ударника со стальными преградами

Таблица 8 – Параметры взаимодействия ударника с оживальной ГЧ со стальными преградами

$V_0(M/c)/Z_p(MM)$	270/70	270/76	600/76	900/76
$P^{O}_{ m max}$, ГПа	4.5	4.5	10.3	16.3
$P_{ m max}^{H}$, ГПа	0.84	0.84	2.3	3.4
$T_{_{\it extsf{ extsf} extsf{ extsf{ extsf{ extsf{ extsf{ extsf{ extsf} extsf{ extsf{ extsf{ extsf} extsf{ extsf{ extsf{ extsf} extsf{ extsf{ extsf} extsf{ extsf{ extsf} extsf{ extsf} extsf{ extsf} extsf{ extsf} extsf{ extsf} extsf{ extsf} extsf$	17.0	17.0	13.0	12.3
$T_{_{H}}$, мкс			13.7	12.6
$V_{_{\it 3anp}}$, м/с	145	70	407	697
$\overline{L}_{ m max}$	0.07	0.143	0.26	0.178
T_p , мкс	1800	2060	480	120

Преграда начинает интенсивно разрушаться после 1.8 мс, максимальное значение радиуса ударника в процессе соударения составило 245 мм, т.е. он увеличился на 0.15% от первоначального размера.

На рис. 38а изображен график относительного укорочения длины оболочки и наполнителя оживального ударника во времени. Видно, что укорочение оболочки составляет 12.7%, наполнителя 15%.

На рис. 38 представлены кривые изменения массовой скорости носовой и донной частей оболочки (рис. 38б) и наполнителя (рис. 38в) оживального ударника. На этих графиках видно, что и носовая, и донная части оболочки и наполнителя асимптотиче-

ски стремятся к одной скорости – $0.54V_0$ (145 м/с), которую можно считать запреградной скоростью ударника. Критерий самодетонации выполняется только для высокочувствительного BB в 17 мкс.

В целях сравнительного анализа параметров ударного взаимодействия наполненных ударников с преградой при различных начальных скоростях просчитаны соударения с V₀, равной 600 и 900 м/с. Параметры взаимодействия приведены для цилиндрического ударника в табл. 7, для ударника с оживальной ГЧ в табл. 8.

$\sigma_{\scriptscriptstyle T}^{\scriptscriptstyle H}$, ГПа	0.01	0.025	0.05
$\overline{D}_{ m max}$	0.365	0.265	0.212
\overline{L}_{\max}^{H}	0.171	0.108	0.081
\overline{L}_{\max}	0.120	0.065	0.063
T_p , мкс	420	395	380
$V_{\rm 3anp}$, м/с	214	222	231

Таблица 9 – Параметры взаимодействия цилиндрического ударника (наполнители разной прочности) со стальной преградой

Где

 P_{\max}^{O} - максимальное давление в оболочке;

 P_{\max}^{H} - максимальное давление в наполнителе;

*T*_e - время самодетонации высокочувствительного BB;

 $T_{\scriptscriptstyle \rm \scriptscriptstyle M}$ - время самодетонации низкочувствительного BB;

 $V_{\scriptscriptstyle 3anp}$ - запреградная скорость;

 \overline{L}_{\max} - относительное укорочение ударника;

 \overline{L}_{\max}^{H} - относительное укорочение наполнителя;

 $D_{\rm max}$ - относительное расширение ударника;

 T_{p} - стартовое время разрушения преграды;

 σ_{T}^{H} - динамический предел текучести наполнителя;

 V_0 - начальная скорость ударника;

 Z_p - толщина преграды.

Основные результаты и выводы

Проведенные в диссертационной работе исследования процессов высокоскоростного деформирования и разрушения неоднородных комбинированных ударников при пробитии преград позволили сделать следующие выводы:

1. Для описания поведения сжимаемого, пористого, упругопластического материала при высокоскоростной деформации и разрушении предложена расчетноматематическая модель, учитывающая в явном виде отрывные и сдвиговые разрушения. Разработанная методика позволяет решать многоконтактные задачи ударного и взрывного нагружения, в том числе глубокого внедрения ударников и сквозного пробития преград с учетом фрагментарного разрушения материала. В методике заложена возможность использования различных уравнений состояния (Уолша, Жукова) для широкого круга конструкционных материалов.

2. На языке программирования С++ для плоской и осевой симметрии в двумерной постановке создан программный комплекс позволяющий:

- осуществлять в интерактивном режиме подготовку начальных данных и расчет в консольном режиме;

- проводить графическую и табличную обработку полученных результатов, а также мониторинг параметров среды в любые моменты времени.

 Сравнение результатов расчетов с полученными экспериментальными данными и с данными других авторов, а также результаты решения тестовых задач свидетельствует о перспективности и возможности применения разработанной методики компьютерного моделирования для исследования процессов ударного взаимодействия тел.

4. Численным моделированием установлено, что при дозвуковой скорости взаимодействия, за счет изменения компоновки и формы ударника (9-ти мм винтовочной пули) можно существенно, в некоторых случаях до 80%, увеличить его пробивное действие. Кроме того, спрогнозированы результаты взаимодействия рассмотренных ударников с преградами из различных конструкционных материалов (Ст.3, Д16, ВПС, Ті, Рb), а также выявлено влияние материалов сердечников (У10А, Ст.10, ВНЖ, U, Au, Pb) на их пробивное действие.

Самым эффективным при пробитии 4-х мм стальных преград оказался ударник с затупленной ГЧ с сердечником из урана. Незначительно (на 1,6%) отстает от него ударник с сердечником из ВНЖ.

Установлено, что совместно с сердечником, оболочка и рубашка ударника влияют на его пробивное действие, хотя разрушения преграды, вызванные действием одной оболочкой, незначительны.

Получено, что ударник с разрезным сердечником имеет большую запреградную скорость при пробитии преград, чем ударник со сплошным сердечником.

Проведенные расчеты позволили утверждать, что влияние формы ГЧ ударника на его пробивное действие относительно тонких преград неоднозначно и должно рассматриваться в совокупности с параметрами процесса и физико-механическими характеристиками преграды. Однако, для глубокого проникания вывод однозначен: ударник с рациональной аэродинамической головной частью обладает большей проникающей способностью.

Расчетным путем доказано существование точки инверсии пробивного действия ударников с оживальной ГЧ и затупленной ГЧ при изменении начальной скорости

взаимодействия и предела текучести материала преграды. Получены числовые значения точек инверсии для различных толщин преград.

5. Проведенные численные исследования позволили дать сравнительную оценку пробивного и останавливающего действия осесимметричных оболочечных ударников различной компоновки и, кроме того, показали возможность применения и перспективность программного комплекса в решении задач сквозного пробития преград неоднородными ударниками.

Получено, что для дозвуковой скорости соударения наибольшим пробивным действием обладает ударник Аб. Наибольшим остановочным действием обладает ударник А5. Показано, что путем изменения компоновки и формы ударника можно добиться увеличения его пробивного действия.

Для сверхзвуковой скорости соударения установлено, что наибольшим пробивным действием обладает ударник А6. Наибольшим остановочным действием для толстых преград обладает ударник А5, для тонких – ударник со свинцовым наполнителем с закругленной ГЧ и плоской ГЧ. Расчеты показали, что для рассмотренной начальной скорости изменение компоновки и формы ударника может привести к увеличению его пробивного действия, для некоторых типов преград, более чем в 2 раза.

Для полубесконечных преград из алюминиевого сплава Д16 самым эффективным по глубине внедрения оказался ударник с грибовидным стальным сердечником. Меньше других внедрился ударник со свинцовым наполнителем с конической выемкой покрытой оболочкой (А4).

При моделировании процесса взаимодействия резиновых ударников с тонкими преградами обнаружено наличие затухающих гармонических колебаний линейных размеров ударников.

6. На результатах расчетов напряженно-деформированного состояния контейнерных ударников с плоской и оживальной головными частями, показана возможность применения разработанной методики к решению задач о пробитии преград крупногабаритными ударниками, наполненными ВВ или слабопрочным наполнителем.

В диапазоне скоростей взаимодействия от 270 до 900 м/с для рассмотренных ударников и преград получены конкретные значения запреградных скоростей, времени начала инициирования детонации заряда ВВ, деформации и времени начала разрушения преград. Причем при скорости взаимодействия выше скорости звука в воздухе в преградах имело место отрывное разрушение, а оболочка цилиндрического ударника разрушалась в месте ее максимального расширения.

Установлено, что увеличение предела текучести наполнителя приводит к уменьшению деформации ударника, времени начала инициирования детонации заряда BB, а запреградная скорость ударника при этом растет примерно по линейному закону. При изменении толщины преграды в пределах 20% время начала инициирования BB практически не меняется.

7. Разработанные средства математического моделирования и полученные результаты могут быть полезны как для выявления основных закономерностей и механизмов процессов пробития преград неоднородными комбинированными ударниками, так и при выработке практических рекомендаций по поиску путей повышения эффективности действия перспективных ударников. Полученные расчетные зависимости можно, совместно с экспериментальными данными, использовать для построения аппроксимационных формул или приближенных инженерных моделей, что представляет ценность при проведении опытно-конструкторских работ.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Глазырин В.П., Орлов Ю.Н, Скутин А.А. Моделирование нагружения слоистых конструкций// Изд-во СО АН СССР, ИТПМ, г. Новосибирск, Матер. конф. по числ. метод. решения задач, 1995.

2. Глазырин В.П., Дульнев А.И., Ольшанская Г.Г., Орлов Ю.Н., Уданое взаимодействие неоднородного осесимметричного ударника с преградой, Изд-во ЦНИИ им. А.Н.Крылова, Материалы межд. конф. по судостроению. г. С.-Петербург, 1994.

3. Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Метод расчета ударного взаимодействия твердых тел., Издво РФЯЦ - ВНИИЭФ. Сб. докл. конф. Волжского рег. центра РАРАН «Совр-е методы проект-я и отработки ракет. арт-го воор- ния», Саров, 2000 г.

4. Глазырин В.П., Ольшанская Г.Г., Орлов Ю.Н., Моделирование процесса пробития преград комбинированными ударниками, Вычислительные технологии Т.7., Ч.2, 2002 г., Изд-во СО РАН, С. 144-153

5. Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Орлов М.Ю, Моделирование ударного нагружения неоднородных пластин, Вычислительные технологии Т.7., Ч.2, 2002г., Изд-во СО РАН, С. 154-162

6. Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Орлов М.Ю. Моделирование поведения резины при ударе. Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Доклады конференции. – Томск: Изд-во ТГУ, 2006, с. 253-254.

7. Глазырин В.П., Зайцев М.В., Ольшанская Г.Г., Орлов Ю.Н Численное моделирование взаимодействие ударников с контейнерами, содержащими экологически опасные вещества// Издво ТГУ. Материалы межд. конф. Сопряженные задачи механики и экологии.1996

8. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Моделирование откола в пластинах с неоднородностями// Изд-во Томского ун-та. Сб. статей под ред. И.Б.Богоряда. Иссл-ния по баллистике и смежным вопросам механики Вып.4, 2001

9. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Моделирование ударного нагружения неоднородных пластин// Вычислительные технологии Т.7., Ч.2, 2002г., Изд-во СО РАН,С. 154-162.

10. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Моделирование ударного нагружения неоднородных преград// Изд-во Томск. ун-та.В сб. Фунд-ные и прикл-ные проблемы совр-ой механики, 2002г, С. 148 – 149

11. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Анализ импульсного нагружения скрепленных преград// Изд-во Томск. ун-та.В сб. Фунд-ные и прикл-ные проблемы совр-ой механики, 2002г, С. 150-151.

12. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н Анализ взаимодействия компактных ударников со скрепленными преградами// Изд-во РФЯЦ - ВНИИЭФ. Сб. докл. конф. Волжского рег. центра РАРАН «Совр-е методы проект-я и отработки рак. арт-го воор-ния» Саров, 2004г, С. 538-543.

13. Глазырин В.П., Орлов Ю.Н Моделирование процесса разрушения льда при ударе и взрыве// Изд-во РФЯЦ - ВНИИЭФ. Сб. докл. конф. Волжского рег. центра РАРАН «Совр-е методы проект-я и отработки рак. арт-го воор-ния» Саров, 2004г, С. 543-547.

14. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Исследование взаимодействия комбинированных ударников с преградами// Химическая физика и мезоскопия, 2005.– Т.7, –№ 3, С. 251-258.

15. V.P. Glazyrin, M. Yu. Orlov, Yu. N. Orlov Investigation of destruction of functional gradient barrier at shock wave loading// AIP conference proceeding Zababakhin scientific talks – 2005: International conferences on high energy density physics, Sneginsk (Russia), 5-10 september 2005, Vol. 849, August 3, 2006, pp. 421-426.

16. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Моделирование поведения резины при ударе// Труды международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании», Павлодар, 2006, - Т.1, - С. 316-318.