На правах рукописи

Глазырин Виктор Парфирьевич

# ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ ПРИ УДАРЕ И ВЗРЫВЕ

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Томск - 2008

Работа выполнена в ОСП «НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета» и кафедре механики деформируемого твердого тела ГОУ ВПО «Томский государственный университет».

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор
Скрипняк Владимир Альбертович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук профессор, член-корр. РАН
Аннин Борис Дмитриевич

доктор физико-математических наук, профессор
Кульков Сергей Николаевич

доктор физико-математических наук, профессор
Черепанов Олег Иванович

Ведущая организация: ФГУП «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск

Защита состоится «26» декабря 2008 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 34 а.

Автореферат разослан «____ » _____ 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, ст.н.с Ю.Ф. Христенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Процессы, протекающие в твердых телах при высокоскоростном взаимодействии, в настоящее время являются предметом фундаментальных и прикладных исследований, как в России, так и за рубежом. Это обусловлено, прежде всего, широтой использования получаемых результатов в различных сферах жизнедеятельности человека. Сюда можно отнести: создание эффективных противоударных защит гражданских и военных объектов и техники; сварку и резание взрывом; гидроштамповку; ударноволновое прессование; взрывное упрочнение; безопасность оболочек ядерного реактора в случаях попадания в них предметов извне (летательных аппаратов, осколков и пр.) или нагружения изнутри (чрезмерно высокие давления, возникающие при нарушении работы реактора) и т.д. Отдельно можно выделить защиту космических аппаратов от угрозы воздействия на них микрометеоритов и частиц техногенного мусора. Кроме этого, накопленный опыт в области высокоскоростного деформирования твердых тел представляет интерес в медицине и астрофизике.

Соударение твердых тел сопровождается сложными процессами, окончательная роль которых определяется наличием ряда факторов: начальной скоростью объектов соударения, их составом, формой и физико-механическими характеристиками (ФМХ). Надо отметить, что в большинстве случаев при соударении имеют место проникание тел друг в друга, а также плавление и разрушение материала на отдельные фрагменты.

При количественном описании высокоскоростных ударных явлений возникает много сложных проблем, которые в настоящее время далеки от решения и требуют использования теоретических и экспериментальных методов исследования. Определенные результаты можно получить посредством проведения широкомасштабных модельных и натурных экспериментов при помощи различных баллистических установок и взрывных ускорителей для метания тел. В ходе опытов устанавливаются необходимые зависимости и характеристики. Например, размер осколка, степень его разрушения, форма и глубина кратера, предельная толщина пробития и т.д. Однако необходимо отметить техническую сложность и дороговизну проведения таких опытов, а также невозможность получения подробной информации о пространственно-временном распределении полей напряжений, деформаций и областей разрушений. Тем не менее, важность получения экспериментальных результатов сомнений не вызывает.

Результатам экспериментальных исследований процессов высокоскоростного деформирования материалов посвящены работы Л.В. Альтшулера, А.А. Бакановой, Ф.А. Баума, М.И. Бражника, П. Бриджмена, Б.Л. Глушака, Д. Греди, Л. Грина, А.А. Дерибаса, А.Н. Дремина, Е.И. Забабахина, Я.Б. Зельдовича, Н.А. Златина, А.Г.Иванова, Г.И. Канеля, С.Б. Кормера, В.А. Григоряна, Р. Кинслоу, К.И. Козорезова, А.А. Коняева, А.М. Брагова, С. Марша, Р. Мак-Куина, Ю.И. Мещерякова, Л. Мурра, С.А. Новикова, М.В. Синицына, К.П. Станюковича, Г.В. Степанова, Э.С. Степанова, В.А. Одинцова, Т.М. Платовой, Г.С. Пугачева, С.В. Разоренова, В.И. Романченко, В.М. Титова, В.Ф. Толкачева, Р.Ф. Трунина, Д. Уолша, А.В. Уткина, В.Е. Фортова, И.Е. Хорева, П. Хоува и др.

В роли другого инструмента исследований выступают приближенные аналитические или инженерные методы. При разработке таких методов акцентируют внимание на одном из аспектов задачи (например, образование пробки, лепестков и

т.п.) Затем вводят упрощающие допущения, которые облегчают решение основных уравнений механики сплошной среды, сводя их к одномерныи или двумерным по пространственным переменным дифференциальным уравнениям. Такой подход является простым и незаменимым при проведении экспресс-анализа процесса, однако он ограничен узким диапазоном начальных данных и сделанными предположениями.

Наиболее эффективный и информативный способ моделирования высокоскоростного соударения твердых тел базируется на решении основной системы уравнений механики деформируемого твердого тела. Как правило, для задач удара такая система уравнений с определяющими соотношениями, граничными и начальными условиями не имеет аналитического решения. Для ее решения используют численные методы. Современные методы конечных разностей обладают большой гибкостью и позволяют моделировать движение среды с разрывами, с контактными и свободными поверхностями. По-существу, они также являются приближенными, так как решаются системы конечно-разностных уравнений, а не сами дифференциальные уравнения. При помощи численных методов можно проследить по времени весь процесс динамического деформирования твердых тел. В ходе численного эксперимента можно определить место и время образования очагов разрушений, их характер и эволюцию. Важным достоинством данного подхода является возможность получения полной информации о текущем значении выбранного параметра в каждой точке исследуемого тела, что, в свою очередь, позволяет выяснить механизмы и основные закономерности процесса. Результаты численного моделирования можно использовать как для оценки существующих, так и разработки новых инженерных методик расчета.

Численные исследования процессов, протекающих в твердых телах при ударном и взрывном воздействии, проводились различными группами ученых и связаны с именами: Н.Х. Ахмадеева, В.В. Башурова, Н.Н. Белова, А.В. Герасимова, А.И. Глушко, С.К. Годунова, В.А. Гридневой, А.И. Гулидова, А.В. Жукова, В.Л. Загускина, С.А. Зелепугина, С.П. Киселева, А.И. Корнеева, А.В. Кочеткова, Д. Куррана, М.К. Кэрролла, В.Ф. Куропатенко, Б.А. Люкшина, Е. Ли, П.В. Макарова, Л.А. Мержиевского, Н.Ф. Морозова, Р.И. Нигматулина, В.С. Никифоровского, Т.М. Платовой, Н.Н. Пилюгина, А.В. Радченко, А.И. Рузанова, А.И. Садырина, Г.А., Сапожникова, В.А. Скрипняка, Ю.П. Стефанова, В.Г. Трушкова, В.М.Фомина, Н.Н. Холина, В. Херрманна, Т. Югова, Н.Н. Яненко, а также M.L. Wilkins, R.J. Von Neumann, R.D. Richtmyer, G.R. Johnson, J.N. Johnson, R.A.Stryke, R.W. MacCormack, O. Neimark, F. Collombet, R.A. Gingold, P.D. Lax, B. Wendroff и др.

Высокоскоростное деформирование тел зачастую сопровождается их разрушением. Теория разрушения твердых тел включает в себя ряд комплексных проблем, находящихся на стыке физики твердого тела, материаловедения и механики сплошной среды. Экспериментальная информация о развитии разрушения носит косвенный характер, поскольку на современном этапе развития методов измерения принципиально невозможно полностью проследить эволюцию параметров материала непосредственно в зоне разрушения, не исказив исследуемый процесс. В условиях ударного или взрывного нагружения о характере и параметрах разрушения судят по экспериментально фиксируемой скорости свободной поверхности нагружаемого образца или по результатам металлографического анализа испытуемых образцов.

В последнее время для описания разрушения получил развитие подход, основанный на выделении поверхностей разрыва сплошности материалов, который, так или иначе, связан с модификацией первоначальной расчетной сетки, т.е. с формированием новой свободной поверхности. В этом направлении можно отметить несколько предложенных численных методов. Одни методы основаны на локальной перестройке сетки в области разрушения, другие - на расщеплении расчетных узлов в предположении заранее известной свободной поверхности (т.е. введение линии сдвоенных узлов), третьи - на расщеплении узлов с автоматической перестройкой свободной поверхности с введением дополнительных узлов. Данные методы применялись для решения модельных задач с простой компоновкой и геометрией взаимодействующих тел и, естественно, они мало пригодны для моделирования перспективных ударостойких защит, которые, как правило, являются структурно-неоднородными, а именно, многослойными, наполненными высокопрочной керамикой, армированные вольфрамом или ураном и т.д. Современные высокоэффективные поражающие элементы также представляют из себя неоднородные конструкции сложной формы.

Таким образом, актуальность темы исследований обусловлена тем, что в настоящее время существует потребность в создании численного метода и соответствующего программного комплекса, позволяющего моделировать высокоскоростное деформирование и фрагментарное разрушение материала. Другими словами, в методе расчете должна быть заложена возможность выделения поверхностей разрыва сплошности материала, а также возможность отслеживать контактные и свободные поверхности, как имеющиеся в начальный момент времени, так и образующиеся в процессе деформирования и разрушения. Выполнение этих условий имеет особое значение при решении многоконтактных динамических задач механики твердого тела.

**Целью** диссертационной работы является разработка средств математического моделирования и проведение с их помощью численных исследований по выяснению механизмов и основных закономерностей процессов деформирования и разрушения неоднородных материалов и конструкций при ударном и взрывном нагружении в широком диапазоне начальных условий.

**Научная новизна** работы заключается в том, что на основе предложенного подхода разработана новая модификация метода численного моделирования процессов высокоскоростного деформирования и разрушения твердых тел, явно учитывающая фрагментацию и позволяющая моделировать нагружение структурно-неоднородных материалов. Получены новые результаты при решении ряда многоконтактных задач удара и взрыва.

**Практическая значимость** работы. Созданные средства математического моделирования могут быть полезны при проведении фундаментальных и прикладных исследований. В плане фундаментальных НИР использование предложенного подхода позволяет выяснять механизмы и закономерности процесса высокоскоростного деформирования и разрушения конструкционных материалов и, кроме того, получать результаты в недоступной для эксперимента области начальных условий. В плане прикладных исследований (НИОКР), а также при проведении комплексного рационального проектирования реализуется возможность прогнозировать поведение перспективных ударостойких защит гражданских и военных объектов и техники для облегчения поиска оптимального варианта, как защитной конструкции, так и пора-

жающего элемента. Полученные результаты численных исследований по пробитию преград комбинированными ударниками, по ударному нагружению слоисто-скрепленных и градиентных преград имеют особую значимость при выработке практических рекомендаций по поиску путей повышения ударной стойкости защит и эффективности действия поражающих элементов. Результаты решения задач о взрывном нагружении льда могут использоваться как в военных, так и в гражданских целях.

Результаты работы нашли свое отражение более чем в ста отчетах по важнейшим НИР, заказчиками которых выступали центральные НИИ и КБ ведущих отраслей промышленности. Это ЦНИИХМ, НПО «Алтай», НПО «Союз», ВНИИСтали, ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова, ЦНИИТочМаш, ФГУП НПО «Астрофизика», НТК Сухопутных войск МО, СПП при президиуме РАН и др.

Диссертационная работа выполнялась при финансировании по программе Минобразования РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 годы)», проект РНП 2.1.2.2398 и поддержке грантов РФФИ (проекты № 05-08-01196, № 06-08-00903 и № 07-08-00623).

**Достоверность результатов** численного моделирования подтверждена и установлена корректностью физико-математической постановки и решением ряда тестовых задач, результаты которых сравнивались с аналитическим решением Ренкина – Гюгонио и экспериментальными данными. Рассмотрены задачи об ударе цилиндра по жесткой стенке, о пробитии ударником однородных и слоисто-разнесенных преград и о глубоком внедрении удлиненных ударников различной формы в полубесконечные преграды.

Совокупность полученных в работе результатов можно квалифицировать как новое крупное научное достижение в развитии математического моделирования процессов деформирования и разрушения неоднородных материалов и конструкций при ударе и взрыве.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Подход к описанию разрушения материала при ударе и взрыве, учитывающий образование новых контактных и свободных поверхностей.

2. Математическая модель высокоскоростного деформирования неоднородных материалов, учитывающая релаксацию сдвиговых напряжений, а также фрагментарное разрушение отрывного и сдвигового характера.

3. Модификация лагранжевого метода, в явном виде учитывающая фрагментарное разрушение материалов по отрывному и сдвиговому типу при ударном и взрывном нагружении.

4. Методика компьютерного моделирования и программный комплекс, позволяющие исследовать процессы высокоскоростного деформирования и разрушения материалов, в том числе глубокого внедрения ударников и сквозного пробития преград с возможностью выделения поверхностей разрыва сплошности материала.

5. Результаты численных исследований динамики пробития преград комбинированными ударниками различной формы и компоновки, в том числе наполненными ВВ.

6. Результаты численных исследований процесса взаимодействия компактных и удлиненных ударников со слоисто-скрепленными и функционально-градиентными преградами.

7. Результаты исследований динамики поведения льда при ударном и взрывном нагружении.

**Личное участие автора** в получении результатов заключается в разработке подхода к описанию разрушения материала при ударе и взрыве, математической модели высокоскоростного деформирования материалов, модификации лагранжевого метода для решения многоконтактных задач удара, алгоритмов и методик, а также в постановке задач, в проведении расчетов и анализе результатов.

**Апробация работы:** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

Всесоюзная школа-семинар по механике деформируемого твердого тела, (Куйбышев, 1978); VII Всесоюзная конференция по прочности и пластичности, (Горький, 1978); I Всесоюзное совещание по детонации, (Черноголовка, 1978); III Всесоюзный симпозиум по импульсным давлениям, (Менделеево, 1979); I Всесоюзный симпозиум по макроскопической кинетике и химической газодинамике, (Черноголовка, 1984); III Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике, (Алма-Ата, 1984); III Всесоюзное совещание по детонации, (Таллин, 1985); I Всесоюзное совещание. «Вопросы физики и газодинамики ударных волн», (Москва, 1988); Конференция по численным методам решения задач, (Новосибирск, 1995); Совещание по физике ударных волн, (Санкт-Петербург, 1993); Международная конференция по судостроению, (Санкт-Петербург, 1994); Международная конференция посвященная академику Н.Н. Яненко, (Новосибирск, 1996); Международная конференция «Сопряженные задачи физической механики и экологии», (Томск, 1996); Международная конференция «Всесибирские чтения по математике и механике», (Томск, 1997); Всероссийская научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», (Томск, 2000, 2001, 2004, 2006, 2008); IV Школа-семинар «Физика взрыва и применение взрыва в физическом эксперименте», (Новосибирск, 2003); III Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, (Алма-Ата, 1984); Всероссийская научно-техническая конференция «Механика летательных аппаратов и современные материалы» (Томск, 1998,1999); Международная конференция «Вычислительные и информационные технологи в науке, технике, образовании», (Алма-Ата, 2002); IX Всероссийская научно-техническая конференция «Физика и химия высокоэнергетических систем», Томск, 2003; Всероссийская научная конференция «Наука. Техника. Инновации 2004», (Новосибирск, 2004); IV Школа-семинар «Физика взрыва и применение взрыва в физическом эксперименте», (Новосибирск, 2003); Международная конференция «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» (ВИТ-2003), (Усть-Каменогорск, 2003); Научная конференции Волжского регионального центра РАРАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения», (Саров, 2000, 2002, 2004, 2006); Зимняя школа РФЯЦ-ВНИИТФ «Физика экстремальных состояний и процессов», (Снежинск, 2004); Научная сессия молодых ученых научно-образовательного центра «Физика и химия высокоэнергетических систем», (Томск, 2004); Всероссийская научная конференция «Наука. Техника. Инновации 2004», (Новосибирск, 2004); Всероссийская конференция МИФИ-2004 «Молодежь и наука», (Москва, 2004); XI Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии», (Томск, 2005); Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы авиации и космонавтики», (Красноярск, 2005); VI Всероссийская научно-

техническая конфренция «Наука. Промышленность. Оборона 2005», (Новосибирск, 2005); V Всероссийская школа-семинар «Новые материалы. Создание. Структура. Свойства», (Томск, 2005); V Международная конференция по внутрекамерным процессам и горению в установках на твердом топливе и ствольных системах ICOC'2005, (Москва, 2005); VIII Международная конференция «Забабахинские научные чтения», (Снежинск, 2005); Всероссийская научная конференция «Наука. Техника. Инновации 2005», (Новосибирск, 2005); XII Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии», (Томск, 2006); VII Всероссийская научно-техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона 2006», (Новосибирск, 2006); III Международная конференция «Перспективы развития фундаментальных наук», (Томск, 2006); Международная школа-семинар «Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем», (Санкт-Петербург, 2006); IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, (Нижний Новгород, 2006); Международная конференция «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» (ВИТ-2006), (Павлодар, 2006); XI Международная научная конференция, посвященная памяти генеральногоконструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева, (Красноярск, 2007); Всероссийская конференция «Проблемы механики сплошных сред и физики взрыва», посвященная 50-летию института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, (Новосибирск, 2007); Международная конференция «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» (ВИТ-2008), (Алма-Ата, 2008).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано более 80 научных работ.

**Структура и объем работы** Диссертационная работа содержит 238 страниц и состоит из введения, восьми разделов, заключения, списка используемой литературы, приложения; содержит 102 рисунка, 18 таблиц, библиографический список из 194 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы проводимых исследований. Сформулированы цель работы, научная новизна и практическая значимость. Приведены сведения о достоверности результатов работы, ее апробации, личном вкладе и публикациях автора. Изложены основные положения, выносимые на защиту, описаны структура и объем работы. Дано краткое содержание диссертации.

**В первом разделе** приводится основная система уравнений механики сплошных сред и определяющие соотношения, описывающие поведение рассматриваемых материалов в рамках сжимаемой, упругопластической модели с учетом разрушения. Компоненты девиатора тензора напряжений находятся по модели, основанной на уравнениях Прандтля – Рейса при условии текучести Мизеса. Для учета вязкопластических свойств материала используется модель с релаксацией сдвиговых напряжений. Определяющие соотношения дополняются уравнениями, характеризующими поведение микроповреждений в виде микропор сферической формы, способных при определенных условиях развиваться в микротрещины. При расчете разрушений учтено их образование, как по отрывному, так и по сдвиговому механизму.

Считается, что рассматриваемая среда сжимаема, изотропна, отсутствуют массовые силы, внутренние источники тепла и теплопроводность. В этом случае система уравнений для описания деформаций такой среды включает уравнения неразрывности, движения, энергии:

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

где $\rho$ – плотность вещества; $v_i$ - компоненты вектора скорости; $\sigma_{ij}$, $\varepsilon_{ij}, e_{ij}$ - компоненты тензоров напряжений, деформаций и скоростей деформаций; $\varepsilon$ - удельная внутренняя энергия.

Тензор напряжения разбивается на девиаторную и шаровую составляющие:

$$\sigma_{ij}=S_{ij}-P\delta_{ij}, \tag{2}$$

где $\delta_{ij}$ - символ Кронекера, $P$ - давление, $S_{ij}$ - компоненты девиатора тензора напряжений.

Для идеальной упругопластической модели поведение материала задается определяющими уравнениями Прандтля – Рейса при условии текучести Мизеса:

$$\begin{aligned}
&2\mu\left(e_{ij}-\frac{1}{3}e_{kk}\delta_{ij}\right)=\frac{DS_{ij}}{Dt}+\lambda S_{ij},\\
&\frac{DS_{ij}}{Dt}=\frac{dS_{ij}}{dt}-S_{ik}w_{jk}-S_{jk}w_{ik},\\
&2e_{ij}=\nabla_j v_i+\nabla_i v_j; \quad 2w_{ij}=\nabla_j v_i-\nabla_i v_j;\\
&3S_{ij}S_{ij}=2\sigma_T^2.
\end{aligned} \tag{1.3}$$

где $\mu$ - модуль сдвига; $\sigma_T$ – предел текучести материала; *D/Dt* – производная Яумана. Производная Яумана учитывает поворот элемента среды во время его перемещения. В упругой области множитель $\lambda \equiv 0$.

Для учета вязкопластических свойств материалов используется следующее соотношение:

$$2G(e_{ij}-\frac{1}{3}e_{kk}\delta_{ij})=\frac{DS_{ij}}{Dt}+2G\beta\phi(\frac{T_i}{T_0}-1)\frac{S_{ij}}{2T_i}, \tag{4}$$

$$T_i=\sqrt{\frac{S_{ij}S_{ij}}{2}}=\frac{\sigma_i}{\sqrt{3}}=\frac{\sigma_T}{\sqrt{3}},$$

где $\sigma_i, T_i$ - интенсивности напряжений и касательных напряжений, $\phi(T_i)$ - функция пластического течения, $T_0$ - статический предел текучести, $\beta$ - константа материала.

Если положить, что $\phi(T_i)$ - линейная функция, то получим:

$$2G(e_{ij}-\frac{1}{3}e_{kk}\delta_{ij})=\frac{DS_{ij}}{Dt}+2G(1-\frac{T_0}{T_i})\frac{S_{ij}}{\eta}, \tag{5}$$

$$\eta=2\frac{T_0}{\beta},$$

где $\eta$ - коэффициент вязкости, $G$ - модуль сдвига.

Вид функции $\phi(T_i)$ и значения коэффициента вязкости для ряда металлов определены путем моделирования плоской ударной волны.

Известно, что в материалах, подвергшихся большим пластическим деформациям, перед разрушением появляются поры приближенно сферической формы, в результате роста которых образуются магистральные трещины. В ряде работ развивается подход, согласно которому определяющие соотношения дополняются уравнениями, характеризующими усредненное поведение микроповреждений в виде микропор сферической формы, способных при определенных условиях развиваться в микротрещины.

Данный подход используется в настоящей работе в виду того, что он является наиболее рациональным и отражает физическую суть явления. В этом случае неоднородную пористую среду будем рассматривать как двухкомпонентный композиционный материал, состоящий из твердой фазы – матрицы и включений – пор. Кроме этого будем считать, что поры в материале матрицы распределены равномерно по всем направлениям.

Удельный объем пористой среды $V$ представим в виде суммы удельного объема пор $V_p$ и удельного объема матрицы $V_S$: $V = V_p + V_S$. Пористость материала можно охарактеризовать объемной долей пор ξ, либо параметром $\alpha$, равным отношению удельного объема пористого материала к удельному объему матричного материала. Параметры $\alpha$ и ξ связаны следующими соотношениями:

$$\alpha = \frac{V}{V_s} = \frac{V_p + V_s}{V_s}; \quad \xi = \frac{V_p}{V}; \quad \alpha = \frac{1}{1-\xi}; \quad \xi = 1 - \frac{1}{\alpha}.$$

Кинетическое уравнение (при $\Delta P > 0$), полученное из приближенного решения задачи о деформации сферической полости под действием приложенного давления, выбрано в виде:

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} &= -\frac{(\alpha_0 - 1)^{\frac{2}{3}}}{\eta} \alpha (\alpha - 1)^{\frac{1}{3}} \Delta P sign(P), \\ \Delta P &= |P| - \frac{a_s}{\alpha} \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1}. \end{aligned} \tag{6}$$

где $\alpha_0$, $a_s$, $\eta$ – константы материала.

Прочностные характеристики пористого материала определяются следующим образом:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_{Ts}}{\alpha}; \quad \mu = \mu_s (1 - \xi) \left( 1 - \frac{6K_s + 12\mu_s}{9K_s + 8\mu_s} \xi \right), \tag{7}$$

где $K_s$ – объемный модуль сжатия матрицы, $\mu_s$ – модуль сдвига матрицы.

Давление в пористой среде вычисляется по уравнению состояния для матрицы:

$$P = P_s(\alpha\rho, \varepsilon)/\alpha; \quad P_s = P_s(\rho_s, \varepsilon) \tag{8}$$

В настоящей работе используются уравнения состояния состояния Ми – Грюнайзена, Уолша, Осборна и Жукова.

Известно, что разрушение как хрупких, так и пластичных материалов при действии ударного нагружения может происходить по отрывному или сдвиговому механизму. Нередко в частном случае может доминировать один тип разрушения (например, при отколе). В целом, при решении прикладных задач необходимо учитывать оба типа разрушений. Механизм разрушения зависит от многих факторов:

прочностных свойств материала, скорости удара, формы ударника и относительных размеров ударника и мишени и т.д. Модель поведения среды, развиваемая в работе, предусматривает реализацию обоих механизмов разрушения.

Принято, что отрывные разрушения происходят при достижении главным растягивающим напряжением значения откольной прочности:

$$\sigma_1 > \sigma_k , \tag{9}$$

либо при достижении пористостью предельного значения:

$$\xi \geq \xi^* . \tag{10}$$

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

При выполнении условия

$$A_p \geq A_P^* , \; A_p = \int_0^{t_*} dA_p = \int_0^{t_*} \frac{\sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^p}{\rho} \tag{11}$$

материал считается разрушенным по типу сдвига ( $A_p^*$ – критическое значение работы).

Для большинства рассматриваемых в работе материалов:

$\sigma_k$ = (0,02÷5,0) ГПа; $\xi^*$ = 0,30÷0,33; $A_p^*$ = (25 ÷200) кДж / кг.

Будем считать, что при выполнении одного из выше перечисленных условий в какой - либо точке среды в ее ближайшей окрестности образуется проходящая через данную точку контактная поверхность, которая в процессе деформирования может стать свободной поверхностью. Таким образом, при моделировании допускается появление новых свободных поверхностей, в том числе разделяющих рассматриваемое тело на отдельные фрагменты. Для отрывного разрушения ориентация трещин определяется согласно гипотезе о перпендикулярности ее плоскости максимальному главному растягивающему напряжению. Для сдвигового разрушения ориентация трещины определяется плоскостью действия максимальных касательных напряжений.

Замкнутая система уравнений (1)–(11), описывающая нестационарное движение сжимаемой упругопластической среды при начальных и граничных условиях для задач удара аналитически неразрешима. Для ее решения в работе используется численный метод Джонсона, в котором сочетаются идеи методов конечных элементов и конечных разностей. Далее рассматривается двумерный случай осевой и плоской симметрии.

Дифференциальные операторы в основной системе уравнений заменяются разностными аналогами на всей расчетной области, представляющей собой дискретную модель тела, состоящую из конечного числа связанных соответствующим образом в угловых точках треугольных элементов, испытывающих деформации и перемещения в продольных и поперечных направлениях. Масса каждого элемента равномерно распределена между тремя узлами, а масса сосредоточенная в i-том узле равна одной трети массы всех элементов, содержащих этот узел.

Компоненты скорости элементов выражаются через узловые величины в рамках линейной аппроксимации

$$u = \alpha_1 + \alpha_2 r + \alpha_3 z, \tag{12}$$
$$v = \alpha_4 + \alpha_5 r + \alpha_6 z,$$

$\alpha_K$ – константы, зависящие от геометрии элементов и скорости узлов.

Подставляя в (12) скорости и координаты узлов элемента с вершинами *i, j, m*, можно определить $\alpha_K$. В результате решения трех уравнений с тремя неизвестными получим для одной компоненты скорости

$$u = \frac{1}{2A_1}\left[(a_i + b_i r + c_i z)u_i + (a_j + b_j r + c_j z)u_j + (a_m + b_m r + c_m z)u_m\right] \qquad (13)$$

где $\alpha = r_j z_m - r_m z_j;\quad b_i = z_j - z_m;\quad c_j = r_m - r_j;\ A_1$ – площадь элемента.

Выражение для компоненты скорости $v$ получается циклической перестановкой индексов в (13). Компоненты тензора скоростей деформаций имеют вид:

$$e_{rr} = u_{,r}, e_{zz} = v_{,z}, e_{rz} = (u_{,r} + v_{,z})/2, e_{\theta\theta} = \overline{u}/\overline{r},$$

где $\overline{u}$ и $\overline{r}$ – среднее значение скоростей и радиусов трех узлов элемента.

Сосредоточенные узловые силы, статически эквивалентные распределенным напряжениям в элементах, определяются следующим образом:

$$F_r^i = -\pi\overline{r}[(z_j - z_m)\sigma_{rr} + (r_m - r_j)\sigma_{rz}] - 2\pi A\sigma_{\theta\theta}/3;$$

$$F_z^i = -\pi\overline{r}[(r_m - r_j)\sigma_{zz} + (z_j - z_m)\sigma_{rz}];$$

где $\overline{r}$ – среднее значение трех радиусов.

Ускорения *i*- го узла вычисляются из уравнения движения вида

$$\overline{M}^i \ddot{u} = \overline{F_r^i};\quad \overline{M}^i \ddot{v} = \overline{F_r^i};$$

где $\overline{F}_r^i, \overline{F}_z^i$ – результирующие векторы сил в *i*-м узле, действующие со стороны всех элементов, содержащих этот узел. $\overline{M^i}$ – масса, сосредоточенная в *i*-м глобальном узле.

Уравнения движения интегрируются в предположении, что ускорение постоянно на каждом временном шаге. Новое значение скорости на *n+1* временном шаге

$$u_i^{n+1} = u_i^n + \overset{g}{u}^{n+1/2}\Delta t$$

и, соответственно, новое значение координат

$$r^{n+1} = r^n + u_r^n \Delta t + \overset{g}{u}\Delta t/2.$$

При необходимости вычисления параметров процесса в узлах по их значениям в элементах используется следующая формула:

$$\overline{f}_i = \sum_{(j)} f_j \varphi_{ij},\ \sum_{(j)} \varphi_{ij} = 1,$$

где $\overline{f}_i$ – средневзвешенное значение параметра $f_j$ элемента для *i*-го узла, *j* – пробегает все номера элементов ассоциированных с узлом *i*, $\varphi_{ij}$ – весовая функция *j*-го элемента *I*-го узла. В тривиальном случае $\varphi_{ij} = 1/N$, где *N* – число ассоциированных с узлом элементов.

Для более правильного и детального описания процессов пробития и проникания в методе численного решения должна быть заложена возможность выделения поверхностей разрыва сплошности материала. Существующие в настоящее время способы выделения таких поверхностей предполагают введение заранее линии сдвоенных узлов, либо используют локальную перестройку сетки, либо алгоритм расщепления узлов с автоматической перестройкой свободной поверхности. Данные

способы мало пригодны для моделирования разрушения современных ударников и преград при наличии разноплотных материалов и появлении ветвящихся разрывов.

В настоящей работе предложены и апробированы два варианта расщепления расчетных узлов. В первом варианте в каждом расчетном элементе вычисляются главные растягивающие напряжения. При выполнении условия разрушения (9) или (10) вычисляется главная площадка, которая переносится параллельно из центра рассматриваемой ячейки в ближайший к ней узел. Затем данный узел расщепляется в направлении плоскости этой площадки. Если вычисленная площадка не совпадает со сторонами ассоциированных элементов, то направление расщепления выбирается по сторонам, соединяющим ближайшие к площадке узлы сетки. При выполнении критерия разрушения (11), рассматриваемый узел расщепляется по прямой, лежащей в плоскости действия максимальных касательных напряжений.

Схема расщепления расчетного узла, основанная на критерии главного растягивающего напряжения, применительно для разбивки типа «конверт» изображена на рис. 12а-б. Здесь $\vec{l}$ и $\vec{n}$ обозначают направляющую к площадке и нормаль к ней, вдоль которой действует запредельное отрывное напряжение. Буквами A – E обозначены узлы элементов ***1, 2, 3, 4***. В элементах с более темной заливкой предполагается большая величина отрывных напряжений. Критерий расщепления выполнился в элементе ***3***.

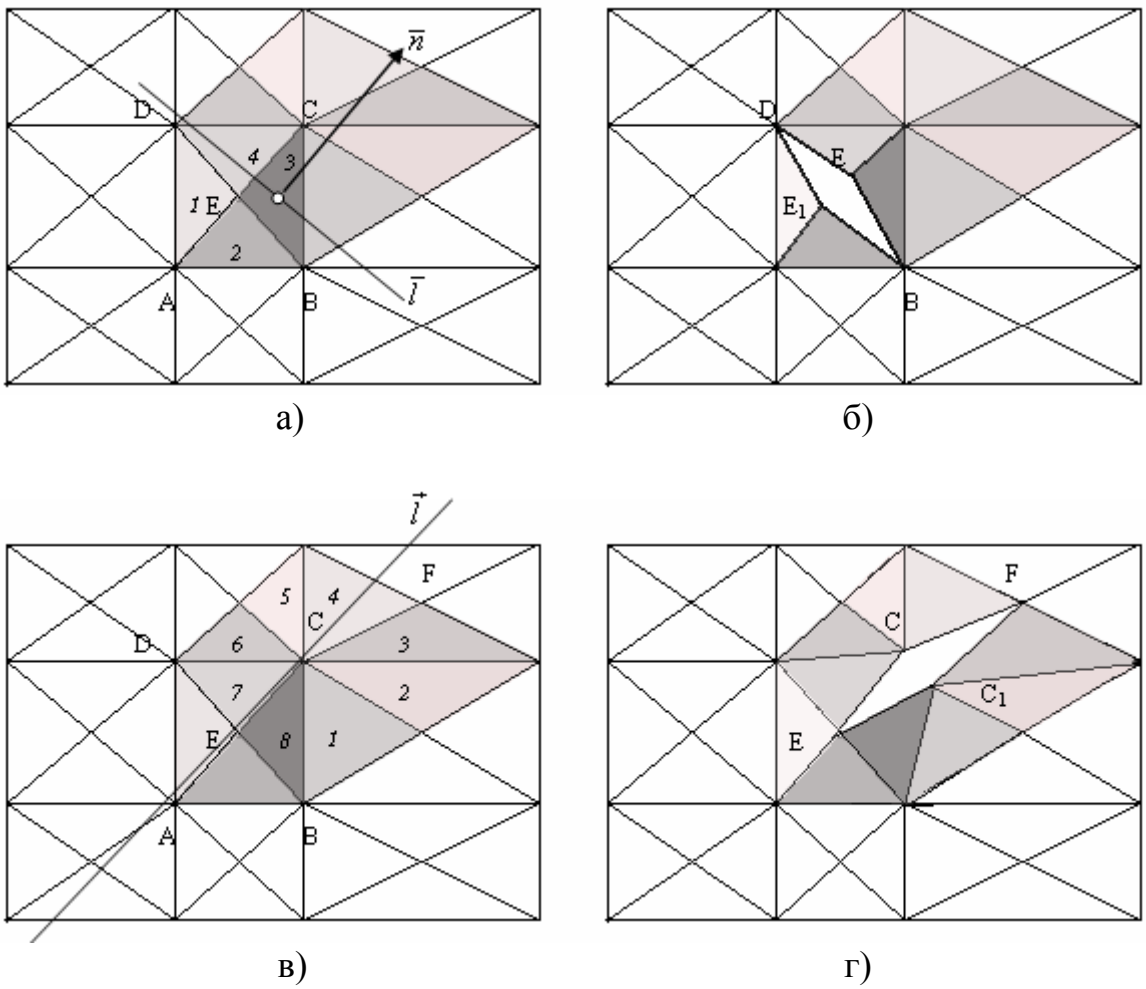



Рис. 1. Способы расщепления расчетных узлов

Ближайший к прямой $\vec{l}$ и принадлежащий треугольному элементу ***3*** узел ‘E’, ближайшие к прямой $\vec{l}$ и соседние к ‘E’ узлы ‘D’ и ‘B’. Расщепление происходит по линии DEB. После расщепление узла ‘E’ образуются узлы ‘E’ и ‘$E^1$’. Расщепление расчетного узла, основанное на критерии (11) происходит аналогичным образом, только в этом случае узел расщепляется вдоль площадки с максимальным касательным напряжением. В результате этих действий появляются новые узлы, координаты и скорости которых прежние, а масса и другие параметры, вычисляемые через элементы, перевычисляются.

Очевидно, что при расщеплении узла необходимо не только выполнение условия превышения выбранным критерием предельного значения, но и определение направления распространения трещины. В случае силового, точечного критерия естественно в качестве направляющей трещины использовать нормальные или касательные направления к вектору, вдоль которого действует силовой параметр, выбранный в качестве критерия разрушения. Например, если в качестве критерия разрушения выбраны значения главных напряжений, то направлением распространения откольной трещины будет направление площадки нормальной к максимальному растягивающему напряжению, а направлением сдвиговой трещины – площадки вдоль максимальных касательных напряжений.

В случае применения объемного критерия разрушения нет безусловно связанного с ним векторного параметра. Поэтому для объемных критериев, таких как уровень поврежденности (пористость) или удельная работа сдвиговых пластических деформаций предложен градиентный способ локализации трещин, суть которого заключается в следующем.

В каждом элементе на каждом временном шаге вычисляется значение использованного критерия разрушения. В случае его выполнения из всех соседних элементов выбирается элемент, имеющий значение критерия, минимально отличающееся от критического. Прямая, соединяющая центры данных элементов, переносится параллельно в ближайший узел, который затем расщепляется в направлении этой прямой. Если направление полученной прямой не совпадает со сторонами ассоциированных элементов, то линии расщепления выбираются по прямым, соединяющим ближайшие к выбранному направлению узлы сетки.

Схема, иллюстрирующая этот способ расщепления, изображена на рис.1в и рис.1г. Предположим, что критерий разрушения выполнился в элементе 7, а элемент 4 имеет минимально отличающееся значения критерия. Направляющая расщепления $l$ будет прямая, проходящая через узел C. Ближайшие к прямой $l$ узлы F и E. Расщепление узла C происходит по линии ECF.

Следует отметить, что градиентный способ расщепления расчетных узлов применим как для объемных, так и для силовых критериев разрушения.

Расщепляясь, узлы образуют локальные трещины, которые располагаются произвольно относительно друг друга, скрещиваются под разными углами и не обязательно образуют магистральную трещину. Вследствие этого целые фрагменты соударяющихся тел могут иметь лишь один общий узел, не имея при этом ни одной общей стороны, что создает нереальную картину взаимодействия. Поэтому локальные трещины обрабатываются специальным алгоритмом, который отслеживает магистральную трещину, производя, в случае необходимости, дополнительное расщепление узлов.

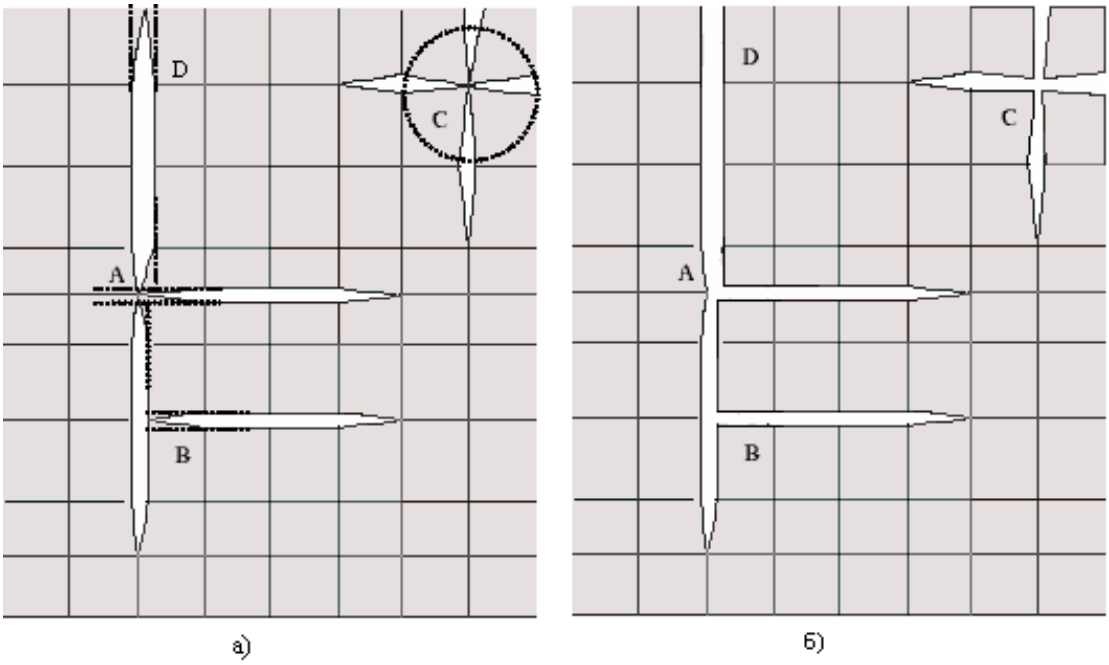



Рис.2 – Обработка локальных трещин
а) – ситуация до обработки, б) – после обработки

Действие этого алгоритма иллюстрируется на рис. 2. На рис 2а показаны некоторые из возможных вариантов, подлежащих дополнительной обработке. Так, в точке А сходятся три трещины, в точке В – две, в точке D трещина не выходит на свободную поверхность, а в точке С сходятся в одном узле четыре фрагмента, так как в соответствующих узлах не выполнился примененный критерий разрушения. Нефизичность такой картины очевидна, и поэтому производится дополнительное расщепление узлов изображенных на рисунке. На рис. 2б изображена расчетная конфигурация после обработки алгоритмом, отыскивающим и расщепляющим такие узлы.

В вычислительных программах, основанных на лагранжевых методах, часто возникают трудности, вызванные большими дисторсиями расчетных элементов (ячеек). В этом случае шаг по времени уменьшается, что приводит к резкому уменьшению производительности программы, а при дальнейшем уменьшении площади элемента, счет становится невозможным.С целью преодоления такой трудности на свободных и контактных поверхностях вводится механизм разрушения расчетных элементов подобно эрозионному процессу. Критерием эрозии выбрана эквивалентная пластическая деформация $\varepsilon_i^p = 0.5\sqrt{\varepsilon_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p}$. Если в одном из элементов выполняется критерий, то он удаляется из счета, а свободная и контактная поверхность автоматически перестраиваются. При этом масса удаленного элемента сохраняется в ассоциированных с ним узлах, импульс которых консервативен. Свободные узлы, т.е. узлы, не имеющие ассоциированных элементов, также консервативны по массе и импульсу и подобно другим граничным узлам участвуют в вычислениях.

Следует отметить, что описанная выше расчетная часть модели разрушения не привязана жестко к какому-либо критерию. Основным требованием в выборе критерия разрушения является класс рассматриваемых задач, а также безусловное соответствие физике процесса и математической постановке задачи.

Полностью весь процесс вычислений, можно представить в виде следующей последовательности:

1. Задание геометрии тел, начальных и граничных условий;

2. Определение параметров узлов (координаты, скорости) и элементов (площадь, напряжения, энергия);
3. Вычисление шага интегрирования по условию Куранта;
4. Вычисление скоростей деформаций;
5. Обработка контактных поверхностей (скольжение, слипание);
6. Вычисление новых параметров элементов: площадь, плотность, напряжения, энергия;
7. Вычисление сосредоточенных сил в узлах элементах;
8. Вычисление новых значений скоростей узлов и координат;
9. Расчет границ;
10. Проверка выполнения критериев разрушения. В случае выполнения – введение дополнительных узлов и удаление элементов;
11. Корректировка граничных условий для новой конфигурации рассчитываемых областей;
12. Проверка выполнения условия сохранения замкнутой системой ее полной энергии и массы;
13. Проверка критерия окончания счета, который может задаваться как время процесса, время счета, глубина внедрения ударника, его скорость и т.д.

Вышеописанный порядок вычислений реализован в программном комплексе, состоящем из следующих программ:

1. Ввода и обработки данных;
2. Счета параметров процесса;
3. Пересчета расчетных областей, контактных и свободных поверхностей;
4. Визуализации и мониторинга моделируемого процесса;
5. Графической и табличной обработки результатов.

**Второй раздел** посвящен тестовым расчетам, которые направлены на проверку, как качества самого решения, так и заложенной в программном комплексе модели среды. Достоверность результатов численного моделирования устанавливалась путем сравнения их с экспериментальными данными и решением ряда тестовых задач.

Сравнивались значения скорости и амплитуды ударной волны, полученные по аналитическим соотношениям Ренкина – Гюгонио и по численной методике. Рассмотрены более десяти материалов с различными ФМХ. Во всех случаях расхождение не превышало 0,2%. Кроме этого, осуществлялся контроль за сохранением энергии системы. На решении задачи о фронтальном соударении двух стальных цилиндров показано выполнение универсального принципа симметрии относительно контактной поверхности и относительно оси взаимодействующих тел.

Результаты моделирования удара цилиндра по жесткой стенке, пробития стальным шариком однородных и двухслойных преград (рис. 3) и внедрения ударников с оживальной головной частью (ОГЧ) в полубесконечные преграды сравнивались с экспериментальными данными, полученными на баллистическом стенде НИИ ПММ ТГУ. Расчеты проводились в диапазоне начальных скоростей от 161 до 1031 м/с. В качестве ударников были выбраны однородные цилиндры, стальные шарик, сердечники пуль 6,1 Smk (Германия) и Б32 (Россия). Получено хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных, что указывает на перспективность применения предлагаемой методики численного моделирования для решения задач

удара. Проведен численный эксперимент по исследованию формообразования откольной тарелочки при срабатывании силового и объемного критериев разрушения.

С целью проверки работы методики в диапазоне высоких скоростей проводился расчет высокоскоростного удара стального сферического ударника диаметром 10 мм по стальной плите толщиной 2 мм со скоростью 4500 м/с. Сравнение с экспериментом проводилось по форме и распределению осевых скоростей частиц и осколочного облака. Кроме того решена задача о проникании в стальную «полубесконечную» преграду с начальной скоростью $V_0$=2580 м/с сплошного вольфрамового цилиндра и сегментированного, состоящего из пяти компактных цилиндров, разнесенных на величину калибра (рис. 4). Расхождение с экспериментом составило 7%. На рис.5 приведены результаты моделирования процесса взаимодействия компактного ударника с преградой из сплава Д16.

Таблица 1 – Запреградные скорости ударников

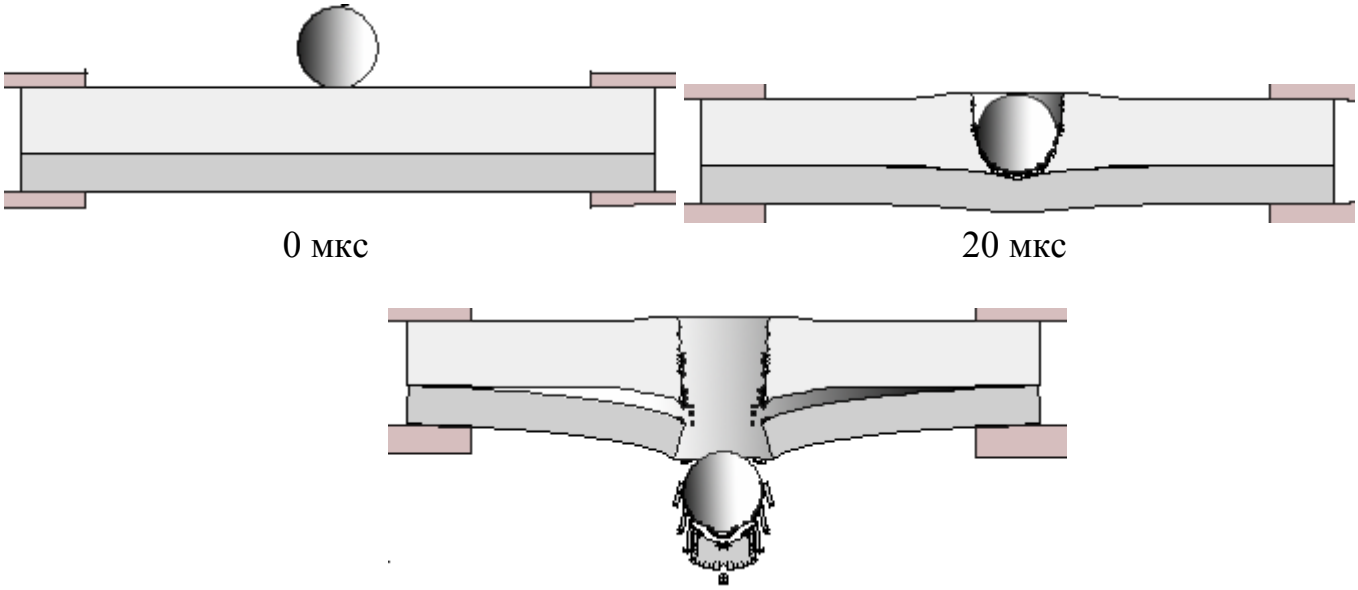
| Тип материала преграды | $V_0$ (м/с) | $V_р$ (м/с) | $V_э$ (м/с) |
|---|---|---|---|
| Стеклотекстолит, $h$ = 10,5 мм | 373 | 187 | 191 |
| | 562 | 412 | 402 |
| | 650 | 483 | 491 |
| | 728 | 602 | 576 |
| Алюминиевый сплав Д16, $h$ = 6 мм | 287 | 156 | 147 |
| | 460 | 309 | 312 |
| | 554 | 395 | 387 |
| | 810 | 670 | 644 |
| Стеклотекстолит + Д16, $h$ = (10,5+6) мм | 557 | 83,5 | 80,9 |
| | 634 | 246 | 241 |
| | 680 | 321 | 315 |
| | 932 | 615 | 593 |

*Примечание. В таблице приняты следующие обозначения: $V_0$ – начальная скорость ударника; $V_р$ – рассчитанная запреградная скорость ударника; $V_э$ – скорость ударника, зафиксированная в эксперименте; h – начальная толщина преграды.*

Таблица 2 – Значения расчетных и экспериментальных глубин внедрения ударников

| Преграда | Ударник | $V_0$ (м/с) | $L_р$ (мм) | $L_э$ (мм) |
|---|---|---|---|---|
| АмГ-6 | 6,1Б32 | 336 | 13,4 | 13,8 |
| АмГ-6 | 6,1Б32 | 432 | 18,8 | 19,2 |
| АЛ102 | 6,1Б32 | 592 | 22,9 | 24,0 |
| АЛ102 | 6,1Б32 | 630 | 25,1 | 26,0 |
| АмГ-6 | 6,1Smk | 536 | 15,6 | 15,3 |
| АмГ-6 | 6,1Smk | 825 | 27,7 | 28,4 |
| АмГ-6 | 6,1Smk | 647 | 18,9 | 19,4 |
| АмГ-6 | 6,1Smk | 1031 | 36,0 | 37,8 |

*Примечание. В таблице приняты следующие обозначения: $V_0$ – начальная скорость ударника; $L_р$ – рассчитанная глубина внедрения ударника; $L_э$ – глубина ударника, зафиксированная в эксперименте.*



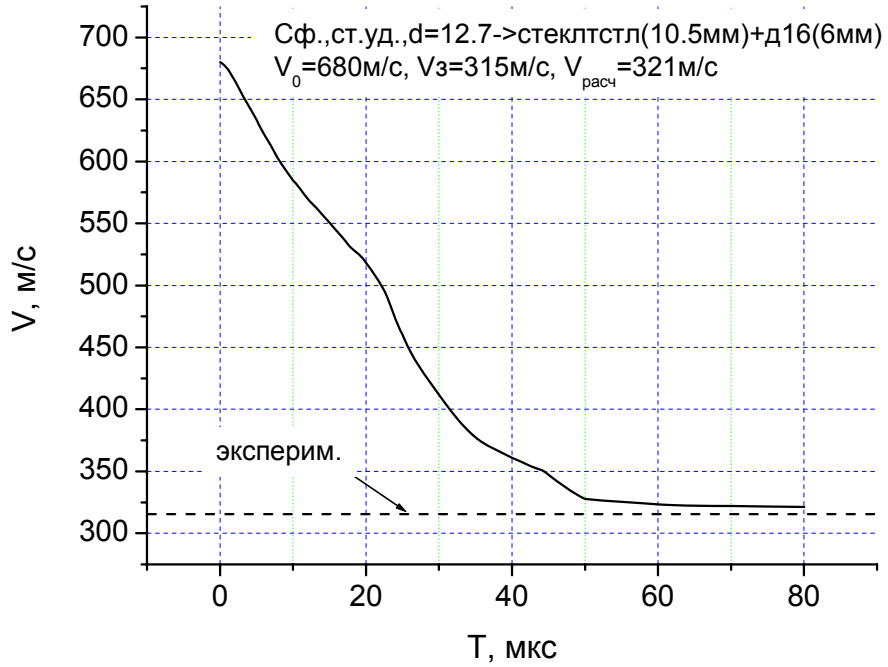




Рисунок 3. Пробитие стальным ударником слоистой преграды (стеклотекстолит + Д16).

*Примечание. Толщина преграды h = (10.5 + 6) мм. $V_0$ = 680 м/с, запреградная расчетная скорость Vз.расч. = 321 м/с, экспериментальная Vз.эксп. = 315 м/с. На графике изображено изменение скорости ц. масс ударника. Экспериментальные данные взяты из отчета о НИР «Создание методов прогнозирования стойкости бронепреград различного состава», шифр «Ибрис» - (заключительный)//НИИ ПММ при ТГУ. Регистрационный номер 1601743, Томск, 2001 г.*

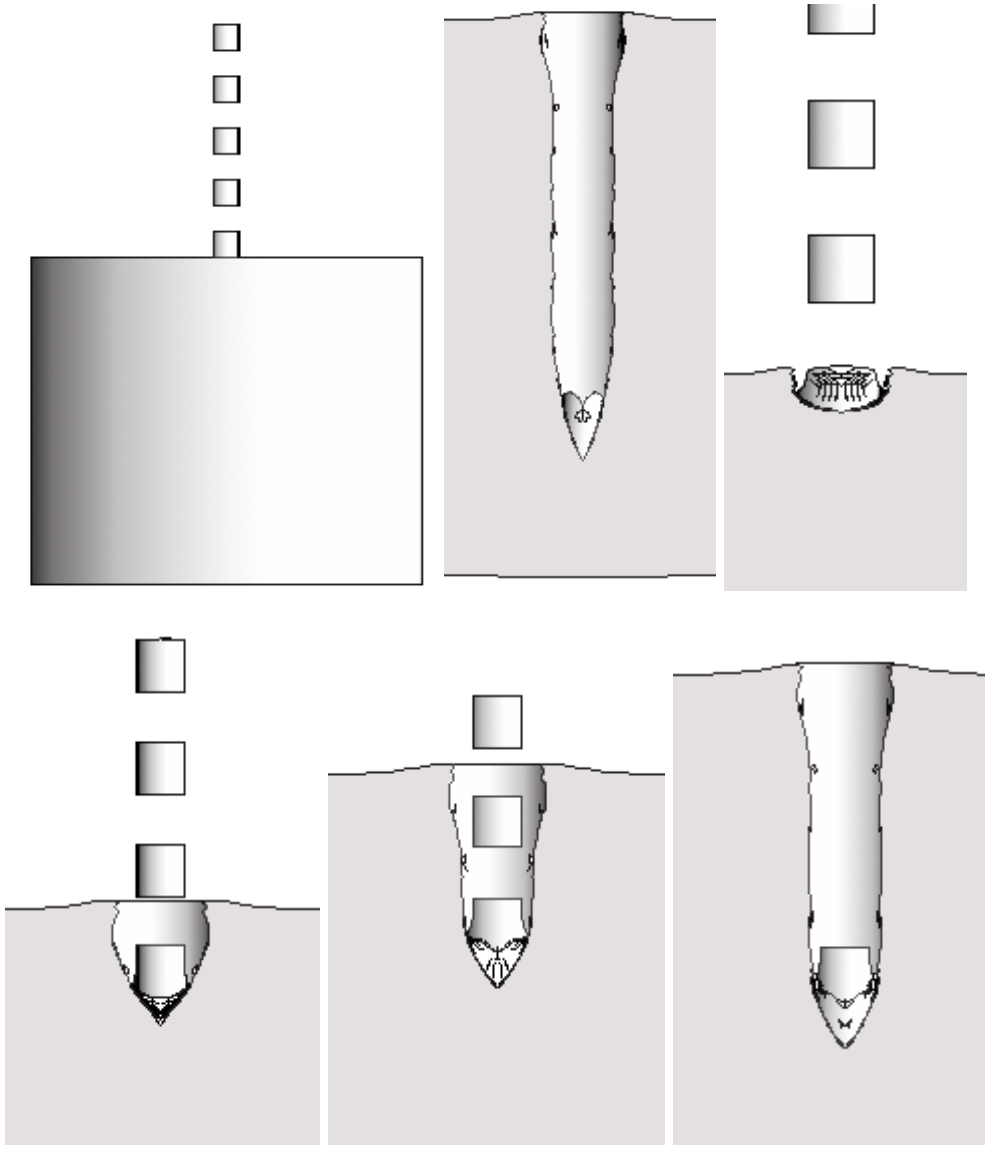
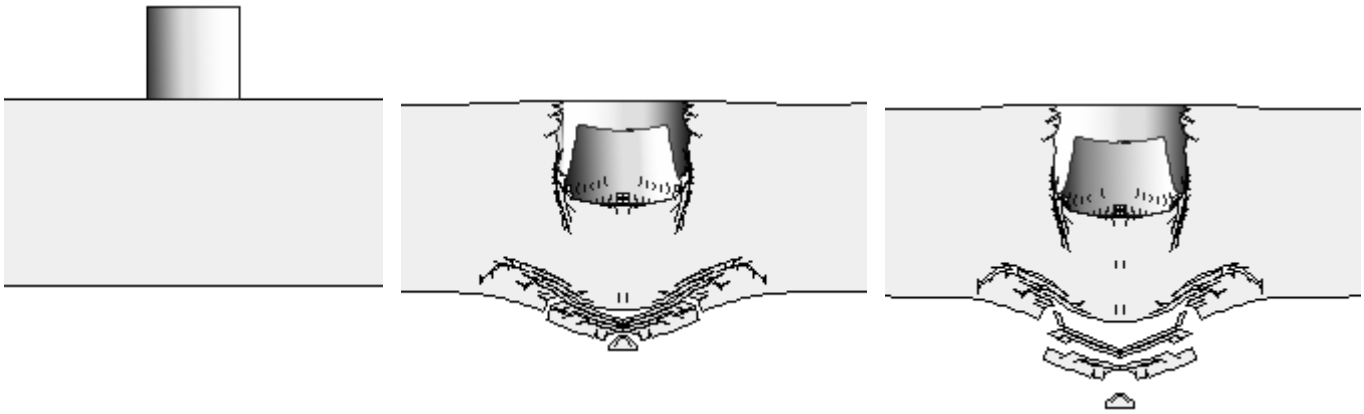
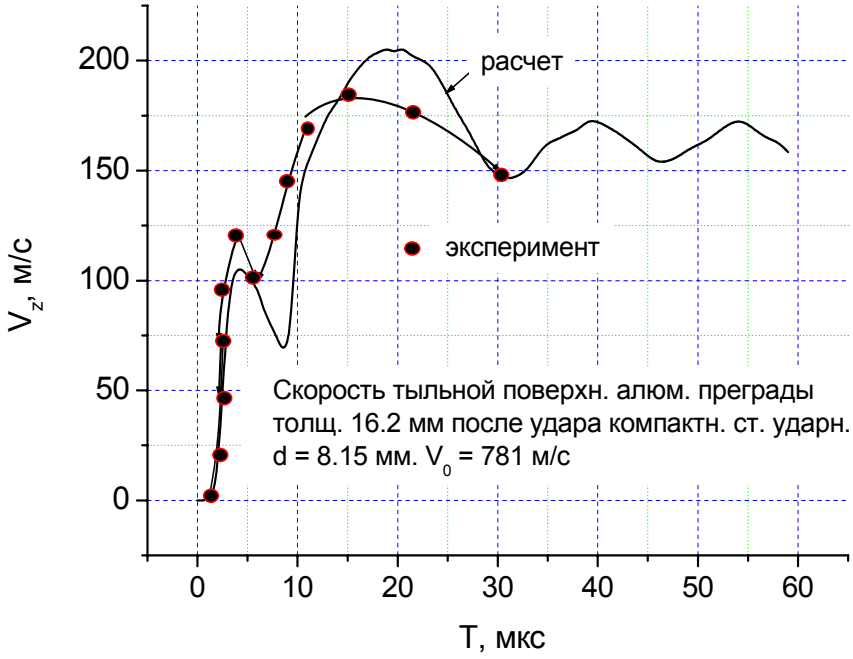


Рисунок 4 –Взаимодействие вольфрамового сегментированного ударника диаметром $d$ = 5,54 мм со стальной плитой

*Примечание. Отношение длина/диаметр l/d= 5, начальная скорость $V_0$ = 2580 м/с. Линейная пауза между сегментами d. Стальная преграда $S_d$ = 14 Кбар. Расчетная глубина внедрения $l_k$ = 55 мм, экспериментальная $l_k$ = 51 мм. Экспериментальные данные взяты из статьи "Hydrocode results for the penetration of continuous, segmented and hybrid rods compared with ballistic experiments". P.M.Holland, and etc. //Int. J. Impact Engng. Vol. 10. pp 241 – 250, 1990*



а) б) в)




г)

Рисунок 5 – Удар стального ударника по дюралевой преграде

*Примечание. $V_0$ = 781 м/с, диаметр ударника 8,15 мм, толщина пластины 16,2 мм. Экспериментальные данные В.В. Бельского и В.М. Захарова (НИИ ПММ)*

*а) – начальная конфигурация,*

*б) – рассчитанная конфигурация в момент времени 30 мкс,*

*в) – рассчитанная конфигурация в момент времени 50 мкс,*

*д) – зависимость скорости центра масс ударника от времени $V_c(t)$:*

**В третьем разделе** исследовался процесс пробития по нормали преград комбинированными ударниками. Конструктивно ударники являются телами вращения и состоят из трех элементов: стальной оболочки, свинцовой рубашки и стального сердечника. Диаметры и массы всех составных частей ударников равны. Внешний диаметр оболочки равен 9,25 мм, толщина – 0,5мм, масса 3,5 г., материал – мягкая сталь. Диаметр сердечников равен 7,4 мм, материал сталь У10А, масса 9,9г. Масса рубашки – 1,6 г. Скорость удара – 290 м/с. Материал преград: сплав Д16, сталь 3, высокопрочно сталь (ВПС), титан.

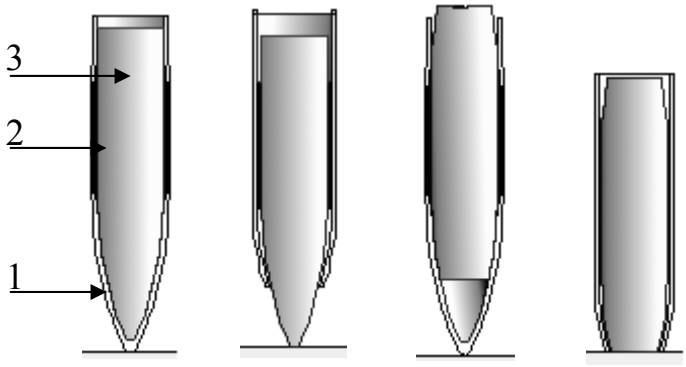



Рисунок 6. Начальные конфигурации ударников B1 – B4
1) – стальная оболочка, 2) – свинцовая рубашка, 3) – стальной сердечник

Рассмотрены четыре типа ударников: оболочечный с ОГЧ, полуоболочечный с ОГЧ, оболочный с ОГЧ с затупленным сердечником и оболочечный с плоской ГЧ.

При помощи разработанного программного комплекса исследовано влияние компоновки и формы ударника на его пробивное действие. Полученные результаты вычислений представлены в виде текущих конфигураций «ударник–мишень», зависимостей скорости центра масс и силы сопротивления внедрению ударников от времени. Сравнение результатов расчетов и экспериментов (табл. 3) показало, что расхождение не превышало 5%, за исключением одного варианта взаимодействия. Результаты вычислений в виде текущих конфигураций «ударник–мишень», представлены на рис.7 для преграды из сплава Д16 толщиной 4 мм. Характер процесса и его длительность, а также конечный результат для каждого типа ударников вполне определяется его компоновкой (рис. 8). Ударники B1 и B2 прокалывают материал преграды, т.е. по мере внедрения они раздвигают и уплотняют его вокруг головной части и одновременно вытесняют материал вначале на лицевую, а затем и тыльную стороны преграды. Ударники B3 и B4 перфорируют преграду, срезая в ней пробку, которая образуется вследствие запредельных для данного материала сдвиговых напряжений, возникающих по диаметру затупленной головной части. Во всех четырех случаях оболочка и рубашка снимаются с сердечника и остаются на лицевой стороне преграды. Везде, где пробка срезается, она движется с большей, чем ударник скоростью, поэтому расстояние между ударником и пробкой с течением времени увеличивается. Форма и остаточные размеры оболочки, сердечника и пробоины, полученные в расчетах и экспериментах, соответствуют друг другу.

Для выявления влияния материала сердечника на пробивное действие ударника смоделирован процесс взаимодействия ударников B1 и B4 с 4-х мм преградой из стали 3. В качестве материалов сердечников рассмотрены сталь 10, сталь У10А, свинец, уран, ВНЖ и золото. Выбор последних трех материалов продиктован соображением целесообразности сравнения механизмов действия ударников, с «тяжелыми» прочными (ВНЖ, U) и «тяжелыми» слабопрочными (Au) сердечниками. Рассчитанные текущие конфигурации «ударник–мишень» представлены на рис. 9 для ударника с урановым сердечником и преград из стали 3 толщиной 4 и 8 мм.

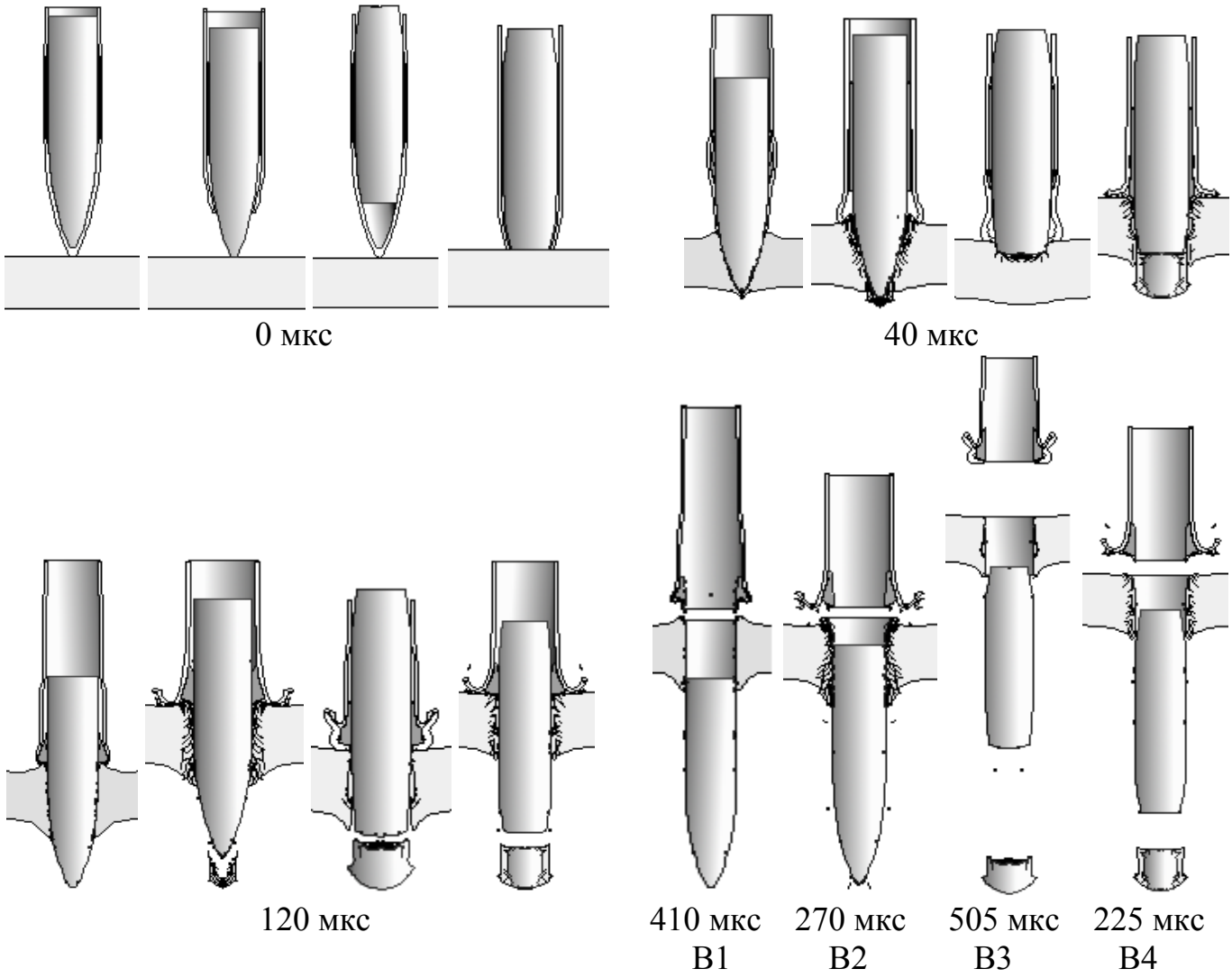
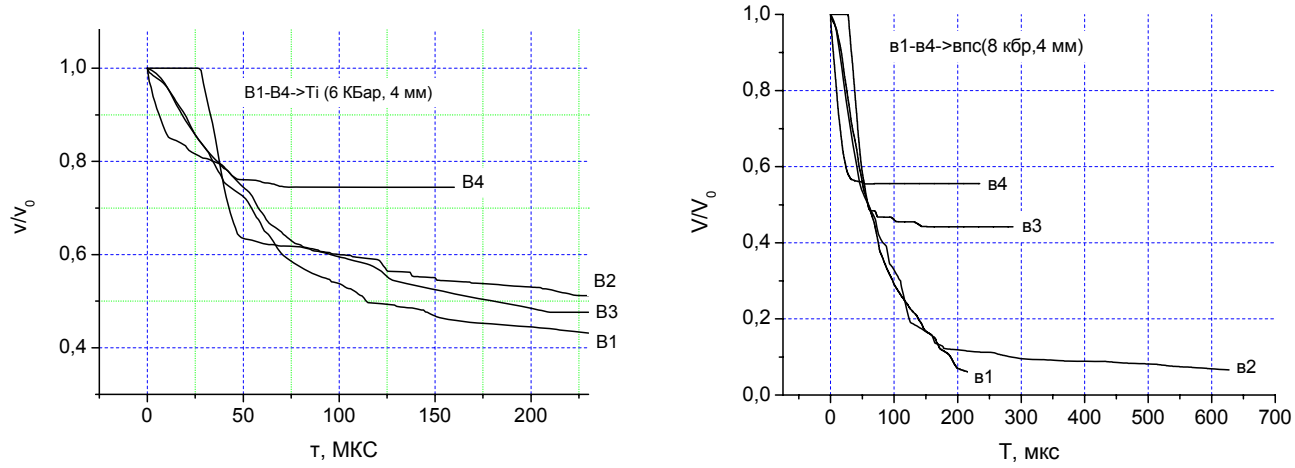



Рисунок 7. Взаимодействие ударников В1-В4 (сердечник стали У10А) с 8 мм дюралевой преградой

Таблица 3 – Запреградные скорости ударников В1-В4

| Преграда | | | Запреградная скорость [м/с] | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Д16 (4 мм) | Д16 (8мм) | Ст.3 (4 мм) | ВПС (4 мм) | Титан (4 мм) |
| Ударник | В1 | Расчет | 196 | 98 | 167 | 17* | 115 |
| | | Эксперимент | **190** | **95** | **166** | --- | --- |
| | В2 | Расчет | 232 | 131 | 182 | 19* | 148 |
| | | Эксперимент | **241** | **135** | **186** | **---** | **---** |
| | В3 | Расчет | 240 | 90 | 149 | 128 | 138 |
| | | Эксперимент | **216** | **87** | **147** | **---** | **---** |
| | В4 | Расчет | 253 | 169 | 182 | 161 | 216 |
| | | Эксперимент | **258** | **173** | **188** | **---** | **---** |

*Примечание. Значения скорости 17 м/с, помеченное *, зафиксировано на 220 мкс, а скорость 19 м/с на 630 мкс внедрения в преграду. Полного пробития преграды не было.*




а) б)

Рисунок 8. Графики относительных скоростей ударников В1-В4 (сердечник из стали У10А) при пробитии преград толщиной 4 мм из ВПС (а) и титана (б)

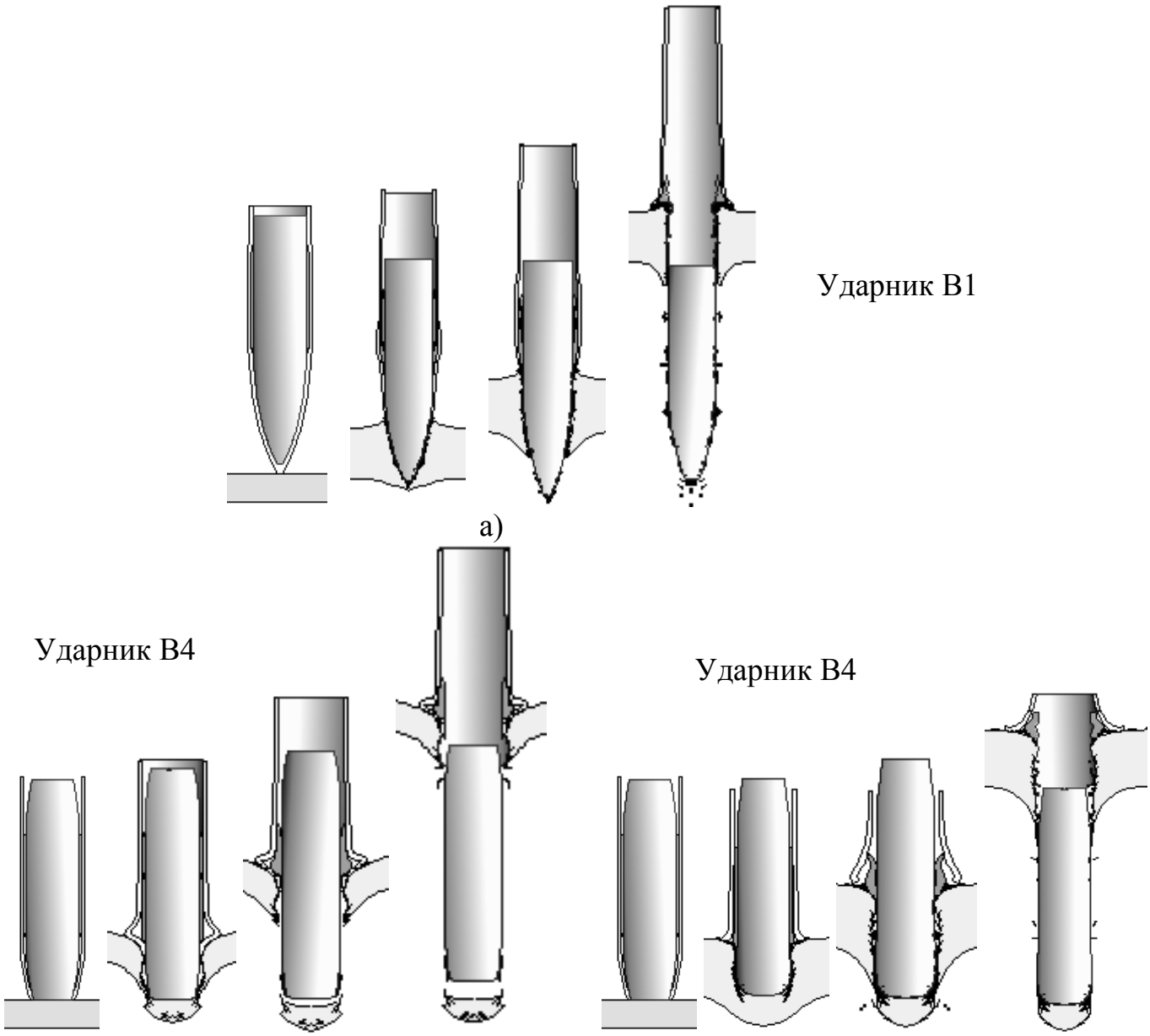
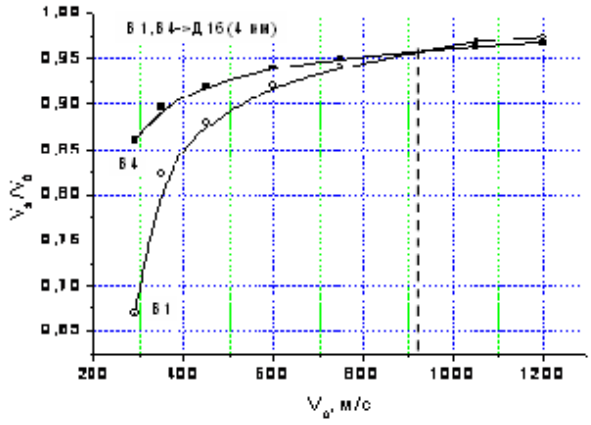


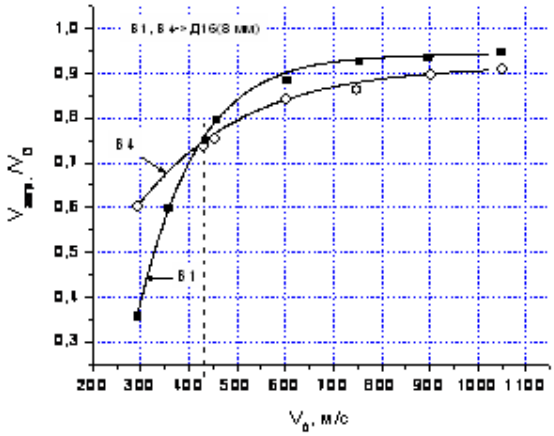

Рисунок 9. Взаимодействие ударников В1, В4 (урановый сердечник) с 4 и 8 мм преградами из Ст. 3

а) конфигурации «ударник–мишень» в 0, 40, 80, 200, 220 мкс;

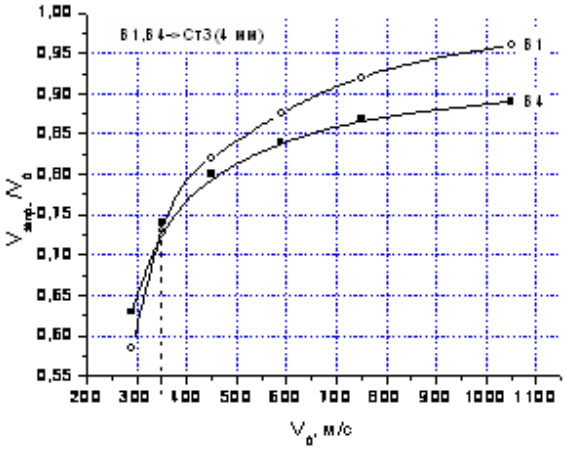
б) конфигурации «ударник–мишень» в 0, 40, 80, 160, 220 мкс.



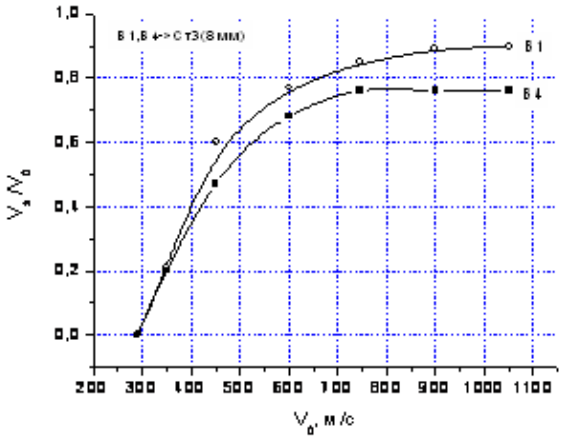

а)



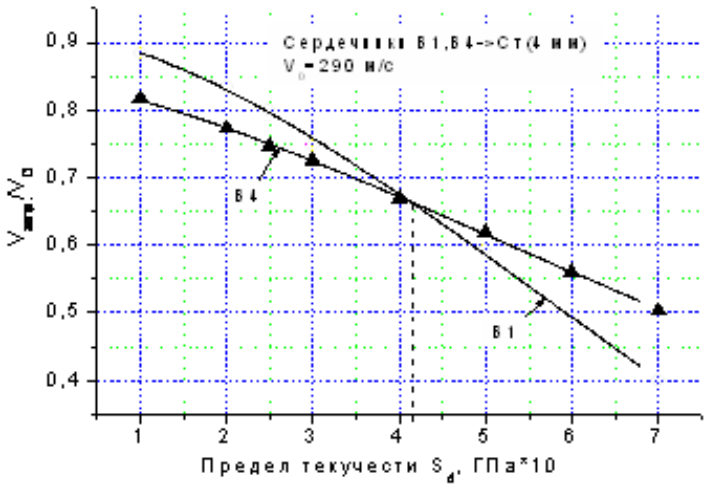

б)




в)




г)




д)

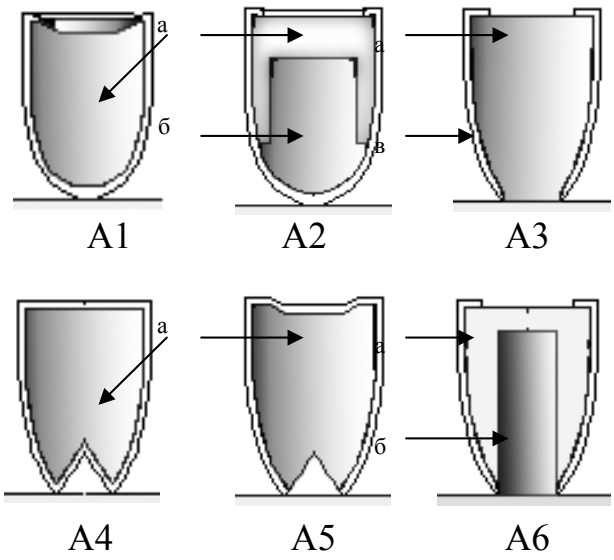
а) сплав Д16, толщина преграды 4 мм; б) сплав Д16, толщина преграды 8 мм;
в) сталь, толщина преграды 4 мм; г) сталь, толщина преграды 8 мм;
д) сталь, толщина преграды 4 мм;

Рисунок 10. Рассчитанные значения относительных запреградных скоростей ударников В1 и В4

Анализ пробивного действия разрезных сердечников проведен на примере вариантов расчетов для ударников с оживальной и плоской ГЧ. Далее исследовано поведение оболочки при ее соударении с преградами. Получены текущие деформационные картины и области разрушения, как оболочки, так и преграды. Для выяснения влияния формы ГЧ ударника на его пробивное действие в работе рассмотрены ударники со сферическими (положительной и отрицательной кривизны) и плоскими ГЧ.

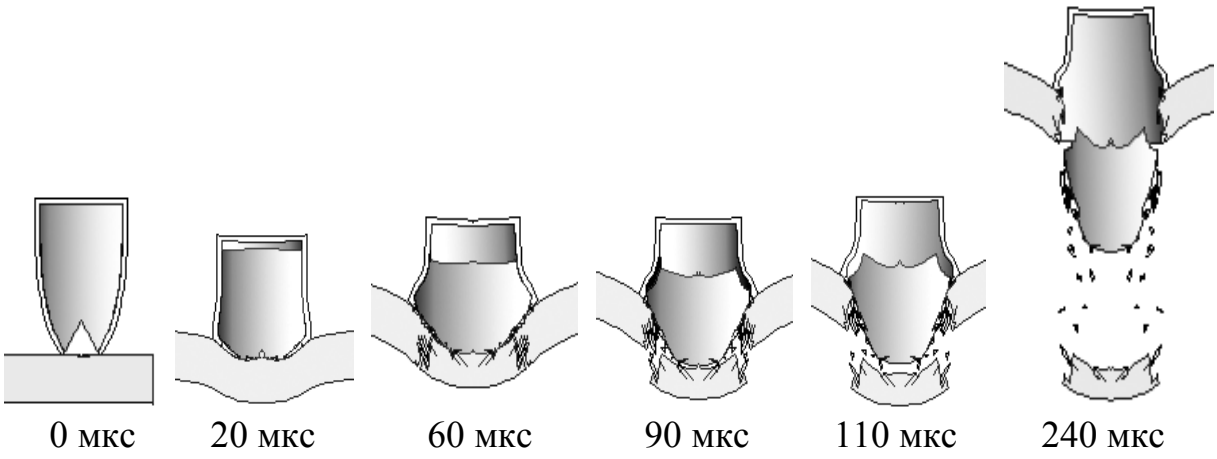
При изучении влияния начальной скорости, толщины и предела текучести преграды на пробивное действие оживального и затупленного ударника (рис. 10) обнаружены точки инверсий данных зависимостей.

**<u>В четвертом разделе</u>** представлены результаты численного моделирования взаимодействия с преградами неоднородных ударников, которые по массо-габаритным характеристикам соответствуют 9 мм пистолетным пулям. Начальная скорость соударения 300 и 470 м/с.

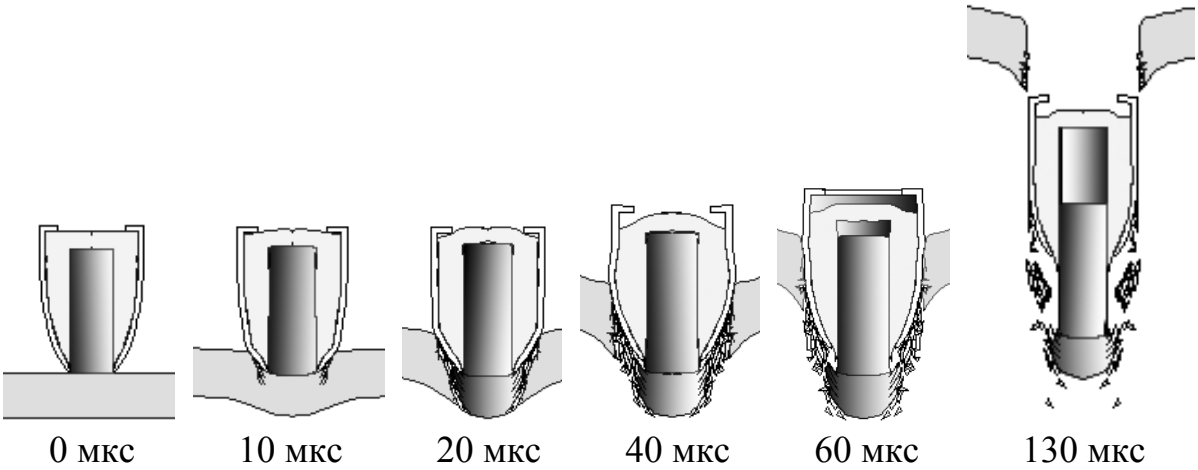



а – свинец, б – сталь, в – стальная оболочка,
Рисунок 11. Начальные конфигурации ударников

Рассмотрены пять типов ударников различной компоновки и формы, а также модельный ударник с подкалиберным сердечником. Получены текущие конфигурации соударения, позволяющие оценить степень деформации и разрушения, как ударника, так и преграды. Результаты расчетов сопровождаются графиками скорости центра масс ударников и силы сопротивления внедрению во времени, позволяющими провести сравнительный анализ пробивного и останавливающего действия ударников.




а)




б)

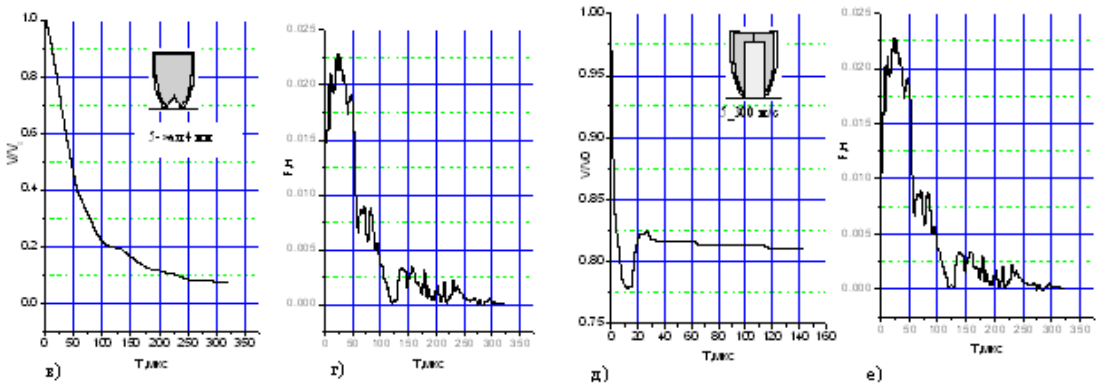


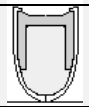
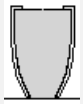
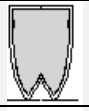
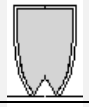
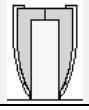
Рисунок 12. Результаты расчетов взаимодействия ударников А5 и А6 с 4-мм преградами из сплава Д16. $V_0$=300 м/с

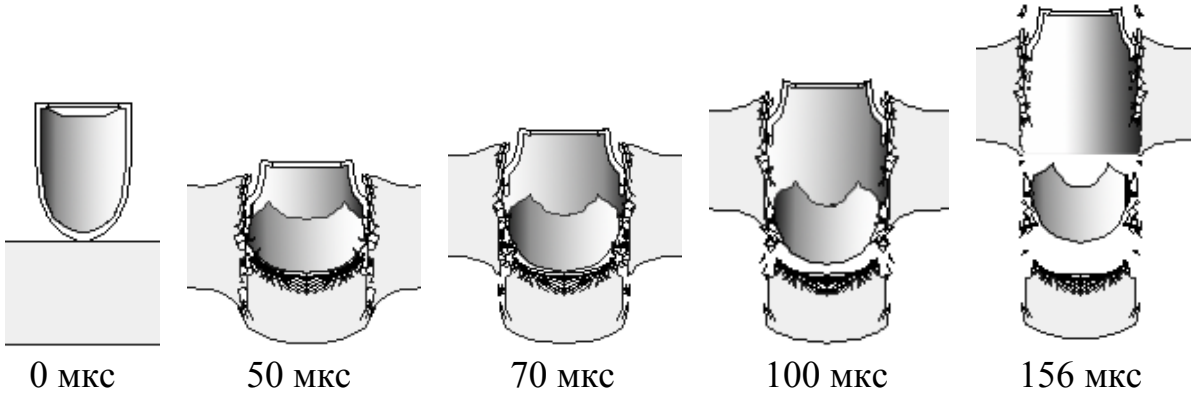
На рис. 12 приведены текущие конфигурации ударников А5 и А6 при их взаимодействии с 4 мм преградой из сплава Д16 при начальной скорости 300 м/с. Этот рисунок хорошо демонстрирует экспансивный характер внедрения ударника А5, выражающийся в значительном увеличении его диаметра, и как следствие этого, в более позднем образовании пробки. Ударник А6 слабо деформируется в радиальном направлении и сравнительно легко пробивает преграду. Из шести типов ударников только А2 и А6 пробивают преграду без разрушения оболочки. У остальных ударников оболочка, разрушаясь, снимается и остается на лицевой поверхности преграды. На рис. 13 приведены текущие конфигурации ударников А1 и А2 при их взаимодействии с 10 мм преградой из сплава Д16 при начальной скорости 470 м/с.

Рассчитанные значения запреградных скоростей центров масс всех рассмотренных ударников приведены в таблице 4. Видно, что для дозвуковой скорости взаимодействия наилучшим пробивным действием обладает ударник А6, затем А2. Такое действие ударников объясняется наличием в них стальных сердечников. Наибольшим остановочным действием обладает ударник А5 (с конической выемкой), вследствие выраженного проявления экспансивного эффекта. Запреградная скорость ударника А6 получилась в 10,8 раз больше, чем ударника А5. Для сверхзвуковой скорости взаимодействия повышенным пробивным действием обладают ударники А2 и А6, а повышенным остановочным действием обладает ударник А5.

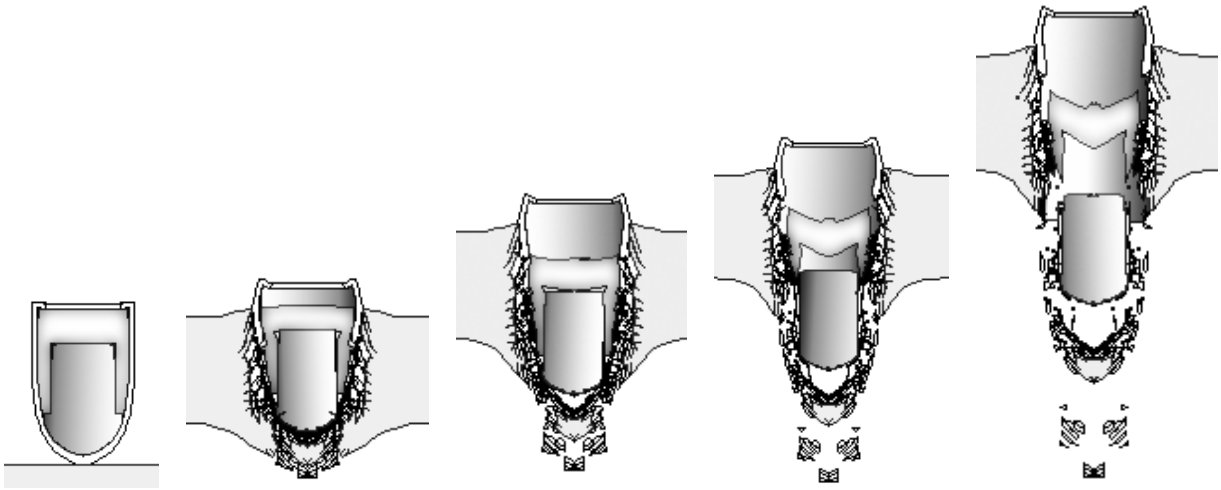
Проведенные расчеты показали, что путем изменения формы и компоновки ударника в некоторых случаях можно более, чем на порядок изменить его пробивное действие.

Таблица 4 – Результаты расчетов взаимодействия ударников А1-А6 с преградами из сплава Д16 и стали 3

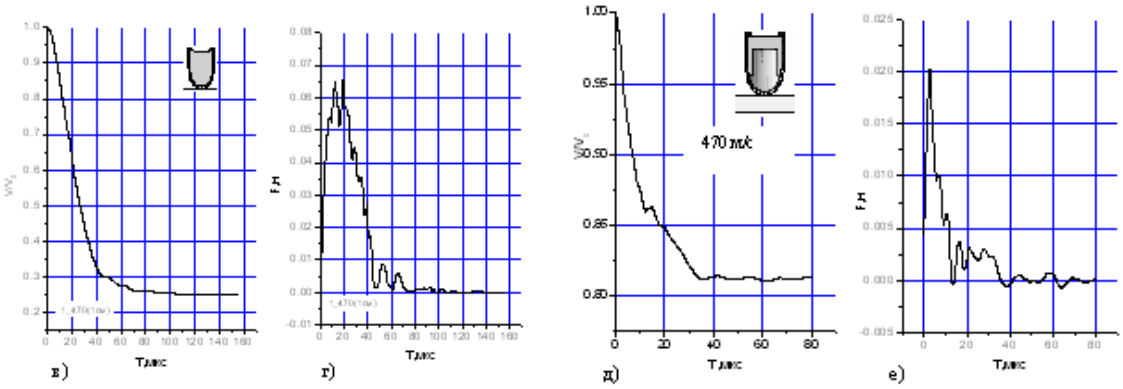
| Тип уд-ка | | Масса сердечника (г) | Масса уд-ка (г) | Запреградная скорость (м/с) $V_з/V_0$ | | | | Глубина кратера (мм) / Диаметр кратера (мм) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $V_0$ = 470 (м/с) | | | $V_0$ =300 (м/с) | $V_0$ = 470 (м/с) |
| | | | | Д16 h = 10 мм | Д16 h = 4 мм | Сталь h = 4 мм | Д16 h = 4 мм | Д16 h = 40 мм |
| 1 | | 5,6 | 7,04 | 117 / 0,25 | 365 / 0,78 | 131 / 0,28 | 87 / 0,29 | 6 / 6,9 |
| 2 |  | 2,5 | 7,04 | 119 / 0,25 | 382 / 0,81 | 227 / 0,48 | 186 / 0,62 | 9 / 6 |
| 3 |  | 5,8 | 7,04 | 67 / 0,14 | 375 / 0,8 | 103 / 0,22 | 110 / 0,37 | 6,5 / 7 |
| 4 |  | 5,6 | 7,04 | 17 / 0,04 | 376 / 0,8 | 129 / 0,27 | 68 / 0,23 | 5,7 / 6.9 |
| 5 |  | 5,6 | 7,04 | 0 / 0 | 373 / 0,79 | 133 / 0,28 | 22 / 0,07 | 5,9 / 7 |
| 6 |  | 1,1 | 7,04 | 233 / 0,5 | 419 / 0,89 | 210 / 0,45 | 239 / 0,8 | 7 / 6 |




а)



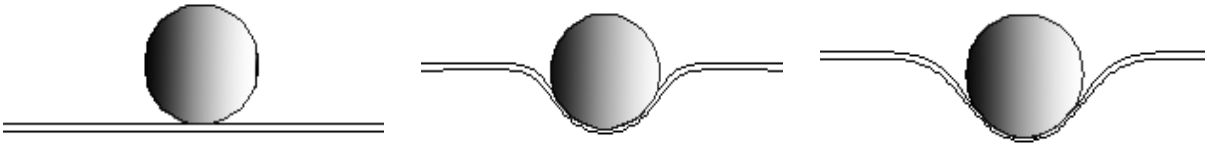

б)




в) г) д) е)

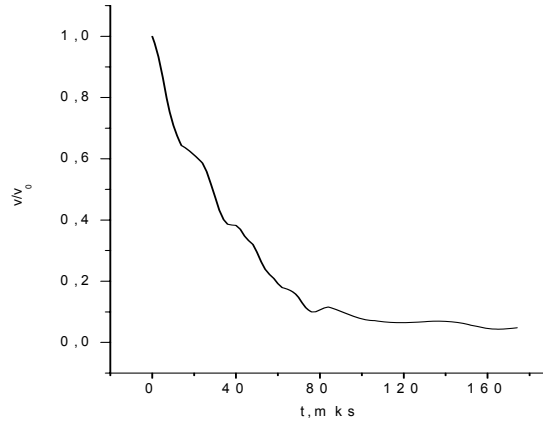
Рисунок 13. Результаты расчетов взаимодействия ударников А1 и А2 с 10 мм преградами из сплава Д16. $V_0$=470 м/с.

В последнее время для целей охраны общественного правопорядка и личной самообороны получило распространение травматическое оружие с использованием резиновых пуль, что и определяет актуальность исследований поведения резины при ударе. При помощи разработанного программного комплекса предпринята попытка решения задачи ударного взаимодействия сферического резинового ударника с тонкой медной пластиной и слоистой преградой. Рассмотрены однородные резиновые и стальные в резиновой оболочке ударники, которые обычно используются в травматическом оружие для обороны и нанесения вреда, не предполагающего летального исхода.

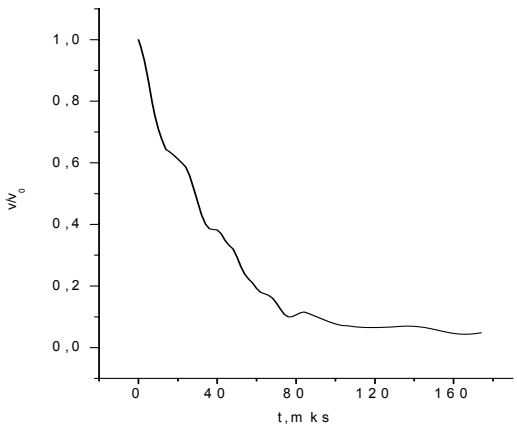


0 мкс 30 мкс 40 мкс

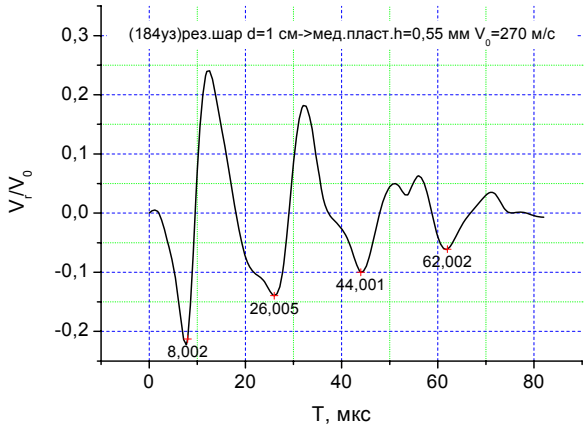
а)



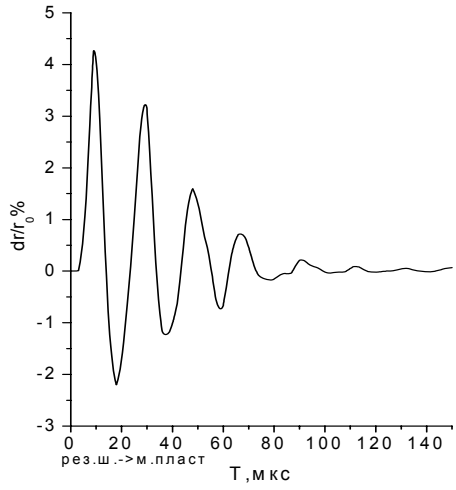

б)



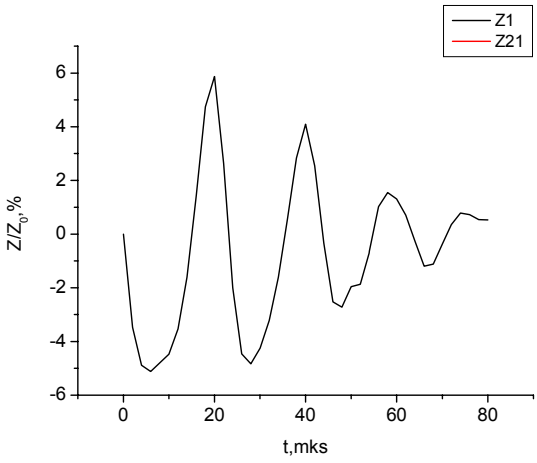

в)




г)




д)




е)

Рисунок 14. Результаты расчетов процесса взаимодействия резинового ударника с медной преградой толщиной 0, 6 мм. $V_0$ = 270 м/с

Рассчитанные текущие конфигурации «ударник – мишень» в моменты времени 0, 30, 40 мкс приведены на рис. 14. Разрушения в преграде и ударнике отсутствуют. Зависимость скорости центра масс от времени (рис. 14б) имеет гиперболический характер. Видно, что образование вмятины в преграде заканчивается к 120 мкс процесса. На рис. 14в приведен график относительной скорости движения первой точки на оси ударника, а на рис. 14г – график относительной скорости движения его крайней радиальной точки. На этих графиках фиксируется время достижения пикового значения скорости. Хорошо видно, что период времени между этими значениями равен примерно 18 мкс (рис. 14г), что соответствует времени прохождения упругой волны по оси ударника «туда и обратно».

На рис. 14д и 14е представлены рассчитанные временные зависимости относительного диаметра резинового ударника в радиальном и осевом направлении соответственно. По форме эти графики представляют собой кривые, описывающие затухающие гармонические колебания.

Проведено сравнение расчетного результата с экспериментом, а также рассчитаны варианты соударения резинового и стального ударника в резиновой оболочке с преградой, составленной из слоя резины и парафиновой подложки. Рассчитаны глубина проникания ударников в парафин и давление в парафине за контактной поверхностью. Используя данные, полученные при помощи разработанной методики, можно оценить степень тяжести нанесенной травмы как существующими, так и проектируемыми пулями.

**В пятом разделе**, при помощи развиваемого в работе подхода, решена задача нагружения стальных преград осесимметричными ударниками с плоской и оживальной ГЧ, наполненными ВВ или слабопрочным наполнителем. Проанализированы механизмы ударноволнового инициирования и критерии чувствительности ВВ к ударноволновому нагружению. С использованием критерия по минимальному инициирующему импульсу, выраженному через массовую скорость, проанализирован процесс взаимодействия крупногабаритных ударников с преградами.

Для ударного импульса произвольной формы применен критерий вида

$$\int_{(t)} [(U - U_m)^2 - (U_m - U_y)^2]dt = k^0 \qquad (15).$$

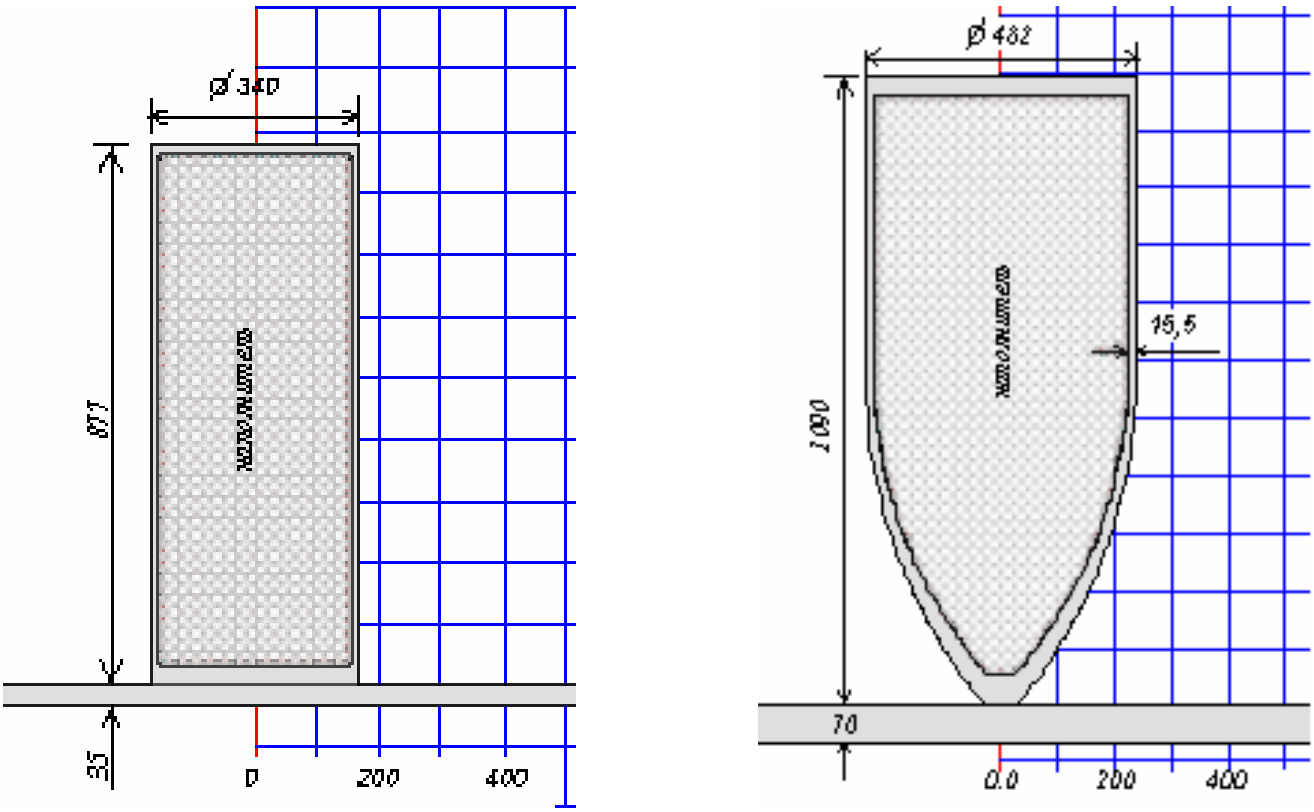
Анализ экспериментальных данных и методик позволил оценить диапазон значений констант критерия типа (15) для гетерогенных ВВ с плотностью (1,5–1,85) г/см$^3$:

$$U_m = (1.1 - 2{,}0)10^{-2}\ \text{см/мкс},\ k^0 = (4–15)\times 10^{-4}\ \text{см}^2/\text{мкс}.$$

Скорость ударников задавалась в диапазоне от 270 до 900 м/с, масса - от 235 до 445 кг, толщина преград – от 35 до 76 мм. В качестве наполнителя рассматривалось ВВ РВХ-9404 или инертная смесь, состоящая из пяти компонент: цемент – 15%, природный песок – 62%, опилки древесные – 6%, воды – 11%, стекло жидкое – 6%. Плотность такой смеси 1,71 г/см$^3$, динамический предел текучести в пределах 0,01–0,05 ГПа. Уравнение состояния наполнителя, как многокомпонентной среды, построено методом аддитивной ударной сжимаемости.

Замена ВВ наполнителем, имитирующим его физико-механические свойства, вызвана необходимостью описания и прогнозирования результатов той части стендовых испытаний, в которой исследуются не только вероятность самодетонации, но

и параметры ударников и преград до и после момента детонации. К таким параметрам, в частности, относятся укорочение ударника, запреградная скорость, давление и массовая скорость, и т.д.

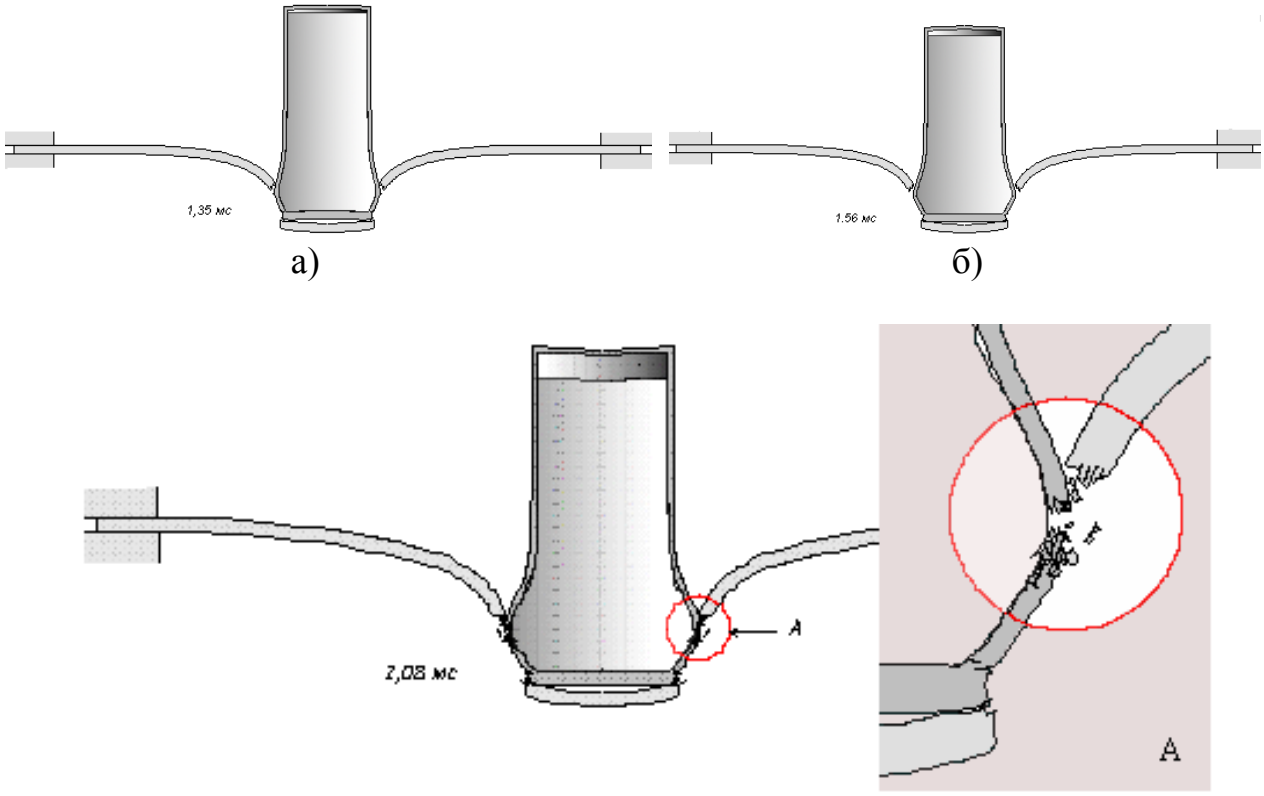



а) б)

Рисунок 15. Начальные конфигурации ударников

Таблица 5 – Рассчитанные параметры взаимодействия ударников цилиндрической формы с преградами

| $V_0(м/с)/Z_p(мм)$ | 300/41 | 300/35 | 600/35 | 900/35 |
|---|---|---|---|---|
| $P^O_{\max}$, ГПа | 4,9 | 4,9 | 10,3 | 16,3 |
| $P^H_{\max}$, ГПа | 1,1 | 1,1 | 2,8 | 4,8 |
| $T_в$, мкс | 8,2 | 8,2 | 6,7 | 6,23 |
| $T_н$, мкс | | ----- | 13,7 | 12,6 |
| $V_{запр}$, м/с | 106 | 222 | 518 | 785 |
| $\overline{L}_{\max}/\overline{D}_{\max}$ | 0.097/-- | 0,065/0,26 | 0,14/0,41 | 0,173/0,614 |
| $T_р$, мкс | 419 | 395 | 232 | 130 |




а) б)

в)

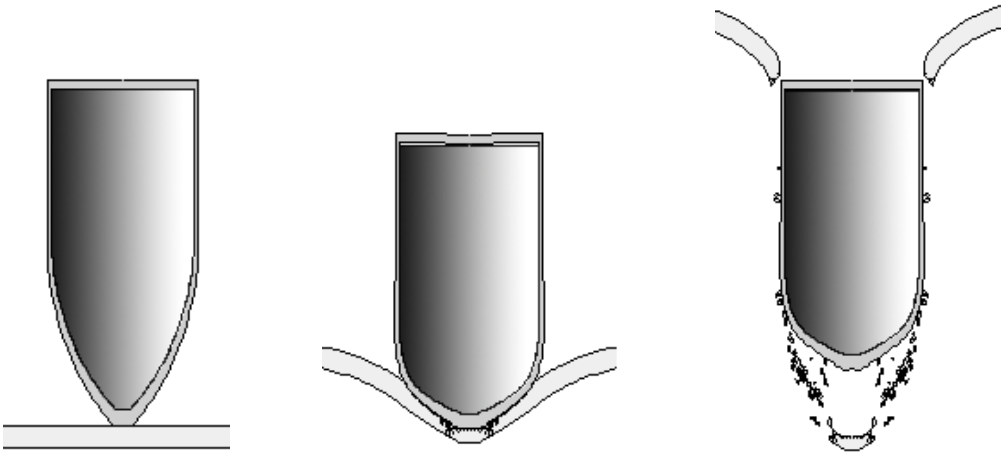
Предел текучести наполнителя ударника:
а) – 0,05ГПа, б) – 0,025ГПа, в) – 0,01ГПа

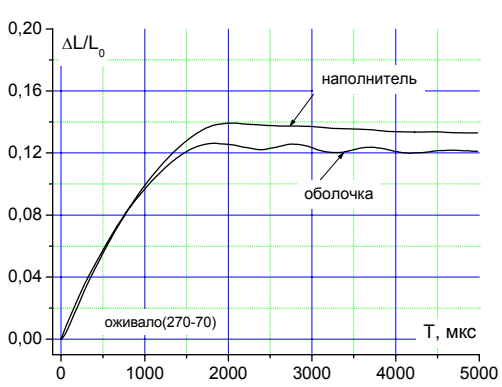
Рисунок 15 –Взаимодействие цилиндрического ударника со стальной плитой толщиной 35 мм, $V_0$ = 300 м/с.

Таблица 6 – Рассчитанные параметры взаимодействия ударника с ОГЧ с преградами

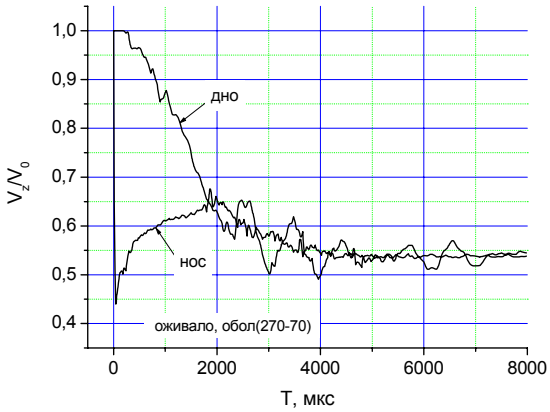
| $V_0(м/с)/Z_p(мм)$ | 270/70 | 270/76 | 600/76 | 900/76 |
|---|---|---|---|---|
| $P^O_{\max}$, ГПа | 4,5 | 4,5 | 10,3 | 16,3 |
| $P^H_{\max}$, ГПа | 0,84 | 0,84 | 2,3 | 3,4 |
| $T_в$, мкс | 17,0 | 17,0 | 13,0 | 12,3 |
| $T_н$, мкс | ----- | ----- | 13,7 | 12,6 |
| $V_{запр}$, м/с | 145 | 70 | 407 | 697 |
| $\overline{L}_{\max}$ | 0,07 | 0,143 | 0,26 | 0,278 |
| $T_p$, мкс | 1800 | 2060 | 480 | 120 |

где $P^O_{\max}$ - максимальное давление в оболочке, $P^H_{\max}$ - максимальное давление в наполнителе, $T_в$ - время самодетанации высокочувствительного ВВ, $T_н$ - время самодетанации низкочувствительного ВВ, $V_{запр}$ - запреградная скорость, $\overline{L}_{\max}$ - относительное укорочение ударника, $\overline{L}^H_{\max}$ - относительное укорочение наполнителя, $\overline{D}_{\max}$ - относительное расширение ударника, $T_p$ - время разрушения преграды.

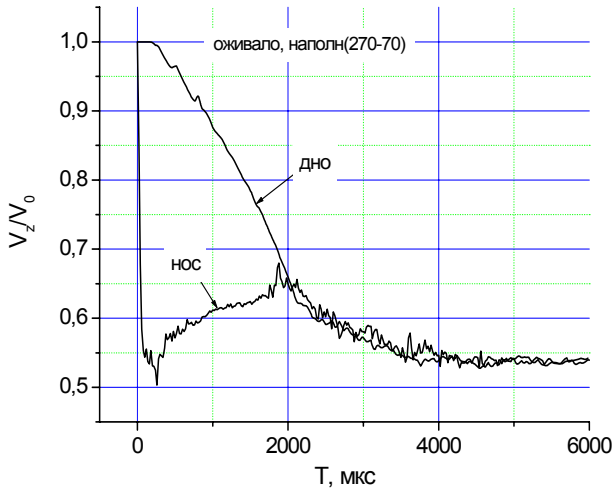



а)




б)



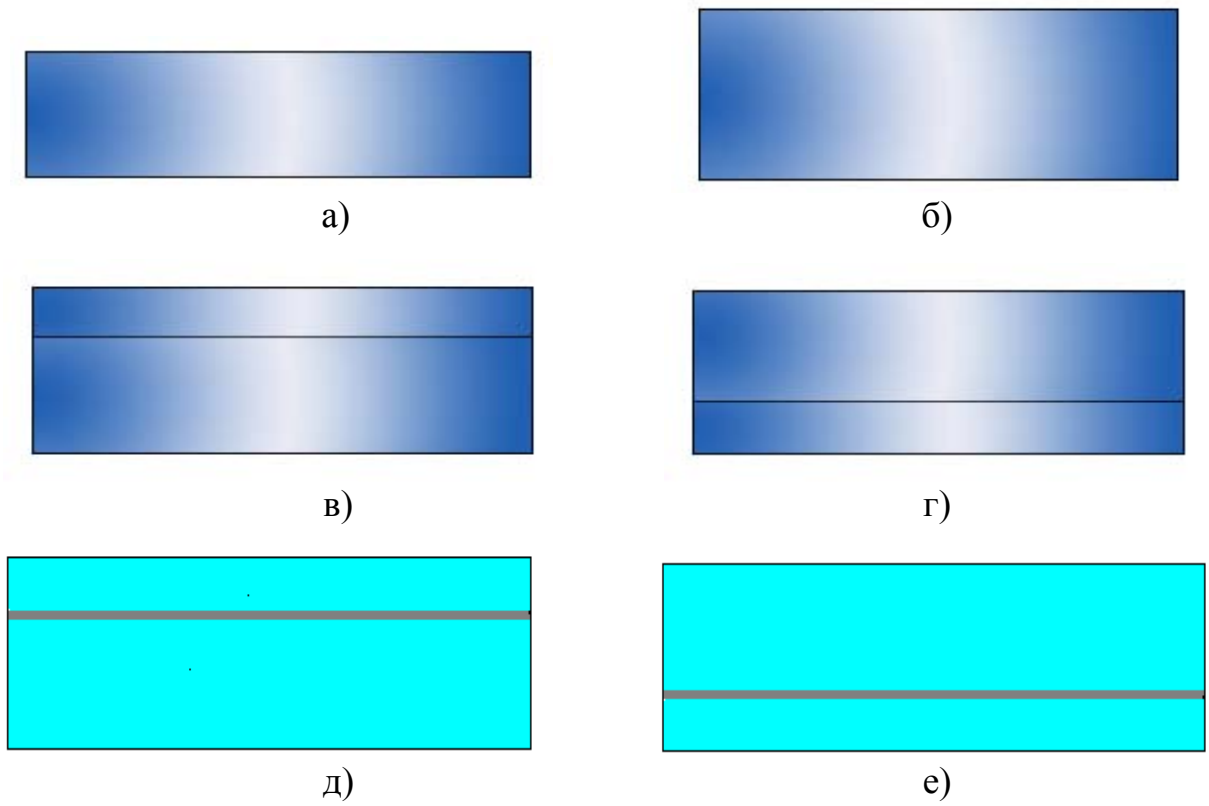

в)

Рисунок 16 Результаты расчета взаимодействия наполненного ударника с ОГЧ с 70 мм стальной преградой

Путем расчетов получены текущие деформационные картины и области разрушения, как материала оболочек, так и преград. Рассчитаны значения запреградных скоростей ударников, времени начала инициирования детонации заряда ВВ, укорочения, расширения и времени начала разрушения преград. При скорости взаимодействия выше скорости звука в воздухе в преградах имело место отрывное разрушение, а оболочка цилиндрического ударника разрушалась в месте ее максималь-

ного расширения. Увеличение предела текучести наполнителя привело к уменьшению деформации ударника и времени сквозного разрушения преграды.

**В шестом разделе** решена задача об усилении уже имеющейся защитной конструкции. Наиболее простым подходом к решению такой проблемы можно считать добавление еще одного слоя. Однако расположить дополнительный усиливающий слой в силу различных причин можно как с внешней стороны защищаемого объекта, так и с внутренней. При этом соединить основной слой защиты с дополнительным усиливающим слоем можно разными способами в зависимости от условия эксплуатации конструкции.




а) – Конфигурация преграды (*h);* б) – Конфигурация преграды *(1,5h);*
в) – Конфигурация преграды (0,5*h*+ *h);* г) – Конфигурация преграды *(h+0,5h);*
д) – Конфигурация преграды [0,5*h*+ h]*;* е) – Конфигурация преграды [*h+0,5h*]*;*

Рис. 17 Варианты компоновки преград

При помощи разработанного программного комплекса в рамках двумерного осесимметричного случая была решена задача взаимодействия компактных и удлиненных ударников с однородными и двухслойными преградами. Компактные ударники, равные по массе, имели цилиндрическую и сферическую форму. Удлиненные ударники также имели цилиндрическую форму и оживальную и коническую головные части (ОГЧ и КГЧ). Соударение происходило по нормали к преграде в диапазоне начальных скоростей от 500 до 1500 м/с.

Всего рассмотрено шесть различных вариантов компоновки стальных преград. Двухслойные преграды состояли из дополнительного и основного слоев, скрепленных между собой разными способами. Дополнительный слой задавался на лицевой или тыльной поверхности преграды. В одних вариантах на контактной границе слоев реализовано условие скольжения (коэффициент скрепления $K_c = 0$), в других – тонкая скрепляющая полоса с прочностными характеристиками, вдвое меньшими,

чем в материале прилегающих слоев ($K_c = 0,5$). Для однородной преграды $K_c = 1$. Толщина основного слоя была вдвое больше, чем дополнительного. На рис. 17 запись (0,5h+h) означает, что рассматривается преграда толщиной h, а дополнительный слой имеет толщину 0,5h.

Для получения численного значения стойкости в рассмотрение введен безразмерный критерий, выраженный через скорость ударника в конце процесса взаимодействия:

$$R = 1 - \frac{V_i - V_6}{V_4 - V_6}, \quad i = 1,...6,$$

где $V_i$ – скорость центра масс ударника при действии по *i*-ой преграде в момент времени, соответствующий конечной стадии взаимодействия; $V_4, V_6$ – то же для преграды (4) и (6) соответственно.

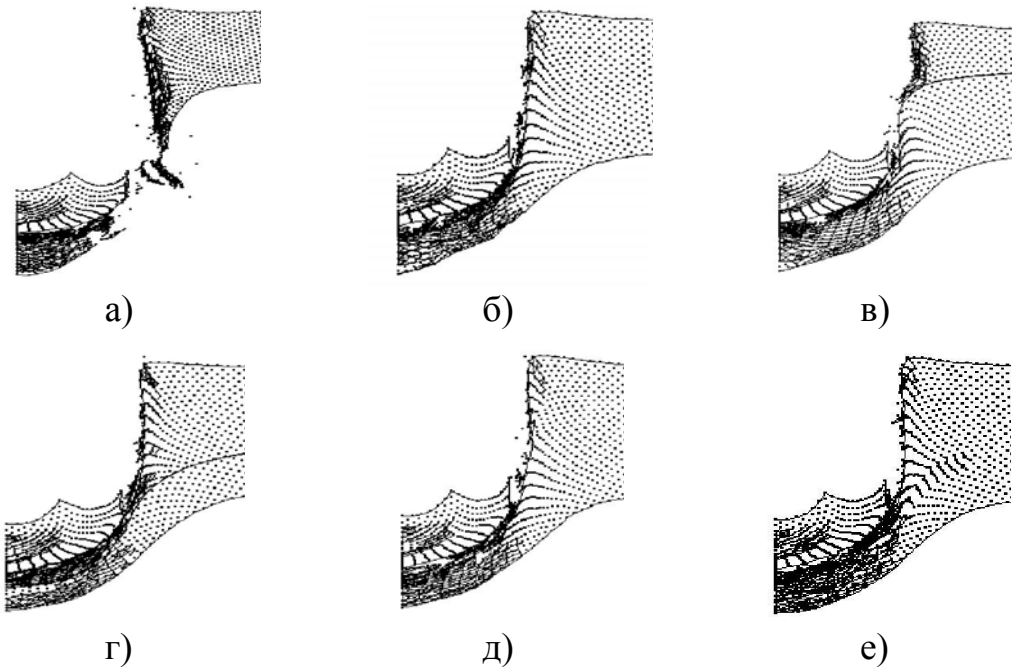
На основе полученных результатов расчетов проведена количественная оценка сравнительной стойкости преград, а также изучена динамика взаимодействия ударников с преградами (таблица 7). Динамика проникания ударников продемонстрирована на рассчитанной зависимости скорости их центров масс от времени (рис. 18).

Образование областей разрушений преград при действии компактных ударников происходило как в зоне контакта «ударник – мишень», так и вблизи тыльной поверхности. Причем при действии сферического ударника эффекты разгрузки были выражены в большей степени, поэтому образование зон разрушений вблизи тыльной поверхности выявлено не было. При низких скоростях соударения стойкость преград без скрепления практически в три раза была меньше, чем стойкость преград со скреплением. С ростом начальной скорости удара значение критерия стойкости заметно росло, но при этом оставалось меньше значения для преград со скреплением. На полученной зависимости скорости центра масс ударников от времени выделены участки быстрого и медленного снижения скорости.

Таблица 7 – Рассчитанные значения критерия *R*
при действии цилиндрического ударника

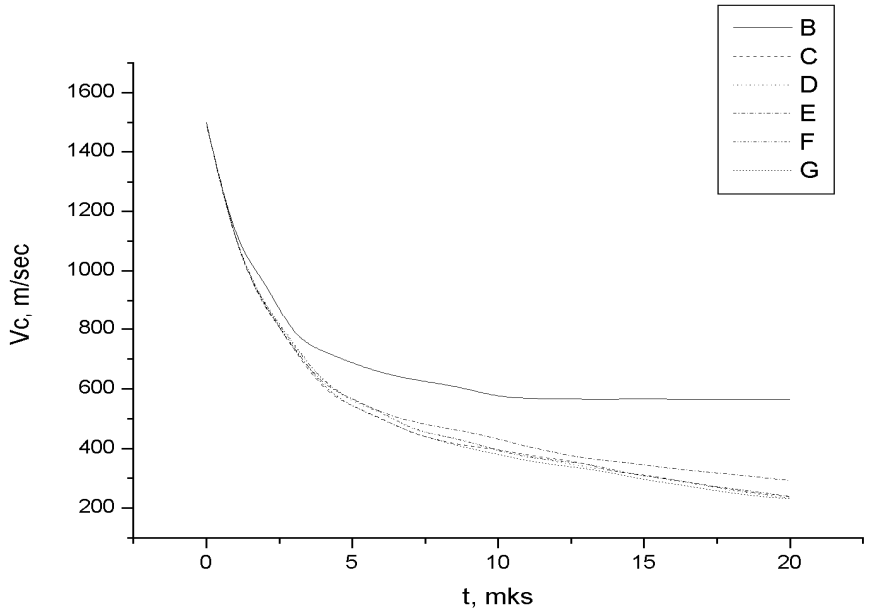
| Преграда | (4) | (2+4) | (4+2) | [2+4] | [4+2] | (6) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Коэф-т скрепления* | $K_c = 1$ | $K_c = 0$ | | $K_c = 0,5$ | | $K_c = 1$ |
| *С (500-33)* | 0 | 0,37 | 0,31 | 0,93 | 0,91 | 1 |
| *С (800-65,5)* | 0 | 0,44 | 0,38 | 0,95 | 0,93 | 1 |
| *С (1500-565)* | 0 | 0,98 | 0,93 | 0,99 | 0,97 | 1 |

С целью выявления влияния формы головной части ударника на процесс пробития однородных и двухслойных стальных преград проведены расчеты взаимодействия удлиненных ударников с вышеперечисленными преградами. Рассмотрены равные по массе и диаметрам цилиндрические ударники с конической и оживальной головными частями (КГЧ). Длина ударника с КГЧ и ОГЧ составляла 13,1 мм и 16,0 мм соответственно. Рассчитанные текущие конфигурации ударника с ОГЧ и шести преград в различные моменты времени приведены на рис. 19.



а) б) в)

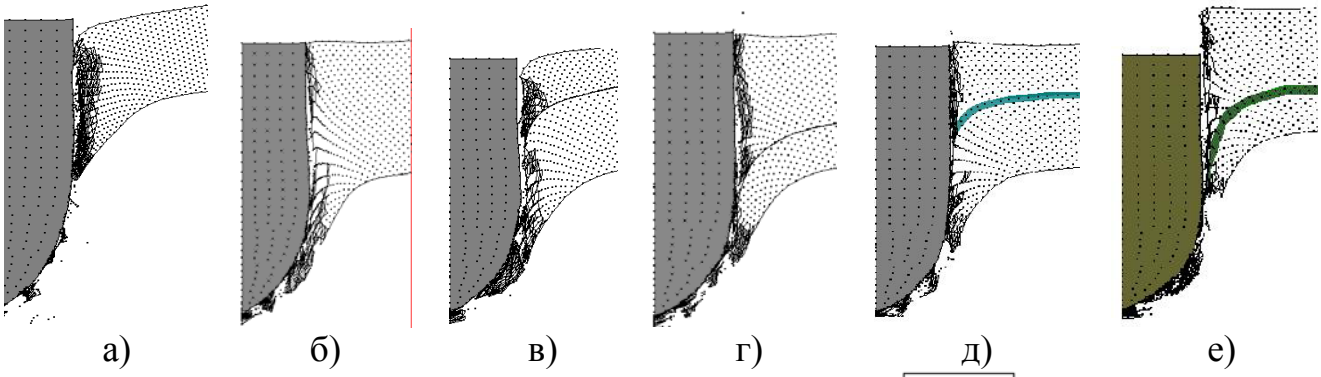
г) д) е)



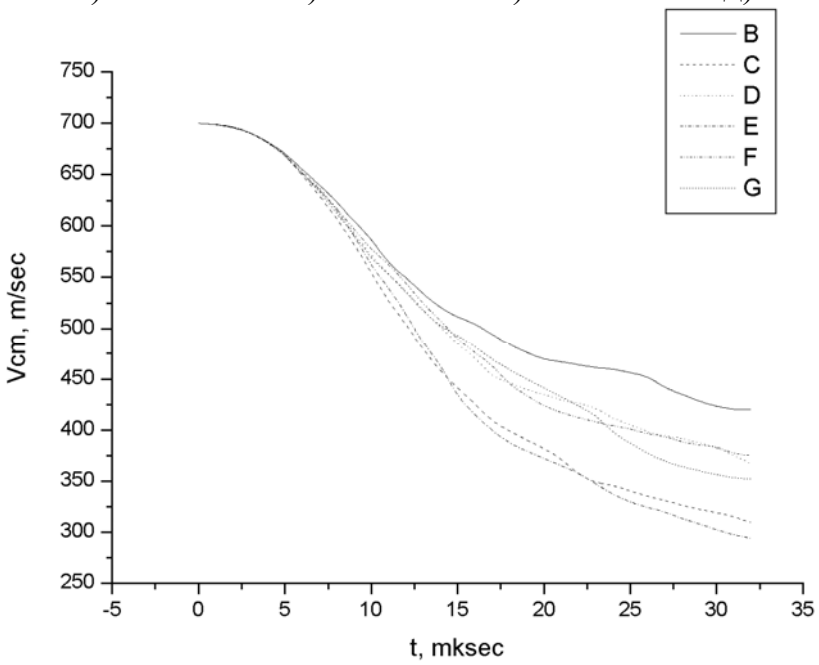

ж)

| Тип преграды | (4) | (6) | (2+4) | (4+2) | [2+4] | [4+2] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Коэффициент *Кс* | 1 | 1 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 |
| Кривая на графике | B | C | D | E | F | G |
| Значение $V_c(t_k)$ [м/с] | 565 | 239 | 246 | 261 | 242 | 247 |

Рис. 18. Результаты расчета варианта взаимодействия при $V_0 = 1500$ м/с
а) преграда (4); б) преграда (6); в) преграда (2+4); г) преграда (4+2);
д) преграда [2+4]; е) преграда [4+2]; ж) зависимость $V_c(t)$.



а) б) в) г) д) е)




ж)

| Тип преграды | (4) | (6) | (2+4) | (4+2) | [2+4] | [4+2] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Коэффициент *Кс* | 1 | 1 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 |
| Кривая на графике | B | C | D | E | F | G |
| Значение $V_c(t_k)$ [м/с] | 419 | 280 | 255 | 348 | 327 | 340 |

Рис. 19 Результаты расчетов пробития преград ударником с ОГЧ при $V_0$=700 м/с а) преграда (4) при t = 38 мкс; б) преграда (6) при t = 38 мкс; в) преграда (2+4) при t = 40 мкс; г) преграда (4+2) при t = 40 мкс; д) преграда [2+4] при t = 38 мкс; е) преграда [4+2] при t = 42 мкс; ж) зависимость $V_c(t)$.

Таблица 8 – Рассчитанные значения критерия *R* при действии ударников с КГЧ и ОГЧ

| Преграда | (4) | (2+4) | (4+2) | [2+4] | [4+2] | (6) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Коэф-т скрепленияния* | $K_c=1$ | $K_c=0$ | | $K_c=0,5$ | | $K_c=1$ |
| КГЧ | 0 | 0,74 | 0,72 | 0,86 | 0,74 | 1,0 |
| ОГЧ | 0 | 1,18 | 0,51 | 0,66 | 0,57 | 1,0 |

При моделировании процесса взаимодействия удлиненных ударников с преградами было установлено, что для ударников с ОГЧ пробитие происходило по механизму «прокола», а ударников с КГЧ – по механизмам срезания пробки и прокола.

Во всех вариантах материал ударника не разрушился, а уровень его пластической деформации был незначительным.

Вычисленные значения критерия стойкости (табл. 8) при действии ударника с КГЧ были больше, чем при действии ударника с ОГЧ, а расположение дополнительного слоя на лицевой поверхности преграды придавало защитной конструкции большую стойкость, чем расположение его на тыльной поверхности независимо от способа скрепления.

**В седьмом разделе** проведено исследование ударноволнового нагружения преград с градиентом прочностных свойств. А именно, исследовано влияние линейного изменения характеристик, отвечающих за образование отрывных и сдвиговых разрушений, по всей толщине преграды от поверхности нагружения до тыльной поверхности на процесс ее деформации и разрушения.

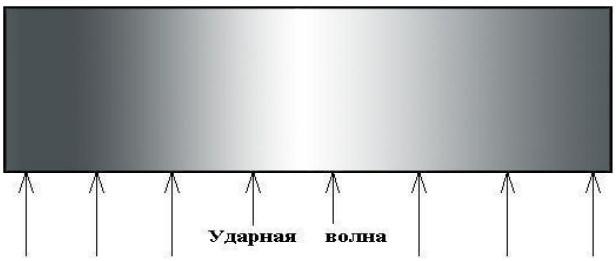



Рис. 20 Схема нагружения исследуемых образцов

Всего рассмотрено девять вариантов сочетаний изменения значений откольной прочности $\sigma_k$ и критического значения величины удельной работы сдвиговых пластических деформаций $A_k$ по толщине преграды. Выбранные интервалы изменения прочностных характеристик соответствуют реальным сталям. Воздействие на преграды задавалось в виде нагружения плоской ударной волной и в виде удара по нормали компактным и удлиненным стальными элементами. Если преграда обозначена как $[\sigma_k^-, A_k^-]$, то по всей толщине преграды $\sigma_k$ и $A_k$ не меняются. Если преграда обозначена как $[\sigma_k^{\uparrow}, A_k^{\downarrow}]$, то $\sigma_k$ - возрастает, а $A_k$ - убывает от поверхности нагружения до тыльной поверхности.

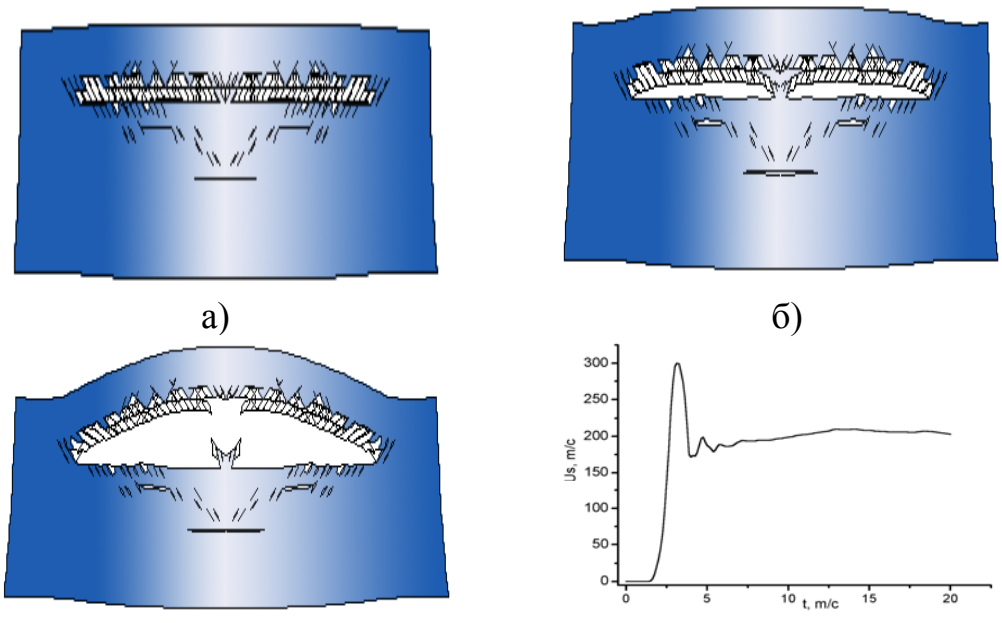



Рис. 21. Рассчитанные конфигурации и профиль скорости тыльной поверхности преграды $[\sigma_k^{\uparrow}, A_k^-]$

В ходе расчетов нагружения преград плоским ударным импульсом в каждый момент времени определялись напряженно-деформированное состояние, объем и форма разрушений, а также скорость тыльной поверхности преграды на оси симметрии. Рассчитанные конфигурации и профиль скорости тыльной поверхности преграды [$\sigma_k^{\uparrow}$, $A_k^{-}$] приведены на рис. 21.

Установлено, что в процессе разрушения преобладал отрывной механизм и поэтому изменение критического значения сдвиговой прочности на деформационную картину, а также на объем и форму разрушений не влияло. При возрастании откольной прочности по толщине преграды образование откольной тарелки сопровождалось меньшими разрушениями приповерхностного слоя по сравнению с однородной преградой. В этом случае на волновых профилях присутствовали осцилляции скорости.

Далее проведено моделирование ударного взаимодействия компактных стальных ударников по нормали с градиентными преградами (рис. 22). В процессе счета фиксировались скорость центра масс ударника, глубина внедрения ударника, деформационная картина и области разрушения. В момент времени 20 мкс счет прекращался, т.к. при этом падение скорости ударника было незначительным, а объем и форма областей разрушения практически не менялись. В данный момент времени в рассматриваемом сечении взаимодействующих тел вычислялась площадь разрушенного материала преграды в области контакта «ударник – мишень» и в области тыльной поверхности преграды. Анализ результатов расчетов показал, что снижение сдвиговой прочности по толщине преграды приводит к более быстрому снижению скорости ударника по мере его внедрения. Наименьшие разрушения получены при росте отрывной и снижении сдвиговой прочности материала преграды.

Для выявления влияния формы ударника на процесс пробития проведено моделирование взаимодействия ударника с ОГЧ с градиентными преградами (рис. 23). Для количественного описания ударной стойкости преград в рассмотрение был введен безразмерный критерий $R_1$, выраженный через значение начальной скорости центра масс ударника и его скорости в момент времени $t_k$ = 42 мкс (момент окончания счета).

$$R_1 = \frac{\left(V_0 - V_c^*\right)}{V_0};$$

где $V_0$ – начальная скорость ударника, $V_c^*$ – скорость центра масс ударника в момент времени $t_k$ = 42 мкс. Чем ближе $R_1$ к единице, тем ударная стойкость преграды выше.

В таблице 9 представлены результаты расчетов проведенной серии вычислительных экспериментов по ударному нагружению удлиненным ударником с ОГЧ однородной и восьми градиентных преград. Видно, что наибольшее сопротивление действию удлиненного ударника оказывают те преграды, в которых значение величины $A_k$ увеличивается по линейному закону от лицевой до тыльной поверхности.

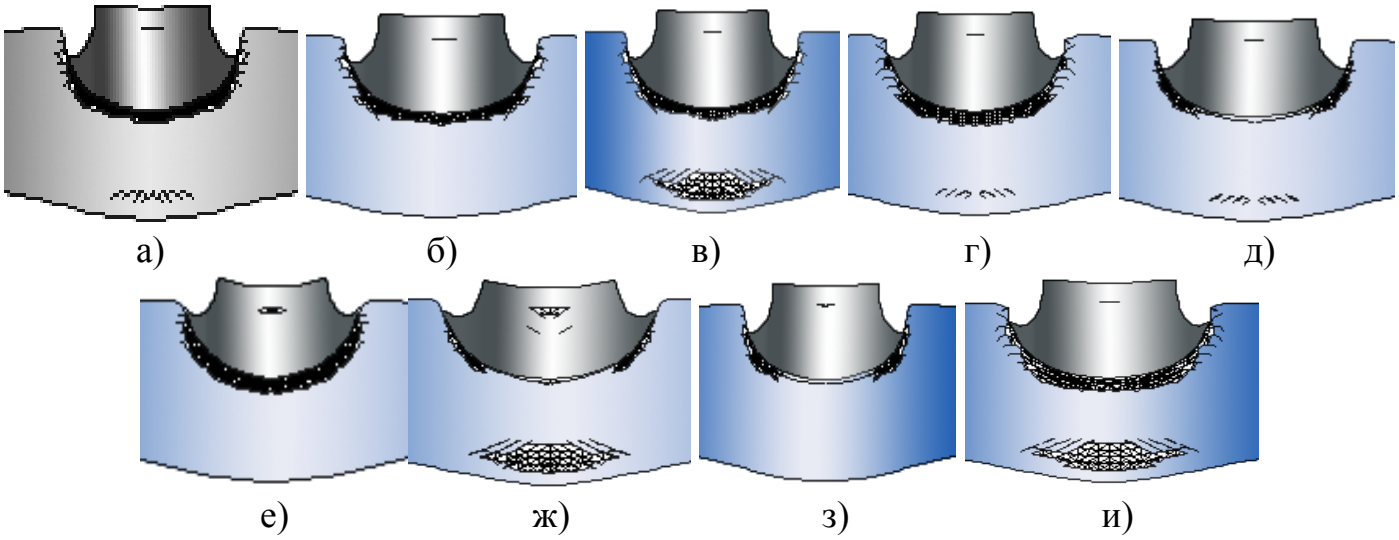



Рис. 22 – Рассчитанные конфигурации «ударник – мишень», $V_0$=800 м/с;
а) преграда $[\sigma_k^-, A_k^-]$; б) преграда $[\sigma_k^\uparrow, A_k^-]$; в) преграда $[\sigma_k^\downarrow, A_k^-]$;
г) преграда $[\sigma_k^-, A_k^\uparrow]$; д) преграда $[\sigma_k^-, A_k^\downarrow]$; е) преграда $[\sigma_k^\uparrow, A_k^\uparrow]$;
ж) преграда $[\sigma_k^\downarrow, A_k^\downarrow]$; з) преграда $[\sigma_k^\uparrow, A_k^\downarrow]$; и) преграда $[\sigma_k^\downarrow, A_k^\uparrow]$.

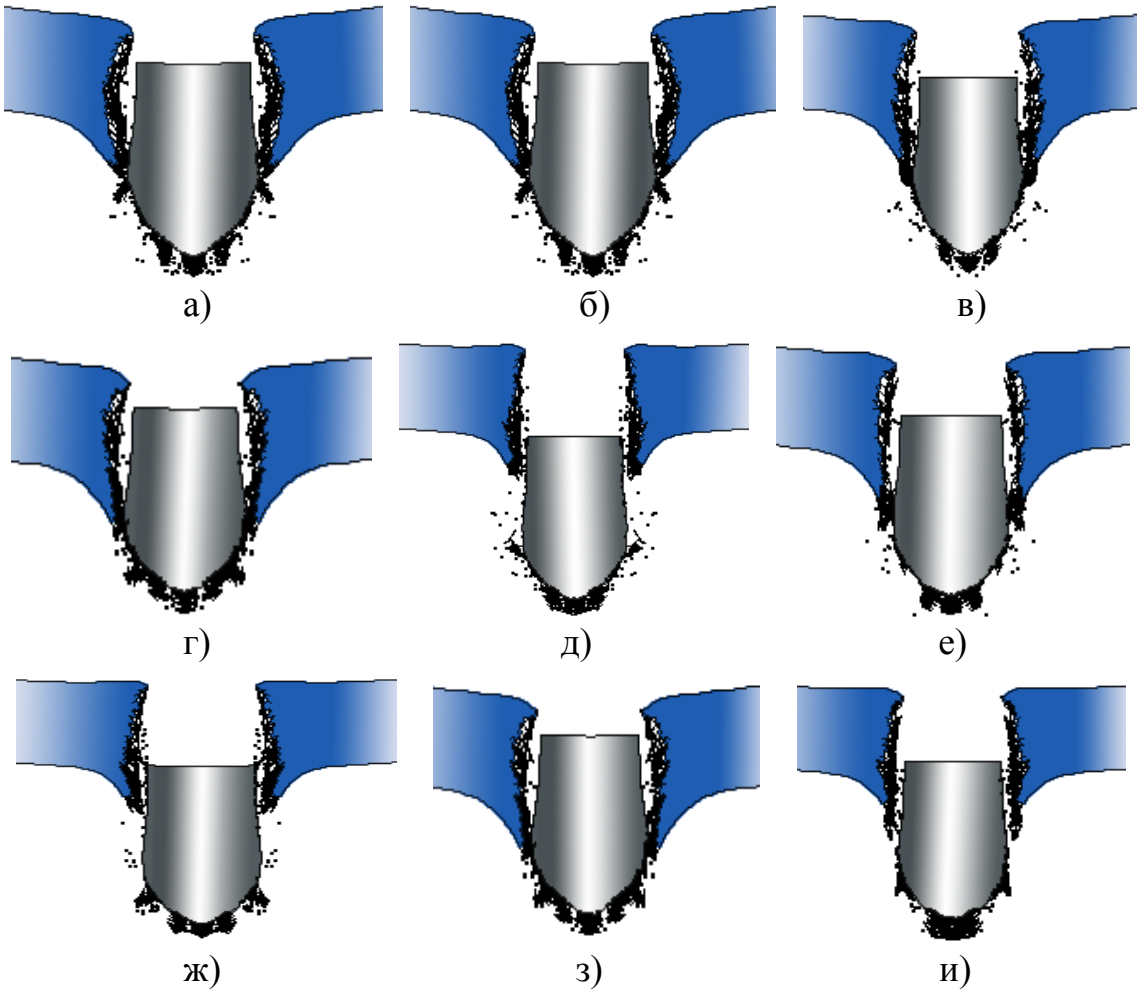
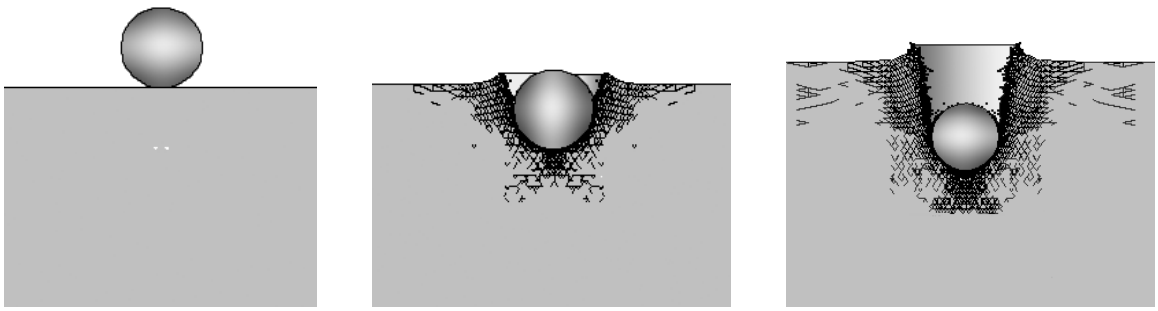



Рис. 23 Рассчитанные конфигурации «ударник – мишень», $V_0$=800 м/с;
а) преграда $[\sigma_k^-, A_k^-]$; б) преграда $[\sigma_k^\uparrow, A_k^-]$; в) преграда $[\sigma_k^\downarrow, A_k^-]$;
г) преграда $[\sigma_k^-, A_k^\uparrow]$; д) преграда $[\sigma_k^-, A_k^\downarrow]$; е) преграда $[\sigma_k^\uparrow, A_k^\uparrow]$;
ж) преграда $[\sigma_k^\downarrow, A_k^\downarrow]$; з) преграда $[\sigma_k^\uparrow, A_k^\downarrow]$;

Таблица 9 – Рассчитанные значения параметров $V_c$ и $R_1$
для градиентных преград при действии удлиненного ударника

| Тип преграды | Скорость центра масс ударника $V_c$ в $t_k = 42$ мкс | Вычисленное значение критерия стойкости $R_1$ |
|---|---|---|
| 1. Преграда $[\sigma_k^-, A_k^-]$ | 286,3 м/с | 0,64 |
| 2. Преграда $[\sigma_k^\uparrow, A_k^-]$ | 270,0 м/с | 0,66 |
| 3. Преграда $[\sigma_k^\downarrow, A_k^-]$ | 272,0 м/с | 0,66 |
| 4. Преграда $[\sigma_k^-, A_k^\uparrow]$ | 263,0 м/с | 0,67 |
| 5. Преграда $[\sigma_k^-, A_k^\downarrow]$ | 409,1 м/с | 0,49 |
| 6. Преграда $[\sigma_k^\uparrow, A_k^\uparrow]$ | 318,7 м/с | 0,60 |
| 7. Преграда $[\sigma_k^\downarrow, A_k^\downarrow]$ | 397,0 м/с | 0,50 |
| 8. Преграда $[\sigma_k^\uparrow, A_k^\downarrow]$ | 363,5 м/с | 0,55 |
| 9. Преграда $[\sigma_k^\downarrow, A_k^\uparrow]$ | 263,1 м/с | 0,67 |

**<u>В восьмом разделе</u>** предпринята попытка расширения диапазона применения, разработанных средств математического моделирования, на решение задач, связанных с динамикой деформирования и разрушения льда при ударе и взрыве. Интерес к задачам ударного и взрывного нагружения льда вызван, прежде всего, наличием его огромного количества на нашей планете. Это морские льды Арктики и Антарктики, пресноводные льды рек и озер, а также горные ледники. Проведение аварийно-спасательных работ в морских глубинах подо льдом, а также работ по увеличению добычи нефти и газа в районах вечной мерзлоты и шельфа северных морей приводит к необходимости углубления наших знаний в области механики и физики льда.



*а* *б* *в*

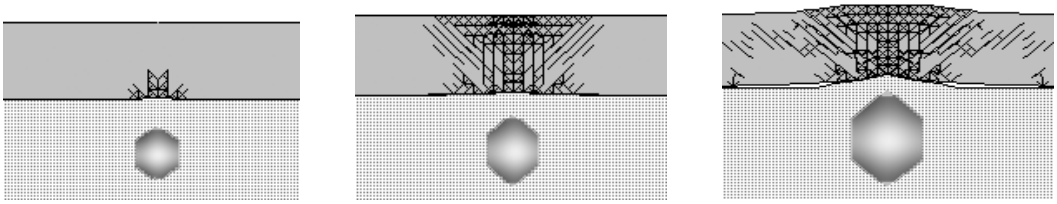
Рис. 24 – Рассчитанные конфигурации «ударник – мишень»:
*а)* $t = 0$ мкс ; *б)* $t = 50$ мкс; *в)* $t = 75$ мкс;

При помощи созданной методики компьютерного моделирования решена задача проникания по нормали в пресноводный лед стального шарика диаметром 4,5 мм. Скорость удара изменялась от 100 до 150 м/с. Необходимые для расчета константы определялись путем их подбора при сравнении расчетных и экспериментальных данных. Эксперименты проведены на баллистической пневмоустановке калибра 4,5 мм с образцами пресноводного льда, размерами (15×15×15)см при температуре -17°С. При таких размерах не наблюдалось влияния боковых и тыльной поверхностей на процесс проникания. После проведения опыта ударник сохранял первона-

чальную сферическую форму. Внедрение ударника сопровождалось откольными разрушениями в области лицевой поверхности образца и образованием конусообразного кратера. Полученные результаты моделирования (рис. 24) процесса внедрения компактных ударников в лед по глубине и форме кратера качественно согласуются с экспериментом.

Действие взрывного нагружения на материал задавалось в приближении модели мгновенной детонации заряда ВВ. Уравнение состояния продуктов детонации (ПД) выбрано в виде политропы Ландау–Станюковича. В рамках данного подхода для двумерного случая осевой симметрии решена задача о взрыве заряда ВВ (ТНТ, $\rho_0$ = 1,63 г/см$^3$, $D$ = 6940 м/с), помещенного в средней части ледовой пластины и в воде подо льдом. Толщина пластины равна 0,8 м, масса ВВ – от 3 до 53 кг.

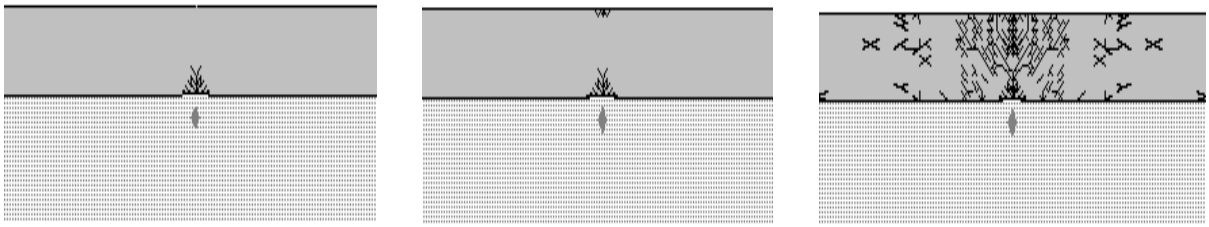
На рис. 25 представлены в различные моменты времени результаты решения задачи. Масса заряда ВВ задана равной 6 кг. Заряд расположен в воде подо льдом на глубине 50 см. Расчеты показывают, что в этом случае первые очаги в основном сдвигового разрушения ледовой пластины появляются в приконтактной области при прохождении ударной волны через контактную поверхность лед – вода. После выхода ударной волны на свободную поверхность в ее окрестности образуется второй очаг разрушений. По мере развития процесса деформирования оба очага сливаются в один, образуя обширную зону сдвиговых и отрывных разрушений. В периферийной области пластины имеют место слабые внутренние разрушения сдвигового характера.



*а* *б* *в*

Рис. 25. Расчет действия заряда ВВ (6 кг) в воде подо льдом:
*а)* $t$ = 0,5 мс ; *б)* $t$ = 1 мс; *в)* в $t$ = 7 мс;

С целью изучения возможностей предложенного подхода решена задача взрывного нагружения сверхтолстых льдов зарядом ВВ, расположенным в воде подо льдом (рис. 26). Исходные данные следующие: толщина льда – 5 м, масса заряда – 53 кг, расстояние от поверхности льда до заряда – 1 м.

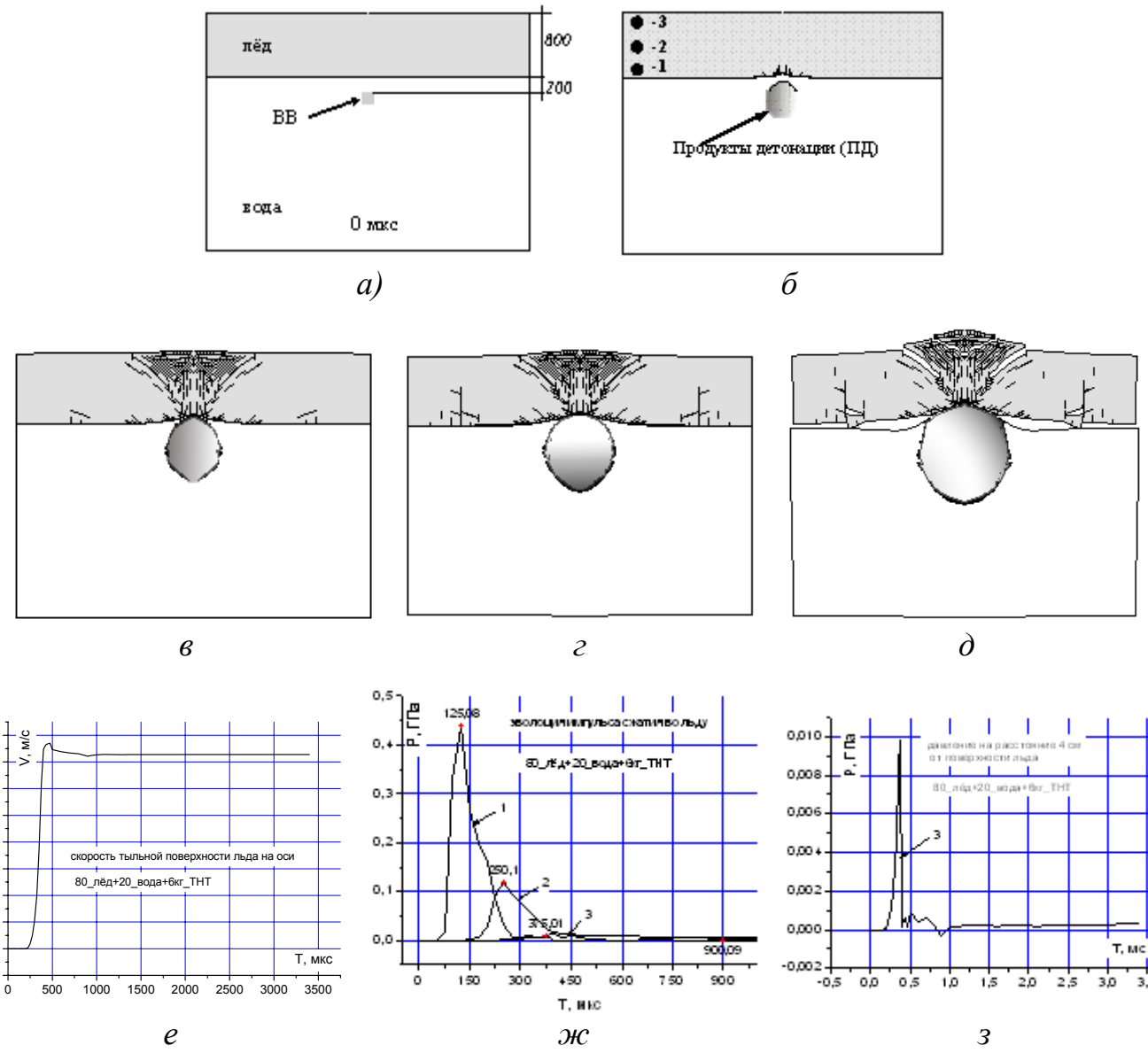


*а* *б* *в*

Рис. 26. Результаты расчета разрушения льда толщиной 5 м при подводном взрыве заряда ТНТ массой 53,0 кг на глубине 1 м ; *а)* $t$ = 2 мс ; *б)* $t$ = 2.5 мс; *в)* в $t$ = 20 мс;

Для анализа влияния величины заглубления ВВ в воду на степень разрушения ледового слоя на поверхности воды смоделированы последствия взрыва заряда ВВ, погруженного в воду, на поверхности которой расположена ледовая пластина тол-

щиной 80 см (рис. 27). Глубина погружения ВВ в воду составляла 20, 50 и 80 см. Заряд ВВ представлял собой цилиндр с осевым сечением (16х18) см. Рассчитаны значения максимальных давлений в контрольных точках, скорости свободной поверхности и изолинии давления в системе лед-вода для различного заглубления заряда ВВ. Получено, что увеличение заглубления в воду заряда ВВ приводит к значительному снижению давления во льду и скорости свободной поверхности по зависимости, близкой к гиперболической.




а)–д) – текущие конфигурации в моменты времени 0.0, 0.3, 1.1, 3.5, 9.0 мс
е) – эволюция скорости поверхности льда на оси симметрии
ж) – эволюция давления во льду на оси симметрия. Кривая 1 – на расстоянии 4 см от линии лёд-вода (т.1), кривая 3 – на расстоянии 4 см от свободной поверхности льда (т.3), кривая 2 –срединная точка (т. 2 на рис. б)
з) – эволюция давления во льду на оси симметрия в т. 3

Рисунок 27. Расчет взрыва заряда ТНТ, погруженного в воду на 20 см в системе «лёд–вода–ВВ»

**В заключении** приведены основные результаты и выводы.

**В приложении** приведены документы, подтверждающие внедрение и использование результатов.

Работа выполнена в Томском государственном университете в период с 1978 по 2008г.г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в диссертационной работе исследования по ударному и взрывному нагружению неоднородных материалов и конструкций позволили сформулировать следующие результаты и выводы:

1. На основе предложенного подхода для математического моделирования высокоскоростного деформирования сжимаемого пористого упруговязкопластического материала, учитывающего в явном виде образование отрывных и сдвиговых разрушений разработана новая модификация численного метода моделирования применительно к решению многоконтактных задач удара и взрыва, в том числе глубокого внедрения ударников и сквозного пробития преград. Представляется возможным иметь полную информацию о напряженно-деформированном и термодинамическом состоянии элементов конструкции в любой момент времени, а также получить по времени всю картину внедрения, пробития и образования осколков с учетом ударноволнового характера деформирования и разрушения, как материала ударника, так и преграды. Путем математического моделирования процесса ударноволнового нагружения образцов получены зависимости напряжения течения и коэффициента вязкости в широком диапазоне скорости деформации.

2. Для случая плоской и осевой симметрии в двумерной постановке создан программный комплекс, позволяющий в интерактивном режиме подготавливать начальные данные, включая автоматическое разбиение расчетной области, осуществлять расчет в консольном режиме, а также проводить графическую и табличную обработку полученных результатов. В программе заложена возможность использования пяти различных уравнений состояния для широкого круга конструкционных материалов.

3. Достоверность результатов численного моделирования установлена при помощи решения задач о расчете распада разрыва, о соударении одинаковых цилиндров, об ударе цилиндра по жесткой стенке, о пробитии стальным шариком однородных и двухслойных преград, о глубоком внедрении в преграду удлиненных и сегментированных ударников, а также ударников с оживальной головной частью.

Созданные средства математического моделирования апробированы при решении основных задач удара - сквозного пробития преград и глубокого внедрения ударников. Расхождение расчетных и экспериментальных данных не превысило 7%.

Проведенные тестовые расчеты и сравнение с экспериментом показали, что результаты численного моделирования адекватно передают основные закономерности процессов ударного взаимодействия твердых тел и хорошо согласуются с экспериментальными данными в рассмотренном диапазоне скоростей встречи.

4. Установлено, что при дозвуковой скорости взаимодействия за счет изменения компоновки и формы ударника можно существенно, в некоторых случаях до 80%, увеличить его пробивное действие. Кроме того, спрогнозированы результаты взаимодействия ударников с преградами из различных конструкционных материа-

лов (Ст.3, Д16, ВПС, Ti, Pb), а также выявлено влияние материала 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 одной оболочкой, незначительны. Получено, что ударник с разрезным сердечником имеет большую запреградную скорость при пробитии преград, чем ударник со сплошным сердечником.

Проведенные расчеты показали, 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, в случае глубокого проникания вывод однозначен: ударник с рациональной аэродинамической головной частью обладает большей проникающей способностью.

Расчетным путем установлено существование точки инверсии пробивного действия ударников с оживальной и затупленной головными частями 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 малоудлиненных осесимметричных оболочечных ударников различной компоновки. Получено, что для дозвуковой скорости соударения наибольшим пробивным действием обладает ударник со стальным сердечником цилиндрической формы. Наибольшим остановочным действием обладает ударник со свинцовым наполнителем с открытой конической выемкой. Показано, что путем изменения компоновки и формы ударника можно добиться увеличения на порядок его пробивного действия.

Для сверхзвуковой скорости соударения установлено, что наибольшим пробивным действием обладает также ударник со стальным сердечником цилиндрической формы. Повышенным остановочным действием для толстых преград обладает ударник с конической выемкой, а для тонких преград – ударник со свинцовым наполнителем с закругленной ГЧ и плоской ГЧ. Расчеты показали, что для данной начальной скорости взаимодействия 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.

При моделировании процесса взаимодействия резиновых ударников с тонкими преградами обнаружено наличие затухающих гармонических колебаний линейных размеров ударников. Установлено, что при взаимодействии с тонкой медной преградой снижение скорости центра масс ударника имеет гиперболический характер, а при внедрении в парафиновую преграду с резиновой подложкой – характер, близкий к линейному.

6. На результатах расчетов напряженно-деформированного состояния осесимметричных цилиндрических ударников и ударников с оживальной ГЧ показана возможность применения и перспективность использования разработанной методики компьютерного моделирования 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, укорочения, расширения ударников и времени начала разрушения преград. 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 и времени сквозного разрушения преграды по гиперболической зависимости, а запреградная скорость ударника при этом растет по линейной зависимости. При изменении толщины преграды в пределах 20% время начала инициирования ВВ практически не меняется.

Полученные с использованием разработанного программного комплекса временные зависимости параметров процессов сравнительно несложно могут быть использованы для построения аппроксимационных формул или приближенных инженерных моделей, что представляет особую важность при проведении опытно-конструкторских работ.

7. Показано, что при действии компактных ударников по слоисто-скрепленным преградам с увеличением начальной скорости удара влияние способа скрепления слоев ослабевает, и стойкость преград без скрепления приближается к стойкости однородной преграды такой же толщины. Вычисленные значения критерия стойкости для преград со скрепленными слоями довольно близки к этому варианту и всегда больше, чем для двухслойных преград без скрепления.

В случае действия удлиненных ударников независимо от формы их головных частей наибольшее сопротивление из слоистых преград оказывают преграды со скреплением. Причем, при действии ударника с КГЧ вычисленные значения критерия $R$ были больше, чем при действии ударника с ОГЧ, за исключением варианта $(2+4)$. Детальный анализ динамики процесса пробития в последнем случае показывает, что повышенная стойкость объясняется более сильным, чем в других вариантах, защемляющим действием верхнего слоя преграды.

Установлено, что при действии компактных и удлиненных ударников расположение дополнительного слоя на лицевой поверхности преграды придавало защитной конструкции большую стойкость, чем расположение его на тыльной поверхности независимо от способа скрепления.

8. Установлено, что при нагружении плоской ударной волной преград с градиентом прочностных свойств изменение характеристики, отвечающей за образование сдвиговых разрушений, на общую картину разрушения не влияло. Образование откольной тарелочки при возрастании характеристики, отвечающей за отрывные разрушения, сопровождалось меньшими повреждениями приповерхностного слоя, чем при ее убывании.

Получено, что в случае нагружения градиентных преград компактным ударником быстрее всего снижение его скорости происходит при уменьшении сдвиговой прочности от лицевой до тыльной поверхности. Изменение сдвиговой и откольной

прочности по толщине преграды слабо влияет на глубину внедрения компактного ударника. Наименьший объем разрушения преграды при действии компактного ударника зафиксирован при увеличении отрывной и снижении сдвиговой прочности от лицевой поверхности к тыльной.

При нагружении градиентных преград удлиненным ударником с ОГЧ, в процессе проникания преобладал сдвиговой механизм разрушения. При этом наибольшее снижение скорости центра масс ударника отмечено при увеличении сдвиговой прочности от лицевой поверхности до тыльной. При снижении сдвиговой прочности от лицевой поверхности до тыльной наблюдаются пониженные значения критерия стойкости. При изменении откольной прочности значение критерия стойкости практически не меняется.

Показана возможность применения и перспективность использования разработанной методики численного моделирования для решения задач ударного нагружения функционально-градиентных материалов.

9. Предложенный подход и разработанные на его основе средства математического моделирования позволили проследить во времени динамику деформирования и разрушения льда при ударе и взрыве. Полученные результаты моделирования процесса внедрения компактных ударников в лед по глубине и форме кратера качественно согласуются с экспериментом. Численным моделированием установлено, что увеличение массы заряда ВВ в воде подо льдом приводит к образованию на начальной стадии процесса двух очагов разрушения, которые затем сливаются в один. Увеличение заглубления в воду заряда ВВ приводит к значительному снижению степени разрушения ледовой пластины и снижению по гиперболической зависимости максимального давления во льду и скорости свободной поверхности льда.

10. Разработанные средства математического моделирования и полученные результаты могут быть полезны как для выявления основных закономерностей и механизмов высокоскоростного деформирования и разрушения неоднородных материалов и конструкций, так и при выработке практических рекомендаций по поиску оптимальных путей повышения стойкости перспективных противоударных защит и эффективности действия поражающих элементов.

**Основные положения диссертации изложены в следующих работах:**

***Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов докторских диссертаций***

1. Глазырин В.П., Платова Т.М. О релаксации напряжения сдвига в металлах при ударном нагружении // Физика горения и взрыва. – 1988. – № 1. – С. 79-84.

2. Глазырин В.П., Ольшанская Г.Г., Орлов Ю.Н. Моделирование процесса пробития преград комбинированными ударниками // Вычислительные технологии. – 2002. – Т.7, ч. 2. – С. 144-153.

3. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Моделирование ударного нагружения неоднородных пластин // Вычислительные технологии. – 2002. – Т.7, ч. 2. – С. 154-162.

4. Глазырин В.П., Трушков В.Г., Ольшанский А.Б. Пробитие слоистых преград, содержащих керамические слои // Вычислительные технологии. – 2002. – Т. 7, ч. 2. – С. 163-171.

5. Глазырин В.П. Исследование разрушения льда при импульсном нагружении // Вычислительные технологии. – 2003. – Т. 8, ч. 4. – С. 136-142.

6. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Численный анализ взаимодействия комбинированных ударников с преградами // Вычислительные технологии. – 2003. – Т. 8, ч. 4. – С. 151-156.

7. Глазырин В.П., Орлов М.Ю. Моделирование процесса пробития слоистых преград // Вычислительные технологии. – 2003. – Т. 8, ч. 4. – С. 143-151.

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

9. Глазырин В.П. Ударное и взрывное нагружение льда // Известия вузов. Физика. – 2007. – Т. 50. - № 9/2. – С. 60-65.

10. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Моделирование ударно-волнового нагружения функционально-градиентных материалов // Известия вузов. Физика. – 2007. – Т. 50. – № 9/2. – С. 65-73.

11. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н., Фролов Ю.З. Влияние компоновки ударника на его пробивное действие // Известия вузов. Физика. – 2007. – Т. 50. – № 9/2. – С. 73-79.

12. Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Орлов М.Ю. Моделирование разрушения материалов при ударе и взрыве // Вестник Академии военных наук. – 2008. – № 3 (24). – С. 94-98.

***Публикации в других изданиях***

13. Глазырин В.П., Платова Т.М, Макаров П.В. Структура ударных волн первичного и вторичного сжатия // Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах. – М.: Изд-во ОИХФ АН СССР, 1978. – С. 84-87.

14. Глазырин В.П., Платова Т.М, Саженов А.П. Расчет ударных волн в релаксирующей среде // Прикладные вопросы деформируемых тел: сб. статей. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1980. – С. 14-18.

15. Глазырин В.П., Платова Т.М, Макаров П.В. К дислокационной кинетике пластического течения в ударной волне // Прикладные вопросы деформируемых тел: сб. статей. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1980. – С. 19-22.

16. Глазырин В.П., Платова Т.М, Макаров П.В., Скрипняк В.А. Исследование распространения ударных волн в среде с релаксацией // Нелинейные волны деформации. – Таллин: Изд-во БИТ, ИОТАМ, 1982. – С. 157-161.

17. Глазырин В.П., Саженов А.П. Об одном способе определения параметров дислокационной модели // Механика сплошных сред. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1983. – С. 136-142.

18. Глазырин В.П., Платова Т.М О релаксации напряжения сдвига в металлах при ударном нагружении // Материалы 3 Всесоюзн. сов. по детонации. – Черноголовка: Изд-во ОИХФ АН СССР, 1985. – С. 91-94.

19. Глазырин В.П., Платова Т.М. Численное исследование вязкопластической деформации металлов при импульсном нагружении // Механика деформируемых тел. – Томск: Изд-во ТГУ, 1987. – С. 170-177.

20. Глазырин В.П., Платова Т.М. Вязкие свойства металлов при импульсном нагружении // Инженерно-физический сборник. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1987. – С. 101-109.

21 Глазырин В.П., Платова Т.М. Структура стационарных и нестационарных ударных волн в металле // Вопросы физики и газодинамики ударных волн: Материалы 1 Всесоюзн. совещания. – М.: Изд-во ИХФ АН СССР, 1988. – С. 114-117.

22. Глазырин В.П., Аржанников Г.А. Моделирование динамического нагружения толстостенного цилиндра с учетом упрочнения // Механика деформируемых тел / под ред. В.П. Глазырина. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1992. – С. 47-52.

23. Глазырин В.П., Дульнев А.И., Ольшанская Г.Г., Орлов Ю.Н. Ударное взаимодействие неоднородного осесимметричного ударника с преградой // Международная конференция по судостроению: Материалы конф. – СПб.: Изд-во ЦНИИ им. А.Н. Крылова, 1994. – С. 140-148.

24. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Моделирование пробития слоистых преград комбинированным ударником // Исследование по баллистике и смежным вопросам механики / под ред. И.Б. Богоряда. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999. – Вып. 3. – С. 96-97.

25. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Моделирование откола в пластинах с неоднородностями // Исследование по баллистике и смежным вопросам механики / под ред. И.Б. Богоряда. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2001. – Вып. 4. – С. 68-70.

26. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Моделирование ударного нагружения неоднородных преград // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы III Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. - С. 148-149.

27. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Анализ импульсного нагружения скрепленных преград // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы III Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – С. 150-151.

28. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Поведение неоднородных преград при динамическом нагружении // Исследование по баллистике и смежным вопросам механики / под ред. И.Б. Богоряда. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – Вып. 5. – С. 106-108.

29. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Анализ взаимодействия компактных ударников со скрепленными преградами // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: сб. материалов III научной конференции Волжского регионального центра РАРАН: в 2 т. – Саров: Изд-во РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2004. – Т. 2. – С. 538-543.

30. Глазырин В.П. и др. Анализ процесса пробития многослойной преграды со слоями из функционально-градиентного материала // Наука. Промышленность. Оборона: Труды Всероссийской научно-технической конференции. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – С. 18-19.

31. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Влияние функционально-градиентного слоя на стойкость преграды при действии компактного ударника // Современные техника и технологии: Труды XI Международной научно-практической конференции молодых ученых: в 2 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – Т. 2. – С. 115-116.

32. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлова Ю.Н. Некоторые аспекты пробития удлиненным ударником градиентных преград // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: Материалы докладов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. – Красноярск: Изд-во СибГАУ. – С. 48-49.

33. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Расчет ударноволнового нагружения преград с градиентом прочностных свойств // Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем: Сб. материалов V Международной школы-семинара: в 2 т. – СПб.: Изд-во БГТУ «Военмех», 2006. – Т. 2. – С. 79-80.

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

35. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Расчетно-математическая модель высокоскоростного деформирования структурно-неоднородных преград // Перспективы развития фундаментальных наук: Сб. трудов III Международной конференции. Томск, 16-20 мая 2006 г. – Томск: Изд-во ТПУ. – С. 54-55.

36. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н., Стуканов А.Л. Анализ процесса пробития слоистых преград удлиненными ударниками // Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании: Труды международной конференции. – Павлодар, 2006. – Т. 1. – С. 319-322.

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

38. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Численные исследования ударного нагружения преград с градиентным распределением прочностных свойств // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы конференции. – Томск: Изд-во ТГУ, 2006. – С. 244-245.

39. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н., Платова Т.М. Влияние диаметра преграды на запреградную скорость ударника // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы конференции. – Томск: Изд-во ТГУ, 2006. – С. 246-247.

40. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Моделирование процесса пробития преград неоднородными ударниками // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы конференции. – Томск: Изд-во ТГУ, 2006. – С. 248-250.

41. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Особенности пробития слоистых преград удлиненным ударником // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы конференции. – Томск: Изд-во ТГУ, 2006. – С. 251-252.

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

43. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Численное моделирование процесса пробития многослойных преград удлиненным ударником // Наука. Промышленность. Оборона: труды VIII Всероссийской научно-технической конференции.

Ежегодное приложение к журналу «Вестник академии военных наук». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – С. 89-93.

44. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Исследование пробития однородных и двухслойных преград компактным ударником // Перспективы развития фундаментальных наук: Сб. трудов IV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск 15-18 мая 2007 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 74-76.

45. Glazyrin V.P.**,** Orlov M. Yu.**,** Orlov Yu. N., Kramschenkov E. N. Computation of ice explosive loading // Prospects of fundamental sciences development: Conference proceedings IV International conference of students and yongs scientist. Tomsk 15-18 May 2007. – Tomsk: TPU. – P. 76-78.

46. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Численное моделирование ударно-волнового нагружения функционально-градиентных преград // Решетневские чтения: Материалы XI Международной научной конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика Решетнева М.Ф. (6-10 ноября 2007 г.). – Красноярск: Изд-во СибГАУ, 2007. – С. 167-168.

47. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / Барашков В.Н., Герасимов А.В., Глазырин В.П. и др. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. – 572 с.