

На правах рукописи

Чижова-Ноткина Елена Алексеевна

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ
КОНДЕНСИРОВАННОЙ СРЕДЫ
С ПОЛИМОРФНЫМИ ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2003

Работа выполнена в секторе численного моделирования Физико-Технического института им.А.Ф.Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург.

Научный руководитель:

кандидат физ.-мат. наук
доцент Шмидт А.А.

Официальные оппоненты:

доктор техн. наук
профессор Сильников М.В.

кандидат физ.-мат. наук
профессор Колешко С.Б.

Ведущая организация:

Балтийский Государственный Технический Университет.

Защита состоится ".....".....2003 г. в часов на заседании диссертационного совета Д.212.229.07 в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке СПбГПУ.

Автореферат разослан ".....".....2003 г.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного Совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат.наук, доцент

Д.К.Зайцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации.

Диссертация посвящена численному исследованию динамического (ударного и взрывного) нагружения конденсированной среды, способной претерпевать полиморфные фазовые переходы. Такое исследование представляет интерес для развития теории волновых процессов в конденсированных средах, поскольку рассматриваемое явление включает в себя такие процессы как распространение и взаимодействие ударных волн и волн разрежения друг с другом и со свободными поверхностями, в частности, регулярное и маховское взаимодействие, формирование ударных волн разрежения, образование областей нарушения сплошности. Теория взрывного и ударного нагружения имеет широкий диапазон практических приложений таких как штамповка взрывом, сварка высокоскоростным соударением, взрывное компактирование порошков, кумулятивная резка металлов и т.д. Также существует ряд приложений, основанных на способности веществ претерпевать полиморфные фазовые переходы. К таким приложениям относятся ударный синтез новых веществ (например, алмазов или боразона) и ударноволновая резка железных и стальных конструкций. Ударная сварка, штамповка металлов, взрывная резка, образование новых веществ, их модификаций и фаз, все это связано с процессами, инициируемыми ударными волнами с давлениями $1 - 10^2$ ГПа. Разработка, применение и оптимизация этих технологий требует знания происходящих процессов в каждом конкретном случае, для чего необходимо построение математических моделей, способных описывать поведение материалов при интенсивном динамическом нагружении.

Развитие вычислительной техники открывает возможности для исследования сложных гидродинамических процессов, протекающих при динамическом нагружении конденсированной среды, недоступных для экспериментальной регистрации, методом математического моделирования. Численный алгоритм, построенный в работе, позволяет эффективно моделировать широкий класс плоских и осесимметричных нестационарных течений со свободными поверхностями в рамках эйлерово-лагранжевого подхода.

Цели работы.

Основной целью работы является детальный анализ процессов, происходящих внутри образца конденсированной среды, претерпевающей полиморфные фазовые переходы в ударных волнах, при взрывном и ударном нагружении.

Этой целью продиктована необходимость построения математической модели среды, учитывающей фазовые переходы и разрушение среды, а также численного алгоритма, способного разрешать многомасштабные нестационарные ударно-волновые течения сжимаемой жидкости со свободными поверхностями. Разработка алгоритма включает в себя выбор монотонной численной схемы высокого порядка точности, обеспечивающей адекватное решение уравнений математической модели, обобщение этой схемы для адаптивной неструктурированной расчетной сетки.

В рамках исследования динамического нагружения конденсированной среды необходимо смоделировать взаимодействие ударных волн, волн разрежения со свободными и твердыми поверхностями в разные моменты времени, а также: выявить различия волновых картин при различных условиях нагружения; описать механизм образования областей нарушения сплошности; исследовать регулярные и маховские режимы взаимодействия ударных волн; определить роль волны Маха при формировании разрушения на оси симметрии между двумя импульсами нагрузки.

Научная новизна работы.

Построена новая математическая модель динамической деформации конденсированной среды, учитывающая полиморфные фазовые переходы и разрушение материала.

Создан новый эффективный алгоритм расчета течений сжимаемой жидкости со свободными поверхностями с сильно нелинейным уравнением состояния. Он основан на численной схеме с ограниченной вариацией повышенного порядка точности и методе конечных объемов в приложении к подвижной (лагранжевой) неструктурированной адаптивной расчетной сетке.

Впервые классифицированы режимы косоугольного взаимодействия ударных волн в среде с полиморфным фазовым переходом (на примере железа). Впервые получено аналитическое решение задачи о регулярном косоугольном взаимодействии ударных волн в железе с $\alpha \rightarrow \epsilon$

переходом. Определены критические углы перехода от регулярного взаимодействия к маховскому в зависимости от интенсивности взаимодействующих волн. С помощью численного эксперимента впервые получены подробные волновые картины при регулярном и слабом маховском взаимодействии ударных волн различной интенсивности в железе.

Впервые объяснен и проиллюстрирован эффект образования области нарушения сплошности на оси симметрии при синхронном взрыве двух зарядов ВВ на поверхности железного образца. Проанализировано влияние $\alpha \rightarrow \varepsilon$ фазового перехода и маховского взаимодействия ударных волн на этот эффект.

Практическая значимость работы.

– Разработанный алгоритм позволяет получить детальную структуру гидродинамических полей в образце материала любой формы при различных способах ударного и взрывного нагружения и может быть эффективно использован для решения ряда практических задач.

– Полученные результаты позволили объяснить процессы, используемые в перспективной технологии ударноволновой резки крупногабаритных металлических конструкций, и могут быть применены для ее дальнейшей разработки и оптимизации.

Основные положения, выносимые на защиту.

– Математическая модель динамического нагружения образца конденсированной среды, способной претерпевать полиморфные фазовые переходы.

– Численный метод, использующий метод конечных объемов и технологию TVD-схем для решения уравнений движения сжимаемой жидкости со свободными поверхностями на лагранжевой адаптивной неструктурированной сетке.

– Результаты аналитического и численного рассмотрения регулярного и маховского взаимодействия ударных волн различной интенсивности в среде с фазовыми переходами.

– Распределения полей гидродинамических величин в плоском железном образце при воздействии на него двух синхронных взрывных импульсов различной интенсивности.

Апробация работы.

Результаты включенных в диссертацию исследований докладывались на Всероссийской конференции по механике Вторые Поляховские чтения (Санкт-Петербург, 2000 г.), тринадцатой Всероссийской конференции по теоретическим основам и конструированию численных алгоритмов математической физики (Пушино, 2000 г.), на первом Международном симпозиуме по механике жидкостей (Зао, Япония, 2001г.), восьмой международной конференции по вычислительным методам в науке и технике (Шанхай, Китай, 2001 г.), на 15-ом Международном Симпозиуме по маховскому отражению ударных волн (Аахен, Германия, 2002 г.), а также на семинарах сектора численного моделирования ФТИ им. А.Ф.Иоффе и семинарах Центра ударных волн университета Тохоку (Япония).

Публикации.

Основные результаты диссертации изложены в 8 печатных работах.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 107 страницах, содержит 66 рисунков, 98 литературных ссылок.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 обосновывается актуальность темы диссертации, проводится анализ современного состояния проблемы, формулируются основные цели и задачи исследования и кратко излагается содержание отдельных глав работы.

Глава 2 посвящена исследованию процессов, проявляющихся при динамическом нагружении твердой среды, в частности, способной претерпевать полиморфные фазовые переходы, а также аналитическому рассмотрению некоторых из них.

В п.2.1 описаны способы динамического нагружения тел и формирование в образце импульса давления под действием этой нагрузки; приведена зависимость максимального давления в образце от скорости ударника при ударной нагрузке и описан способ

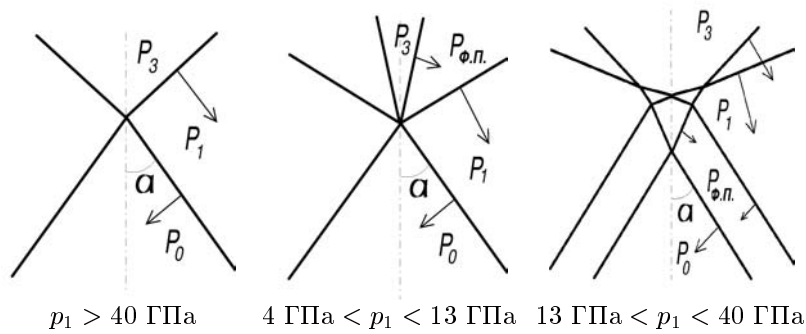


Рис. 1: Различные режимы регулярного взаимодействия ударных волн на оси симметрии при наличии фазового перехода.

определения давления на нагружаемой поверхности при взрывной нагрузке.

В п.2.2 рассмотрены полиморфные фазовые превращения и их влияние на распространение волн, в частности, подробно рассмотрены такие эффекты, как расщепление волн сжатия и формирование ударных волн разрежения. Показана возможность применения уравнений движения однофазной среды для описания деформирования среды с полиморфными фазовыми переходами.

В п.2.3 описывается влияние упругопластичности среды на распространение волн и обосновывается отсутствие необходимости учета упругости при изучаемой интенсивности нагрузок.

В п.2.4 исследуется регулярное и слабое маховское отражение от оси симметрии ударных волн в среде с фазовыми переходами. Аналитическое рассмотрение трех возможных режимов регулярного взаимодействия (рис.1) позволило рассчитать критические углы перехода α_{cr} от регулярного к маховскому отражению при различных интенсивностях ударных волн p_1 для железа. Существование различных режимов отражения волн от плоскости симметрии является причиной того, что зависимость α_{cr} от p_1 имеет два разрыва, как показано на рис.2. При $4 \text{ ГПа} < p_1 < 13 \text{ ГПа}$ даже при углах близких к 90° возможно регулярное взаимодействие, в то время как при p_1 немного больших давления фазового перехода в широком диапазоне углов столкновения реализуется маховское взаимодействие, что отличает рассматриваемые среды от сред, не

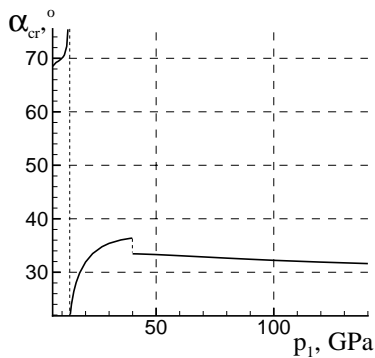


Рис. 2: Зависимость критического угла от давления сталкивающихся волн

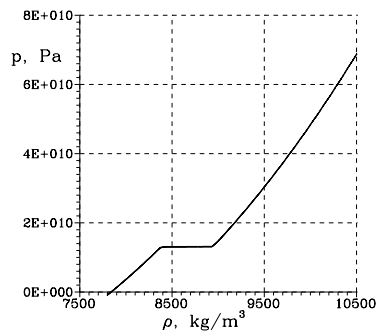


Рис. 3: Зависимость давления "холодного" сжатия от плотности для железа (стали).

подверженных полиморфным фазовым переходам.

В п.2.5 рассматриваются особенности разрушения сред с полиморфным фазовым переходом; обосновывается возможность использования мгновенного критерия разрушения.

П.2.6 посвящен формулировке математической модели динамического нагружения материала, учитывающей наличие полиморфных фазовых переходов и разрушение материала. Математическая модель основана на системе уравнений баланса массы, импульса и энергии для течения сжимаемого невязкого газа, записанных как в цилиндрической, так и в декартовой системе координат. Наличие двух фаз учитывается с помощью сильно нелинейного уравнения состояния. Его параметры в области значений $p < p_{fn}(T)$ соответствуют первой фазе, а в области $p > p_{fn}(T)$ - второй. На рис.3 представлена зависимость давления от плотности при нулевой температуре для железа (стали), характеризующая используемое в расчетах уравнение состояния. Уравнение состояния записывалось в форме Ми-Грюнайзена. Выведено выражение для скорости звука в среде, описываемой уравнением состояния Ми-Грюнайзена.

Ставятся граничные и начальные условия. При использовании нагружения взрывом воздействие детонационной волны на среду моделируется заданием линейной зависимости давления от времени:

$$p = \begin{cases} (p_e - p_0)(1 - t/\Delta t_e) + p_0, & \text{при } t < \Delta t_e; \\ p_0, & \text{при } t \geq \Delta t_e. \end{cases} \quad (1)$$

Глава 3 посвящена построению численного метода и описанию неструктурированной адаптивной сетки.

В п.3.1 описаны характерные особенности задачи и требования к методу моделирования. Обоснован выбор численной схемы из семейства TVD - схем сквозного счета.

В п.3.2 на одномерной тестовой задаче произведен анализ трех схем сквозного счета в приложении к уравнениям, учитывающим фазовый переход. Показано, что лагранжевы расчетные схемы дают значительную ошибку при расчетах в амплитудах и скоростях распространения ударных волн сжатия и разрежения, что связано с сильной нелинейностью уравнения состояния и неконсервативностью этих схем. Выбрана наиболее адекватная схема, которой является эйлерова характеристическая TVD-схема Хартена повышенного порядка аппроксимации. На ее базе построен эйлерово-лагранжев численный алгоритм, путем добавления этапа лагранжевого перестроения сетки.

В п.3.3 разработанный алгоритм обобщен на треугольную подвижную сетку с помощью метода конечных объемов. Описана реализация граничных условий на свободной и нагружаемой поверхностях.

В п.3.4 подробно описано построение неструктурированной лагранжевой треугольной сетки, процедуры адаптации, дробления и слияния расчетных ячеек, алгоритм сглаживания расположения узлов с помощью “пружинок”.

В п.3.5 разработанная программа тестируется на следующих задачах: соударение двух плоских пластин, распад плоского и цилиндрического разрыва поля давления, сужающийся сверхзвуковой поток идеального газа. Результаты тестов свидетельствуют о применимости разработанного численного алгоритма для расчетов двумерных течений с ударными волнами с учетом полиморфных фазовых переходов с параметрами, характерными для задач, решаемых в данной работе. Продемонстрирована сходимость алгоритма по расчетным сеткам на примере задачи о сжатии конической ударной волны в железе с образованием диска Маха.

В главе 4 представлены результаты моделирования одномерных и двумерных задач.

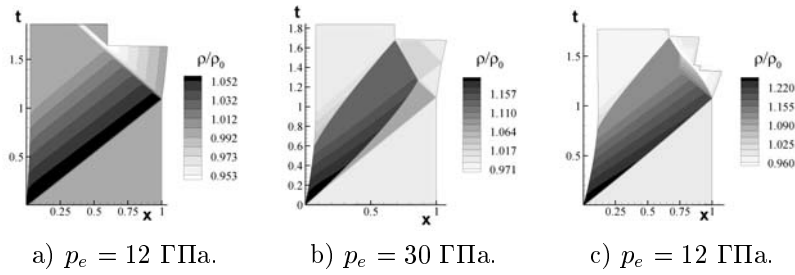


Рис. 4: Различные режимы взрывного нагружения железной пластины. X-t диаграммы безразмерной плотности.

В п.4.1 описаны результаты расчетов нагружения плоских железных пластин взрывом и ударом. Рассматриваются различные режимы распространения волн в образце и его разрушения в зависимости от интенсивности нагрузки и толщины образца. Результаты представлены в виде x-t диаграмм плотности.

В п.4.1.1 изложены результаты моделирования взрывного нагружения железной пластины. Моделирование показало, что, в зависимости от амплитуды импульса нагрузки, а также соотношения толщины пластины и продолжительности нагружения, существует три качественно различных режима взаимодействия взрывной волны с образцом: а) без влияния фазового перехода; б) с расщеплением падающей ударной волны сжатия и ударной волной разрежения; в) с ударной волной разрежения. На рис.4 представлены пример x-t диаграммы для каждого режима при толщине образца 12 мм и длительности нагружения $t_e = 2.18$ мкс.

В п.4.1.2 представлены результаты моделирования откола при соударении двух плоских стальных пластин с параметрами, соответствующими известным экспериментам¹:

- Серия экспериментов 1): скорость соударения $V_0 = 650$ м/с, толщина ударника $L_0 = 1.52$ мм, толщина мишени $L_t = 20 - 40$ мм;
- Серия экспериментов 2) $V_0 = 960$ м/с, $L_0 = 1.06$ мм, $L_t = 5 - 40$ мм;

¹Рыбаков А.П. Отколы в стали при нагружении с помощью взрыва листового заряда ВВ и удара пластиной // ПМТФ, 1977, №1

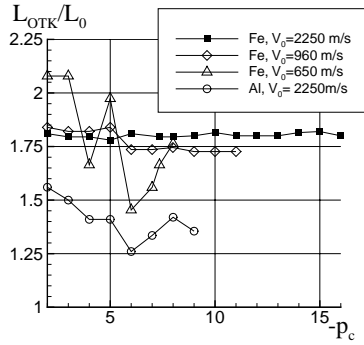


Рис. 5: Зависимость толщины откола от задаваемой откольной прочности.

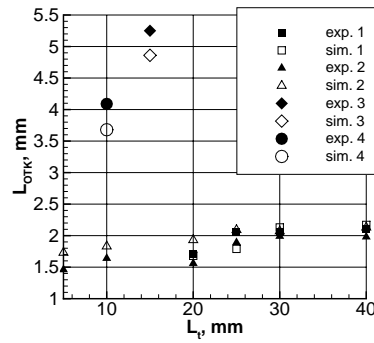


Рис. 6: Толщина откольного слоя при ударном нагружении образца, сравнение с экспериментальными данными.

а также следующим экспериментам²:

- Эксперимент 3) $V_0 = 1800$ м/с, $L_0 = 3$ мм, $L_t = 15$ мм;
- Эксперимент 4) $V_0 = 2250$ м/с, $L_0 = 2$ мм, $L_t = 10$ мм.

Произведенное исследование зависимости толщины откола от задаваемого предела прочности при использовании мгновенного критерия откола (см.рис.5) показало, что в случае взаимодействия двух ударных волн разрежения ($V_0 = 2250$ м/с для железа), а также ударной волны разрежения с гладкой волной с крутым профилем ($V_0 = 960$ м/с) эта зависимость отсутствует. Таким образом, проведенные расчеты показывают, что как для качественного, так и количественного описания разрушения при взаимодействии ударных волн разрежения мгновенный критерий разрушения является вполне достаточным.

На рис.6 представлено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными по толщине откольного слоя для 1)-

²Белов Н.Н., Жуков А.В., Симоненко В.Г. Математическое моделирование полиморфных фазовых переходов в волнах напряжения // Новые методы в физике и механике деформируемого твердого тела: Труды Междунар. конф. – Томск: Изд-во ТГУ, 1990, с.257-264.

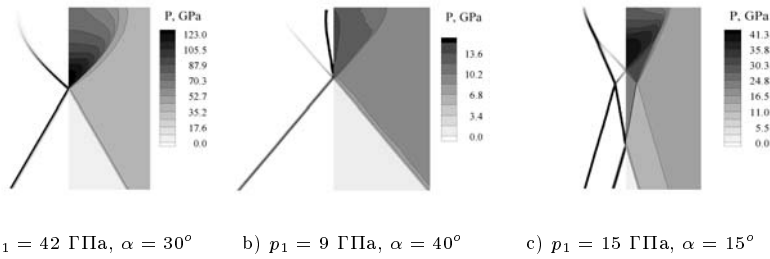


Рис. 7: Различные режимы регулярного взаимодействия ударных волн в железе, изолинии градиента плотности (слева) и давления (справа)

4). Закрашенными значками представлены экспериментальные точки, незакрашенными - соответствующие расчетные. Получено удовлетворительное соответствие.

Полученные результаты (рис. 6) свидетельствуют о применимости используемой математической модели и способов учета фазового перехода и разрушения для описания динамического нагружения железа.

В п.4.2 описаны результаты расчетов косоугольного взаимодействия ударных волн в металлах. В частности, в качестве теста применимости модели сжимаемой жидкости для описания деформации металла, производится сравнение результатов расчета маховского взаимодействия ударных волн в алюминии с экспериментальными данными Альтшулера³. Получено хорошее совпадение расчетного угла Ψ траектории движения тройной точки относительно оси симметрии с экспериментальными данными(рис.9).

Проанализированы различные режимы регулярного и маховского взаимодействия ударных волн в железе в зависимости от их амплитуды. Расчетные картины регулярного взаимодействия ударных волн в железе (рис.7) совпадают с аналитическими предсказаниями (рис.1). Для маховского взаимодействия ударных волн в железе также было получено три режима (см. рис.8). В области давлений $4 \text{ ГПа} < p_1 < 13 \text{ ГПа}$ маховское взаимодействие реализует-

³Альтшулер Л.В., Кормер С.Б., Баканова А.А. и др. Нерегулярные режимы косоугольного столкновения ударных волн в твердых телах.// ЖЭТФ, 1961, т.41, вып.511, с.1382-1393

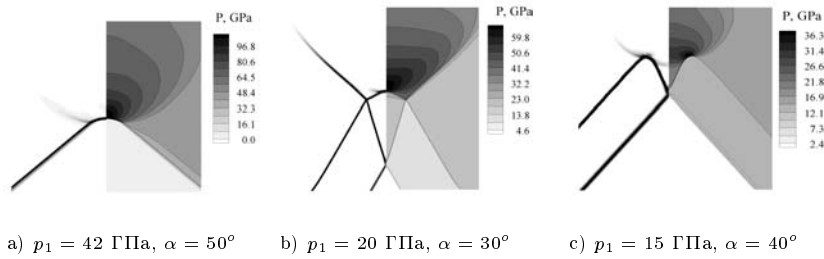


Рис. 8: Различные режимы маховского взаимодействия ударных волн в железе, изолинии градиента плотности (слева) и давления (справа)

ся при настолько больших углах взаимодействия (близких к 90°), что его не удалось выделить. Во всех случаях волновая конфигурация является автомодельной. В первом случае отражение происходит также, как и в средах, не претерпевающих полиморфных фазовых переходов (рис.8a). В случае с расщеплением падающей волны, первая ударная волна всегда отражается от оси симметрии регулярным образом, маховский скачок формируется либо на оси симметрии при отражении второй ударной волны, в которой происходит фазовый переход (рис.8b), либо при взаимодействии первой отраженной волны со второй падающей (рис.8c). На рис.10 изображены расчетные зависимости максимального давления на оси симметрии в области за отражением от угла столкновения волн для разных интенсивностей p_1 .

В п.4.3 описаны результаты расчетов схождения конической ударной волны в железе.

В п.4.4 представлены результаты расчетов взаимодействия двух синхронных взрывных импульсов в железе. На рисунке 6 приведены результаты расчета со следующими параметрами, приближенными к условиям технологии ударноволновой резки, где $p_e = 48$ ГПа.

Основные результаты диссертации сформулированы в Заключение:

1. Рассмотрены основные физические явления, происходящие в конденсированной среде, способной претерпевать полиморфные фазовые переходы в ударных волнах, под воздействием ударных и взрывных нагрузок.

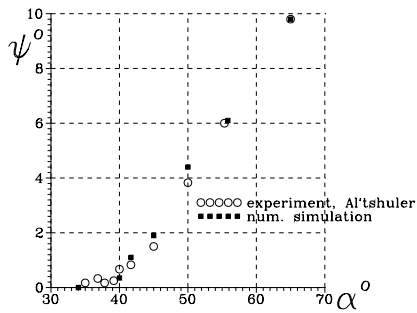


Рис. 9: Зависимость угла движения тройной точки от угла столкновения волн для алюминия

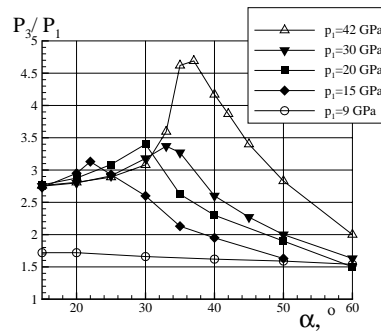


Рис. 10: Отношение максимального давления на оси симметрии к давлению в падающей волне в зависимости от угла ее падения на ось.

2. Сформулирована математическая модель импульсного нагружения конденсированной среды, учитывающая полиморфные фазовые переходы и образование областей нарушения сплошности при взаимодействии волн разрежения.
3. Получено аналитическое решение задачи о регулярном взаимодействии ударных волн в среде с полиморфными фазовыми переходами. Определены критические углы перехода от регулярного взаимодействия к маховскому в зависимости от интенсивности взаимодействующих волн для железа.
4. Создан эффективный алгоритм расчета течений сжимаемой жидкости со свободными поверхностями с сильно нелинейным уравнением состояния. Он основан на численной схеме с ограниченной вариацией повышенного порядка точности и методе конечных объемов в приложении к подвижной (лагранжевой) неструктурированной адаптивной расчетной сетке.
5. Классифицированы и подробно описаны различные случаи распространения волн и формирования разрушения в плоском

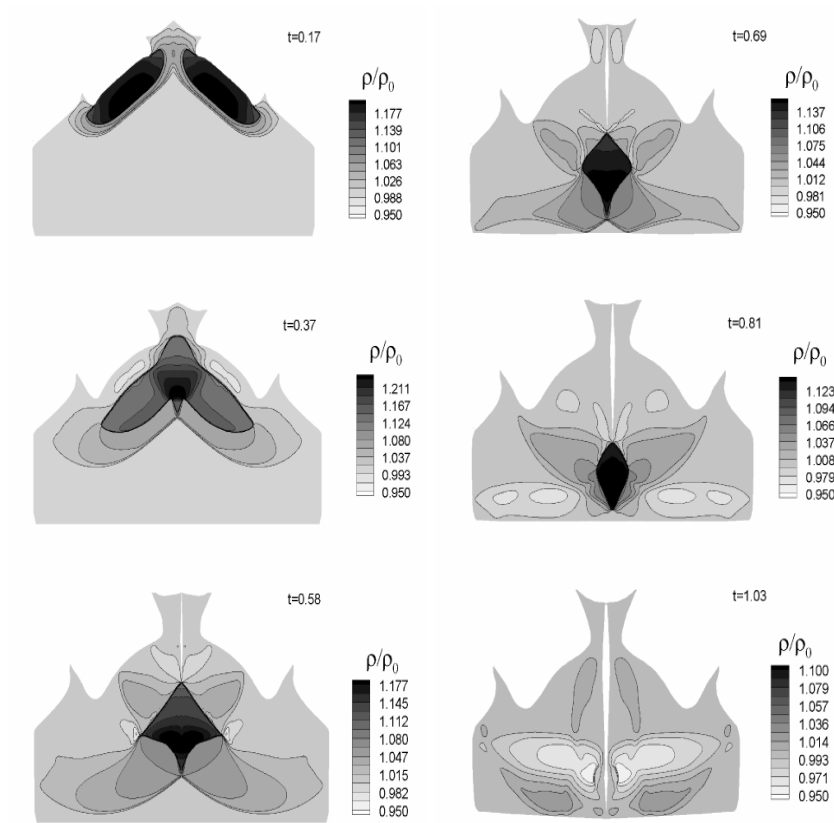


Рис. 11: Взаимодействие двух взрывных волн в железе, изолинии плотности, $\alpha = 55^\circ$, $p_e = 48$ ГПа.

образце. Исследовано влияние задаваемой откольной прочности на результаты расчета.

6. Получены подробные автотомельные волновые картины при различных режимах регулярного и слабого маховского взаимодействия ударных волн в железе, которые реализуются в зависимости от интенсивности сталкивающихся волн. Определен рост относительного давления на оси симметрии за отраженными волнами в различных случаях.
7. Исследованы нестационарные волновые картины течения при взаимодействии двух взрывных импульсов в железе. Объяснен и проиллюстрирован эффект образования области нарушения сплошности на оси симметрии при синхронном взрыве двух зарядов ВВ на поверхности железного образца.

Публикации по теме диссертации

- [1] Е. А. Ноткина, А. В. Чижов. Численное моделирование разрушения металла ударной волной // 26-ая неделя науки СПбГТУ: Тез. докл.- СПб, 1998. - С.35-36
- [2] Е. А. Ноткина, А. В. Чижов, А. А. Шмидт. Моделирование разрушения упруго-пластических материалов, допускающих фазовый переход // Письма в ЖТФ.-1998. - т.24, вып.18. - С.89-91.
- [3] Ю. П. Головачев, Е. А. Ноткина, А. В. Чижов, А. А. Шмидт. Алгоритм расчета ударно-волновых течений со свободными поверхностями // ЖВММФ. -2000.- т.20, вып.12. - С. 151-162.
- [4] Е. А. Ноткина, А. В. Чижов, А. А. Шмидт. Численное моделирование деформации и разрушения среды с полиморфными фазовыми превращениями // II-е Поляховские чтения: Тез. докл.- С.-Петербург, СПбГУ, 2000. - С.130-131.
Е. А. Ноткина, А. В. Чижов, А. А. Шмидт. Численное моделирование деформации и разрушения среды с полиморфными фазовыми превращениями // Труды II Поляховских чтений. С.-Петербург, СПбГУ, 2000, (принята к публ.), 8 стр.

- [5] Е.А.Ноткина, А.В.Чижов. Распространение импульса давления в железе //Труды СПбГТУ, (принята к публ.), 9 стр.
- [6] E.A.Notkina, A.V.Chizhov, A.A.Schmidt. Numerical simulation of shock loading of materials in presence of polymorphous phase transitions //8th International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science: Abstract. - Shanghai, 2001.-P.443-444.
E.A.Notkina, A.V.Chizhov, A.A.Schmidt. Numerical simulation of shock loading of materials in presence of polymorphous phase transitions.//Proceedings of the 8th International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science.- Shanghai, 2001 (на CD), 7 стр.
- [7] E.A.Notkina, A.V.Chizhov, A.A.Schmidt. Numerical simulation of shock loading of materials in presence of polymorphous phase transitions // Proceedings of the 1st International Symposium on Advanced Fluid Information. - Zao, 2001. - pp.559-562
- [8] E.A.Notkina, A.A.Schmidt. Interaction of shock waves in iron // Abstracts of the 15th Int. Mach Reflection Symposium, Aachen University, 2002. - p.33.