

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



**Фортова Светлана Владимировна**

**Численное моделирование задач механики сплошных сред с  
применением разработанного исследовательского пакета  
прикладных программ HYPERBOLIC\_SOLVER**

Специальность 05.13.18

«Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки  
Институт автоматизации проектирования РАН (ИАП РАН)

**Официальные оппоненты:**

**Четверушкин Борис Николаевич,**

доктор физико-математических наук,  
профессор, академик РАН, ФГУ  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной математики им.  
М.В. Келдыша РАН», научный  
руководитель ИПМ им. М.В. Келдыша  
РАН;

**Лобанов Алексей Иванович,**

доктор физико-математических наук,  
профессор, ФГАОУ ВО «Московский  
физико-технический институт  
(национальный исследовательский  
университет)», профессор кафедры  
«Вычислительной физики»;

**Левин Владимир Анатольевич,**

доктор физико-математических наук,  
профессор, МГУ имени М.В. Ломоносова,  
механико-математический факультет,  
отделение механики, профессор кафедры  
«Вычислительной механики».

Защита диссертации состоится 23 декабря 2020 г. в 15 час. 30 мин. на заседании  
диссертационного совета МГУ.01.09 Московского государственного университета  
имени М.В. Ломоносова по адресу: Российская Федерация, 119991, Москва,  
Ленинские горы, д.1, строение 52, факультет ВМК, аудитория 685.

E-mail: [ilgova@cs.msu.ru](mailto:ilgova@cs.msu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки  
МГУ им. М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27). Со сведениями о  
регистрации участия в защите в удаленном интерактивном режиме и с диссертацией  
в электронном виде также можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»:  
<https://istina.msu.ru/dissertations/324415047/>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета МГУ.01.09,  
д.ф.-м.н., проф., член-корр. РАН



Ильин А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

**Актуальность темы исследования.** Настоящая работа посвящена разработке вычислительных методик и созданию пакета прикладных программ для численного решения задач механики сплошных сред, описываемых системой дифференциальных уравнений гиперболического типа. Созданный пакет использован для математического моделирования ряда задач нестационарной механики сплошной среды – трехмерного моделирования вихревых каскадов, задачи Колмогорова, гиперзвукового столкновения металлических пластин, действия фемтосекундного лазерного излучения на конденсированные мишени.

Возникшая для решения острых и ответственных задач атомной, авиационно-космической и оборонной техники, наука о численном моделировании превратилась сегодня в эффективный, совершенный и обширный раздел научного знания, без которой невозможен прогресс практически всех современных направлений человеческой деятельности.

Особого развития методы математического моделирования получили применительно к современным задачам нестационарной и многомерной механики сплошных сред [1,2], характеризующихся тем, что описывающие их соотношения представляют собой сложную нелинейную систему дифференциальных уравнений в частных производных, для которых пока что не получены точные аналитические решения. Газодинамические процессы играют важную роль в природных явлениях и жизни человека. Работа турбин, двигателей внутреннего сгорания, дыхание человека и животных, распространение загрязнений в атмосфере и океанах, полеты летательных аппаратов, атмосферные явления, функционирование систем вооружений, экстремальные процессы при релятивистском столкновении ядер, процессы деления и синтеза в горячей плазме и многие другие физические процессы являются предметом изучения газовой динамики. С развитием компьютерной техники, магистральным, а часто и практически единственным прагматическим направлением изучения нелинейных нестационарных задач газовой динамики стало применение численных методов.

Актуальность развития методов решения, алгоритмов и разработка программных продуктов для решения задач нелинейной газовой динамики очевидна, т.к. этот компьютерный подход наиболее информативен, доступен для использования большими коллективами и отдельными инженерами и учеными. В настоящее время благодаря развитию теории разностных схем, методов решения задач механики сплошной среды и интенсивному увеличению производительности компьютерной техники, возникла возможность создания многоцелевых высокоэффективных программных пакетов для решения широкого круга задач газовой динамики. Создание подобного программного обеспечения позволяет поднять на новый уровень процесс проведения научных исследований и приводит к значительному ускорению научно-технического прогресса.

Большой вклад в развитие современных методов вычислительной гидродинамики внесли выдающиеся отечественные учёные – академики О.М. Белоцерковский, С.К. Годунов, А.А. Самарский, Б.Н. Четверушкин, А.С. Холодов, В.А. Левин; их всемирно известные научные школы и ученики в первом, втором и третьем поколениях [1-11]. Разработанные к настоящему времени численные методы высокой эффективности позволяют получать физически содержательные результаты для многих ответственных нестационарных пространственных задач механики сплошных сред. При этом численные методы именно в газодинамике превратились в необходимый и широко используемый в современной инженерной практике инструмент создания конкретных технических изделий.

При решении современных задач механики сплошных сред возникает особая проблема перехода к предельно высоким (экстремальным) состояниям, занимающим новые, слабо изученные участки фазовых диаграмм материалов. Необходимость численного моделирования новых задач механики экстремальных состояний особенно актуальна сегодня, когда бурный прогресс в численных методах на базе современных ЭВМ пета- и экса-флопной производительности привел к разработке эффективных разностных схем расчета нестационарных газодинамических явлений [13,14]. Данный прогресс резко повысил требования к адекватному и детальному описанию термодинамических свойств вещества, так как точность газодинамических расчетов определяется теперь не только погрешностями в решении газодинамических дифференциальных уравнений, но и погрешностями в уравнениях состояния рассматриваемой среды.

При этом, одной из важных практических задач является создание высокоэффективных пакетов прикладных программ, позволяющих широкому кругу пользователей формулировать и решать научные и инженерные задачи при разнообразных начальных и граничных условиях. Как правило, создание таких многофункциональных кодов является сложным и затратным процессом, требующим трудозатрат в сотни человеко-лет [1]. Необходимы годы слаженной работы большого коллектива для написания, тщательного тестирования кодов и сравнения полученных результатов с натурными экспериментами. В 1999 году в ИАП РАН академиком О.М. Белоцерковским была поставлена задача создания такого компьютерного пакета, который содержал бы в себе набор надежных математических моделей и численных алгоритмов для задач, описываемых системой уравнений гиперболического типа. Предпосылками к созданию такой технологии являлся тот факт, что среди множества задач гидродинамики, можно выделить круг проблем, схожих между собой, и которые могут быть объединены в рамках сходных подходов к их решению [6,13].

Отметим, что для решения сопряженных (связанных) задач взаимодействия жидкости/газа и деформируемого твердого тела (fluid-solid interaction — FSI) необходимо, помимо гидрогазодинамического пакета, использовать программный комплекс для прочностного инженерного анализа. В РФ с 2009 года активно

развивается и используется в различных отраслях промышленности пакет CAE Fidesys, возникший на кафедре вычислительной механики механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Несмотря на существование разнообразных программных пакетов и библиотек, многие исследователи пишут свои собственные программы – в основном, потому что большинство этих пакетов не настолько гибки, как это необходимо исследователям. Пакеты часто не являются переносимыми, они поддерживают ограниченное количество методов, их очень тяжело интегрировать с другими программами. Часто многие из них не имеют параллельных версий.

**Целью** данной работы является создание универсального многоцелевого пакета прикладных программ **HYPERBOLIC\_SOLVER**, способного моделировать на основе системы уравнений Эйлера нестационарные газодинамические явления при широком наборе физико-математических моделей, начальных, граничных условий, уравнений состояния вещества и т.п.

Для облегчения разработки программ численного моделирования задач механики сплошной среды с использованием набора численных методик и современного программного обеспечения в диссертации предлагается использовать унифицированный каркас приложений, который представим в виде общего ядра, встречающегося во всех программах для численного моделирования, лежащих в описанном пространстве моделей. Разработанный программный продукт представляет собой универсальный, гибкий, расширяемый, открытый, ориентированный на стандарты каркас для построения солверов для параллельных компьютеров. Каждый альтернативный алгоритм (описывающий метод, модель и т.п.) представлен определенным «строительным» блоком, встраиваемым в каркас. Наиболее полезные и часто используемые блоки предоставлены наряду с каркасом в том же программном продукте. Каркас имеет открытый интерфейс для пользователей, которые могут подключать через данный интерфейс иные физические модели, методы, солверы, визуализаторы и другие компоненты. Для построения данного каркаса необходимо базироваться на универсальной, гибкой и расширяемой методике. В диссертации описывается такая методика, представляется ее реализация в программном пакете и рассматриваются результаты применения данного пакета к численному моделированию ряда задач механики сплошных сред.

Отметим, что особым фактором при эффективном использовании пакета программ для решения конкретной задачи является возможность его массового применения на персональных компьютерах с последующим переносом кода на супер ЭВМ. Разработка подобного пакета позволяет значительно сократить время решения задачи на этапе тестирования математической модели и подбора эффективного численного алгоритма, а также является инструментом для проведения экспертных расчетов качественного характера.

Необходимость решения такой задачи подтверждается мнением академика А.А. Самарского [1]: «Программный продукт должен учитывать важнейшую

специфику математического моделирования, связанную с использованием ряда математических моделей и многовариантностью расчетов. Это подразумевает широкое использование комплексов и пакетов прикладных программ, разрабатываемых, в частности, на основе объектно-ориентированного программирования. Мощные компьютеры, высокоэффективные вычислительные алгоритмы, современное программное обеспечение позволяют организовать научные исследования в рамках единой технологии вычислительного эксперимента, который включает в себя теоретические и экспериментальные исследования. Многоцелевая направленность и методологическая универсальность вычислительного эксперимента позволяет на основе накопленного опыта математического моделирования, банка вычислительных алгоритмов и программного обеспечения быстро и эффективно решать новые задачи».

При создании предлагаемого в диссертации программного продукта были реализованы его следующие свойства:

1. Продукт представляет собой универсальный, гибкий, расширяемый, открытый, ориентированный на принятые стандарты комплекс программ для построения солверов для параллельных компьютеров;
2. Каждый альтернативный алгоритм (описывающий метод, модель и т.п.) представляет собой отдельный блок, легко встраиваемый в комплекс программ. При этом наиболее полезные и часто используемые блоки предоставляются в том же программном продукте;
3. Комплекс программ имеет открытый интерфейс для пользователей, которые могут подключать через него разные физические модели, методы, солверы, уравнения состояния вещества, визуализаторы и иные компоненты. Построение данного комплекса базируется на универсальной гибкой и расширяемой методике;
4. Пакет программ совместим с наиболее распространенными операционными системами и может быть включен в качестве составляющего в другие более мощные современные пакеты программ.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Создан комплекс программ **HYPERBOLIC\_SOLVER** для численного исследования широкого спектра задач механики сплошных сред на параллельных ЭВМ. Возможности пакета продемонстрированы на примерах решения различных задач механики сплошных сред.
2. Разработан линеаризованный вариант классической схемы Годунова с нелинейными распадами разрывов.
3. Рассмотрены современные требования и особенности полуэмпирических уравнений состояния вещества, являющихся необходимым элементом для моделирования газодинамических явлений при экстремально высоких давлениях и температурах.

4. Проведено численное исследование плоских и пространственных нестационарных течений в сдвиговых слоях сжимаемой невязкой среды.
5. Проведено численное моделирование двумерного течения Колмогорова при наличии периодической внешней силы. Получено течение «паркет» Колмогорова и обратный вихревой каскад.
6. Численно исследована газодинамика нестационарных ударно-волновых явлений в задаче о высокоскоростном соударении разогнанных взрывом металлических пластин с использованием полуэмпирических уравнений состояния вещества и их упрощенных вариантов.
7. Воспроизведено наблюдаемое во взрывном эксперименте образование кольцевых волновых структур из-за развития неустойчивости Рэля-Тейлора. Результаты расчетов находятся в соответствии с экспериментом.
8. Проведено двумерное численное моделирование задачи о формировании отверстий при фемтосекундной лазерной абляции.
9. Воспроизведено наблюдаемое в лазерных опытах десятикратное превышение образовавшегося лазерного отверстия от размера фокального лазерного пятна. Предложен механизм такого превышения, основанный на боковом отрыве металла при ударном расширении ударно-сжатой диэлектрической подложки.

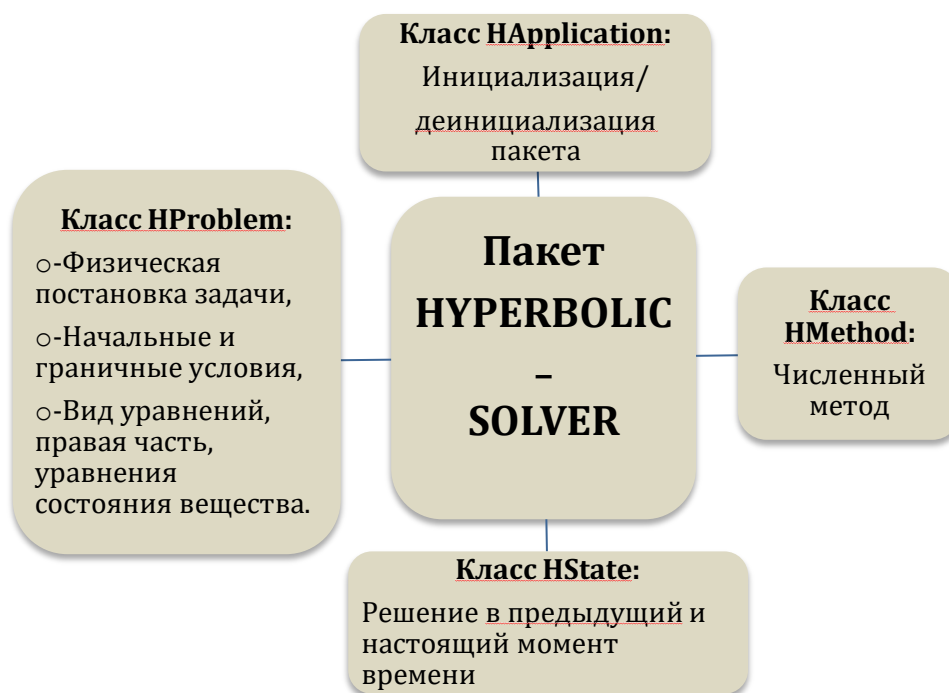
#### **Научная новизна.**

1. Разработана эффективная программная технология для численного моделирования задач, описываемых системами уравнений гиперболического типа, которая позволяет эффективно решать задачи моделирования газодинамических течений в широком диапазоне физико-математических моделей, начальных и граничных условий и уравнений состояния вещества. На основе разработанной технологии создан комплекс программ **HYPERBOLIC\_SOLVER** для численного исследования широкого спектра задач механики сплошных сред на параллельных ЭВМ.
2. Разработан и исследован линеаризованный вариант схемы Годунова. Показано, что данный вариант схемы обладает свойством гарантированного неубывания энтропии, позволяющим воспроизводить её рост на ударных волнах.
3. Разработана и включена в комплекс программ **HYPERBOLIC\_SOLVER** методика использования полуэмпирических уравнений состояния вещества.
4. Показано определяющее влияние трехмерных явлений на возникновение и развитие вихревого каскада в сдвиговом слое. Подтверждена ведущая роль крупных вихрей в зарождении и развитии вихревого каскада. Проведено моделирование течений с вихревыми структурами в сдвиговом слое при наличии периодических внешних сил. Исследована форма пульсаций и корреляций компонент скорости в сдвиговом слое, находящееся в соответствии с экспериментальными результатами.
5. Исследован процесс формирования «паркета» Колмогорова в слое слабо сжимаемой идеальной среды. Для двумерного режима течения получены прямой

и обратный вихревые каскады. Показано, что на формирование вихревого «паркета» существенное влияние оказывают начальные условия.

6. Показано развитие неустойчивости Рэля-Тейлора на границе раздела металлов с образованием кольцевых кратеров в задаче о высокоскоростном соударении разогнанных взрывом металлических пластин. Расчет выполнен с применением широкодиапазонных полуэмпирических уравнений состояния вещества.
7. Предложено объяснение и описание отрыва металлической пленки от диэлектрической подложки на основе ударно-волнового механизма разрушения для технологической задачи о формировании отверстий при фемтосекундной лазерной абляции. В расчетах воспроизведено наблюдаемое в технологических лазерных экспериментах значительное (в 10 раз) превышение наблюдаемых размеров отверстий над размерами фокального лазерного пятна.

**Степень разработанности темы.** В рамках одного математического формализма в созданном пакете прикладных программ **HYPERBOLIC\_SOLVER** имеется возможность применять различные численные методики; устанавливать широкий спектр граничных, начальных условий и внешних сил; использовать различные уравнения состояния; применять различные средства отображения и обработки данных. В том числе реализована возможность подключать к существующему интерфейсу новые программные «солверы» и отдельные блоки. Подчеркнем, что при включении новых моделей и алгоритмов блок распараллеливания остается неизменным. Для включения в код новых элементов пользователю достаточно внести изменения только в те части пакета, которые отвечают за физическую постановку задачи, за выбор численной методики, граничных, начальных условий, внешних сил и уравнений состояния вещества и иных новых блоков. Для облегчения разработки программ численного моделирования задач, описываемых гиперболической системой уравнений, в данной работе предлагается использовать унифицированный каркас приложений в виде общего вычислительного ядра, характерного для всех программ численного моделирования, лежащих в выбранном наборе моделей (см. **Рис.1**).



*Рис.1* Диаграмма основных классов пакета **HYPERBOLIC\_SOLVER**

**Теоретическую и практическую значимость** представляют созданный пакет прикладных программ **HYPERBOLIC\_SOLVER**, разработанная новая численная методика, внедренные в пакет программ широкодиапазонные полуэмпирические уравнения состояния вещества, а также результаты решения практических задач, полученные с помощью этого пакета. Разработанный пакет позволяет существенно упростить и ускорить проведение научных и инженерных исследований. Это достигается благодаря быстрому внедрению и значительному сокращению затрат на проведение экспериментов. Полученные результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными, что позволяет в конечном итоге заменить многие натурные исследования численными. Пакет может быть применен в различных отраслях науки, техники и производства (авиакосмическая техника, системы вооружений, экология, анализ чрезвычайных ситуаций, оборонное и гражданское применение взрывов, реактивные двигатели, медицина и т.д.).

Представленная методика имеет **государственную регистрацию программ для ЭВМ N 2013618035**.

Партнерами автора диссертации по научной деятельности являются: Институт Теоретической физики им. Ландау РАН, Институт Физики твердого тела РАН, Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Физический Институт РАН, Институт Проблем Химической Физики РАН, Институт математики СО РАН.

При помощи пакета прикладных программ **HYPERBOLIC\_SOLVER** исследованы следующие задачи механики сплошной среды:

- вихревые газодинамические явления, происходящие в сдвиговых слоях;
- обратный и прямой каскады неустойчивостей в течении Колмогорова;

- процессы, возникающие на поверхности металлов при высокоскоростном соударении металлических пластин;
- задачи воздействия мощного фемтосекундного лазерного излучения на металлические пленки.

**Методы исследования.** Основным методом исследования в настоящей работе является вычислительный эксперимент. В диссертации исследуются вопросы, связанные с численным решением задач, описываемых системами уравнений гиперболического типа. Рассмотрены особенности программных реализаций алгоритмов и отображений этих алгоритмов на архитектуру многопроцессорных ЭВМ.

Используемые в работе параллельные алгоритмы и программные комплексы построены на основе объектно-ориентированного подхода. Эта методика программирования основана на представлении программы в виде совокупности объектов, каждый из которых является элементом определённого класса. В пакете **HYPERBOLIC\_SOLVER** применяется стандартный интерфейс обмена сообщениями MPI, что позволяет использовать его на разных платформах, под управлением различных операционных систем, не модифицируя при этом программный код, написанный на языке C++. В пакете **HYPERBOLIC\_SOLVER** используется модель программирования SPMD (Single Program, Multiple Data), в которой одновременно исполняются несколько копий одной программы параллельно на разных процессорах. Каждый процесс программы выполняет одну и ту же программу, но в зависимости от своего номера выполняет свою порцию вычислений. Существует один мастер-процесс, который кроме выполнения общей для всех процессов вычислительной части, также управляет другими процессами и осуществляет ввод/вывод данных задачи. Достоинством этой модели является возможность поддерживать одну версию программного кода, в котором количество процессоров задается в качестве параметра. Пакет **HYPERBOLIC\_SOLVER** предоставляет пользователю возможность запуска результирующей программы, как состоящей только из одного процесса, так и на кластере машин с различными операционными системами при использовании соответствующих реализаций MPI. Пакет **HYPERBOLIC\_SOLVER** тестировался на платформах: Intel, Param, MBC-1000, с операционными системами: Windows, Solaris, Linux, использовались реализации MPI: WMPI и MPICH.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Программный продукт **HYPERBOLIC\_SOLVER** для численного моделирования широкого спектра задач нестационарной механики сплошных сред. Возможности пакета продемонстрированы на серии различных задач, описываемых системой уравнений гиперболического типа.
2. Линеаризованная версия классической схемы Годунова с нелинейными распадами, в которой распады разрывов заменены их упрощенными вариантами.

Численно исследованы задачи о распадах сильных разрывов. Установлены зависимости ширины фронта ударных волн и времени их образования от выбора числа Куранта и шага расчетной сетки.

3. Современные требования и особенности полуэмпирических уравнений состояния вещества. Предложены численные модели процесса высокоскоростного соударения металлических пластин с учетом двухкомпонентного уравнения состояния вещества.
4. Численное моделирование развития вихревого каскада в сдвиговом слое невязкой среды при переходе от двумерного к трехмерному течению. Показано влияние начальных, граничных условий, ширины сдвигового слоя и величины сдвиговых скоростей на возникновение вихревого каскада; с точностью 20 процентов подтвержден «закон  $-5/3$  Колмогорова» на инерционном участке энергетического спектра.
5. Расчет двумерного течения Колмогорова при наличии периодического поля внешней силы. Проведено моделирование процесса формирования режима течения типа «паркет» в слое сжимаемой идеальной среды. В расчетах получены прямой и обратный каскады и крупномасштабные когерентные структуры. Показана роль начальных условий на формирование вихревого «паркета».
6. Численное моделирование процессов, происходящих при высокоскоростном столкновении разогнанных взрывом химических ВВ металлических пластин с использованием различных уравнений состояния вещества. Результаты численных экспериментов показывают наличие трехмерной неустойчивости Рэлея-Тейлора на контактной границе раздела металлов, приводящие к образованию кольцевидных кратеров. Проведено сравнение результатов численных экспериментов с данными натуральных технологических экспериментов.
7. Численное моделирование механизма формирования технологических отверстий при фемтосекундной лазерной абляции золотой пленки, напыленной на толстую стеклянную подложку. На основе ударно-волнового механизма дан теоретический и численный анализ механизма отрыва пленки. В расчетах воспроизведено наблюдаемое в технологических лазерных экспериментах вызванное боковым разлетом значительное (до 10-ти раз) превышение наблюдаемых размеров отверстий над размерами фокального лазерного пятна.

**Достоверность** результатов подтверждена многочисленным и всесторонним тестированием кода, специальными исследованиями устойчивости и сходимости решений на различных сетках, сравнением результатов расчетов с данными теории, автомодельными решениями классических задач, а также непосредственным сравнением с экспериментальными данными. Пакет прикладных программ **HYPERBOLIC\_SOLVER** тестировался на одномерных задачах: задаче о распаде разрыва, на тестах Лакса и Сода, Торо. Многомерное тестирование проводилось на задаче о двойном маховском отражении, которая моделировалась с помощью разных числовых схем и алгоритмов. Также проведено сравнение различных

разностных схем, используемых в разработанном пакете программ на различных сеточных шаблонах.

На основе численного моделирования воспроизведены эффекты, зафиксированные в натуральных экспериментах:

- ✓ переход к развитому вихревому течению в сдвиговых слоях через прямой вихревой каскад неустойчивостей,
- ✓ двумерные когерентные структуры типа «паркета» Колмогорова, обратный вихревой каскад,
- ✓ кольцевидные структуры на поверхности металлических пластин при высокоскоростном ударе,
- ✓ отрыв тонкой металлической пленки с поверхности толстой диэлектрической подложки при лазерной абляции.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на российских и международных конференциях, семинарах и симпозиумах:

- Turbulent Mixing and Beyond International Conference and Advanced School, 2010, 2012, 2014, 2016 Trieste, Italy;
- Russian-Japanese Workshop on Computer Sciences, November 2010, Moscow, Russia;
- 12th International Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing, July 2010, Moscow, Russia;
- International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, 2011-2019, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia;
- Russian-Indian Workshop on Computational Physics and Mathematics, September 2011, Moscow, Russia;
- Международная конференция «Турбулентность и волновые процессы», 2013, МГУ, Москва, Россия;
- XII International Symposium on Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations (EPNM-2014), 2014, Poland;
- International Symposium on Convective Heat and Mass Transfer, 2014, Turkey;
- 57-я научная конференция МФТИ, ноябрь 2014, Московская обл., Долгопрудный, Россия;
- VIII школа-семинар «Современные проблемы нелинейной механики», апрель 2015, МАМИ, Москва, Россия;
- Конференция «Современные проблемы электрофизики и электродинамики», 2015, Санкт-Петербург, Россия;
- 11-й Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 2015, Казань, Россия;
- XIII International Symposium on Explosive Production of New Materials: Science,

- Technology, Business, and Innovations (EPNM-2016), 2016, Coimbra, Portugal;
- XXII международная конференция «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность», 2016, Москва, Россия;
  - Всероссийская конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых, 19-25 сентября 2016, Ялта, Крым;
  - EUROMECH Colloquium Dynamics of Concentrated Vortices, May 2016 Novosibirsk, Russia;
  - 3-я международная конференция «Неизотермические явления и процессы: от теории теплового взрыва к структурной макрокинетике», ноябрь 2016, Московская обл., Черноголовка, Россия;
  - Joint Meeting of Plasma Physics Collaboration at FAIR and 8th International Workshop on Plasma Physics with Intense Laser and Heavy Ion Beams (PP@FAIR & WLIV 2016), December 2016, Moscow, Russia;
  - II Всероссийская конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых, 11-17 сентября 2017, Ялта, Крым;
  - 60-я научная конференция МФТИ, ноябрь 2017, Московская обл., Долгопрудный, Россия;
  - XIX International conference on the methods of aerophysical research, 13-19 August 2018, Novosibirsk, Russia;
  - XXII Всероссийская конференция «Теоретические основы и конструирования численных алгоритмов решения задач математической физики», 3-8 сентября 2018, Новороссийск, пос. Абрау-Дюрсо, Россия;
  - III Всероссийская конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых, 10-16 сентября 2018, Ялта, Крым;
  - Международная школа-конференция «Соболевские чтения», 10-16 декабря 2018, Новосибирск, Россия;
  - Пятый слет разработчиков Отечественных CFD-кодов, 1-2 декабря, 2018, Москва, Россия;
  - XXI Международная конференция по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2019), 24-31 мая 2019, Алушта, Крым;
  - XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 19-24 августа 2019, Уфа, Россия;
  - Международный Симпозиум «Fundamentals of laser assisted micro- and nanotechnologies», 30 июня-04 июля 2019, Санкт-Петербург, Россия;
  - Conference «Mathematics and its Applications», посвященная 90-летию академика С.К. Годунова, 5-9 августа 2019, Новосибирск, Россия;
  - IV Всероссийская конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых, 15-22 сентября 2019, Ялта, Крым;
  - V Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2019, 12-15 февраля 2019, Москва, Россия;

- 32nd International Symposium on Shock Waves, 14-19 July 2019, Singapore;
- XIII Международная конференция по Прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2020), 6-13 сентября 2020, Алушта, Крым;
- V Всероссийская конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых (ТФГ-2020), 13-20 сентября 2020, Ялта, Крым.

**Использование результатов.** Пакет прикладных программ **HYPERBOLIC\_SOLVER** внедрен в научных и промышленных организациях и высших учебных заведениях. Среди них:

- АО «Московский Институт теплотехники»;
- ПАО РКК «Энергия»;
- АО «НИИМЭ»;
- ЦАГИ.

Акты внедрения прилагаются к диссертации.

**Личный вклад.** Автор является основным разработчиком пакета прикладных программ **HYPERBOLIC\_SOLVER**.

При непосредственном участии автора были поставлены задачи, проведены численные эксперименты и сделан их анализ. Основные положения и результаты, выносимые на защиту, отражают личный вклад автора.

Автор является руководителем грантов и программ ряда научных фондов:

- грант РФФИ № 17-11-01293 «Фундаментальные аспекты математического моделирования на суперкомпьютерах воздействия интенсивных потоков направленной энергии на материалы»;
- грант РФФИ № 17-01-00812 «Разработка программного комплекса Turbulence Problem Solver для численного моделирования задач механики сплошных сред»;
- программа фундаментальных исследований Президиума РАН I.33П. «Фундаментальные проблемы математического моделирования».

**Публикации.** Результаты диссертации опубликованы в **64** печатных изданиях: **40** статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ и входящих в списки WoS, Scopus и/или RSCI, а также **24** публикации в сборниках материалов конференций. По результатам диссертации оформлено **1** свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Полный список публикаций приводится в конце автореферата.

**Структура диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 227 страниц, текст содержит 92 рисунка и 8 таблиц. Список литературы содержит 275 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели и основные направления исследований, изложена научная новизна и основные положения, выносимые на защиту. В последующих главах дан обзор научной литературы; представлена универсальная технология построения пакета прикладных программ для задач, описываемых системой уравнений гиперболического типа; дано описание пакета прикладных программ **HYPERBOLIC\_SOLVER** и применение данного пакета к решению ряда задач механики сплошных сред.

**В первой главе** дается обзор работ по численным методам и существующим программным пакетам для численного моделирования задач динамики сплошных сред. Обсуждаются их сильные и слабые стороны, область возможного использования и целесообразность применения к целям и задачам диссертации. **Раздел 1.1** посвящен анализу современных вычислительных методов решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Приводятся характерные особенности систем уравнений гиперболического типа, влияющие на построение различных численных методик. Обосновывается выбор используемых в пакете прикладных программ **HYPERBOLIC\_SOLVER** следующих численных алгоритмов: метода крупных частиц; схемы Годунова первого и второго порядков, линеаризованной схемы Годунова, метода Мак-Кормака и гибридной конечно-разностной схемы с положительным оператором. В **разделе 1.2** приведен обзор современных отечественных и зарубежных вычислительных комплексов. Кратко обсуждаются их преимущества и недостатки. Приведены основные характеристики и цели создания пакета прикладных программ **HYPERBOLIC\_SOLVER** для решения различных физических задач. Созданный пакет предоставляет пользователю набор нескольких численных методик. В том числе разработанный линеаризованный вариант метода Годунова с гарантированным свойством неубывания энтропии, а также программные блоки, содержащие специфические для газодинамических задач начальные, граничные условия, внешние силы и различные уравнения состояния вещества.

**Во второй главе** излагается технология численного моделирования и описывается программный пакет прикладных программ **HYPERBOLIC\_SOLVER**. Здесь рассмотрен процесс построения параллельных алгоритмов для задач, описываемых системами дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа. Предложена формализация задач и методов, которая позволяет решать новые задачи и привлекать иные методики решения путем перестройки универсальных элементов пакета на конкретные параметры решаемых задач.

**В разделе 2.1** приведены особенности создания единой технологии построения пакета прикладных программ. Основной принцип разрабатываемой технологии состоит в том, чтобы выделить ядро, остающееся неизменным, к

которому по определенному интерфейсу можно было бы подключать программные блоки (как стандартные, так и созданные пользователем), необходимые для решения поставленной физической задачи. Для этого обобщены, формализованы и объединены в единый программный комплекс различные численные методики; граничные и начальные условия; внешние силы и уравнения состояния вещества.

**В разделе 2.2** обсуждается система уравнений гиперболического типа, используемая в пакете прикладных программ **HYPERBOLIC\_SOLVER**. Отличительной чертой этих уравнений, как известно, является конечная скорость распространения возмущений в области интегрирования и существование характеристических многообразий – характеристических линий и поверхностей, ограничивающих области зависимости и влияния решений. При переходе к характеристическим переменным решение системы гиперболических уравнений сводится к решению нескольких уравнений переноса. Данное обстоятельство является принципиальным при написании основной части численных схем в разработанном пакете программ.

В данном разделе так же описаны используемые в работе основные методы расщепления по физическим процессам и пространственным переменным – расщепление по характеристическим переменным Стигера-Уорминга, расщепление по характеристическим переменным ван Лира и MUSCL-подход.

**Третья глава** посвящена описанию численных схем, реализованных в пакете программ **HYPERBOLIC\_SOLVER**.

**В разделе 3.1** описаны применяемые в пакете программ конечно-разностные схемы. Условно их можно разбить на два класса: приближенные Римановские методы и гибридные схемы. В рамках технологии, предложенной в Главе 2, в пакете прикладных программ **HYPERBOLIC\_SOLVER** можно применять любую конечно-разностную схему для уравнения переноса.

Особое внимание уделено описанию и исследованию линеаризованного варианта классической схемы Годунова с нелинейными распадами разрывов в одномерном и двумерном постановках, исследованных в **разделе 3.2**. Показано, что линеаризованный вариант схемы обладает свойством гарантированного неубывания энтропии, позволяющим моделировать её рост на ударных волнах. Исследована структура ударных волн, возникающих после распадов разрывов. Установлены зависимости ширины фронтов ударных волн и времени их формирования от выбора числа Куранта. Приведены результаты проверки точности разрывных решений.

**Четвертая глава** посвящена описанию пакета прикладных программ **HYPERBOLIC\_SOLVER** для численного моделирования задач, описываемых системой уравнений гиперболического типа.

При создании данного пакета использовался обобщенный подход к построению вычислительных программ, основанный на использовании независимых программных блоков, реализующих различные элементы расчетной методики. В рамках одного формализма пакет программ позволяет решать различные задачи, учитывающие разнообразные физические явления. Для их

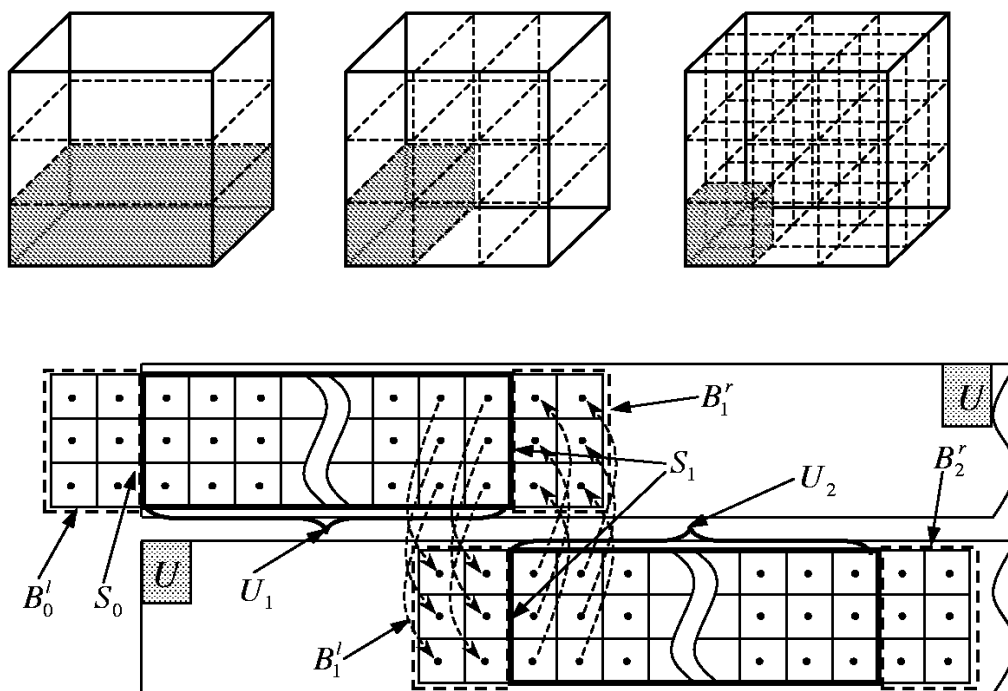
решения пользователь имеет возможность применять различные численные схемы и программные блоки, содержащие специфические для задачи начальные, граничные условия, массовые силы и уравнения состояния вещества.

В разделе 4.1 приводятся основные характеристики пакета и способы реализации отдельных его блоков. В пакете используется стандартный интерфейс обмена сообщениями MPI (Message Passing Interface), что позволяет использовать его на разных платформах, под управлением различных операционных систем (Windows, Linux), не модифицируя при этом основной программный код, написанный на языке C++. Так же в пакете программ используется модель программирования SPMD (Single Program, Multiple Data), в которой одновременно исполняются несколько копий одной программы параллельно на разных процессорах.

В разделе 4.2 обсуждаются вопросы, связанные с практической реализацией пакета прикладных программ **HYPERBOLIC\_SOLVER**. В связи с указанным многообразием применяемых численных методов и наличием большого числа дополняющих элементов пакета для программной реализации пакета программ **HYPERBOLIC\_SOLVER** используется объектно-ориентированный подход и вводятся базовые объекты и классы собственной разработки (линеаризованная схема Годунова, полуэмпирические уравнения состояния вещества).

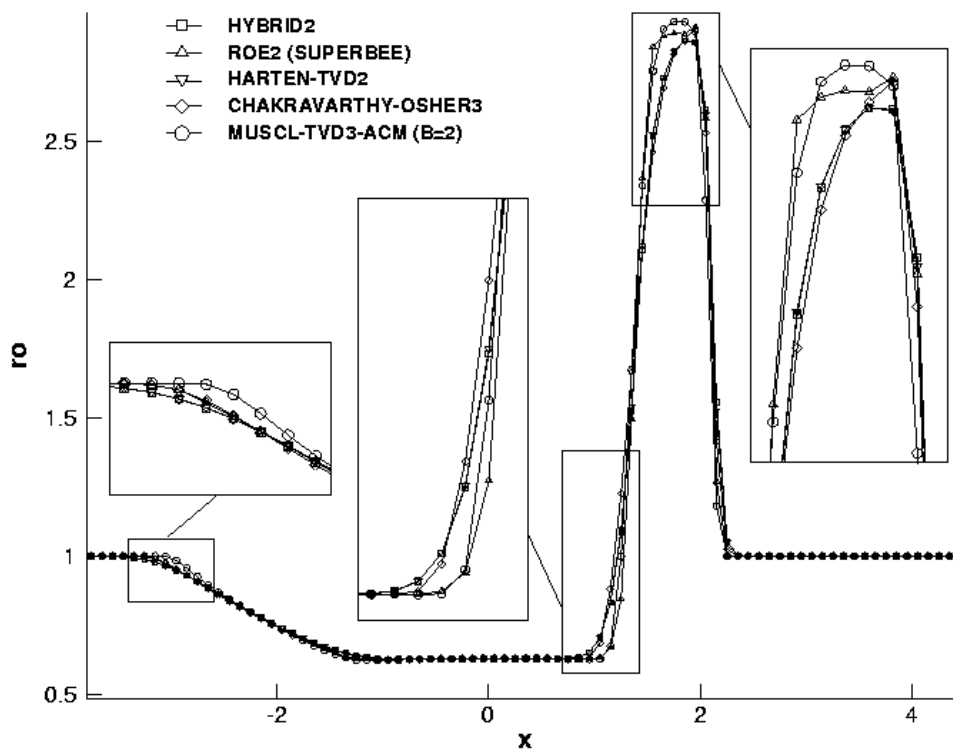
При использовании данного подхода каждая часть методики (в том числе, вид расщепления по пространственным переменным, выбор типа осреднения, энтропийная коррекция, конечно-разностная схема и др.) описывается отдельным программным классом. Это позволяет удобно комбинировать существующие выбранные программные блоки (описанные в виде классов) для реализации определенной версии программы.

Разделы 4.3 и 4.4 посвящены вопросам распараллеливания. Приведена декомпозиция расчетной области, и даны оценки ускорения расчетов в зависимости от числа используемых процессоров и размеров сетки. Чаще всего расчетная область представляет собой прямоугольник, параллелепипед или область, ограниченную отрезками, параллельными осям координат. Наиболее удобным для реализации является разбиение на области, представляющие из себя одинаковые прямоугольники/параллелепипеды. На Рис.2 показана одно-, двух- и трехмерная декомпозиция трехмерной области, т.е. разбиение на прямоугольные области соответственно по одной, двум и трем координатам. Каждый такой параллелепипед можно обрабатывать одинаково, при этом одновременно с другими – на отдельном процессоре.



*Рис.2* Декомпозиция расчетной области и обмены между процессорами

В разделе 4.5 приведены тестовые расчеты, основанные на сопоставлении результатов расчета по пакету прикладных программ **HYPERBOLIC\_SOLVER** известных постановок с результатами иных расчетов и аналитическими решениями. На **Рис.3** показано сравнение пяти различных схем (монотонная гибридная схема второго порядка HYBRID2, схема ROE2 Роу с ограничителем *SuperBee*, схема TVD2 Хартена, схема Чакраварти-Ошера и MUSCL-схема с искусственным сжатием MUSCL-TVD3-ACM) на задаче о распаде разрыва.



*Рис.3 Сравнение схем на задаче о распаде разрыва*

**В пятой главе** рассматриваются современные требования к уравнениям состояния вещества (УРС), теоретические и экспериментальные методы изучения термодинамических свойств веществ, различные аспекты построения широкодиапазонных УРС, примеры применения полуэмпирических УРС вещества при моделировании нестационарных гидродинамических явлений. Появление новых высокопроизводительных ЭВМ и связанное с этим развитие рассмотренных в Главах 1–4 эффективных разностных схем расчета нестационарных газодинамических явлений резко повысило требования к УРС вещества. Точность и достоверность результатов моделирования в настоящее время определяются не только погрешностями в решении дифференциальных уравнений, выражающих законы сохранения, но и погрешностями в УРС рассматриваемой сплошной среды.

Сведения из данной главы использованы в Главе 7 для численного моделирования высокоскоростного соударения металлических пластин. На **Рис.4** приведена фазовая диаграмма.

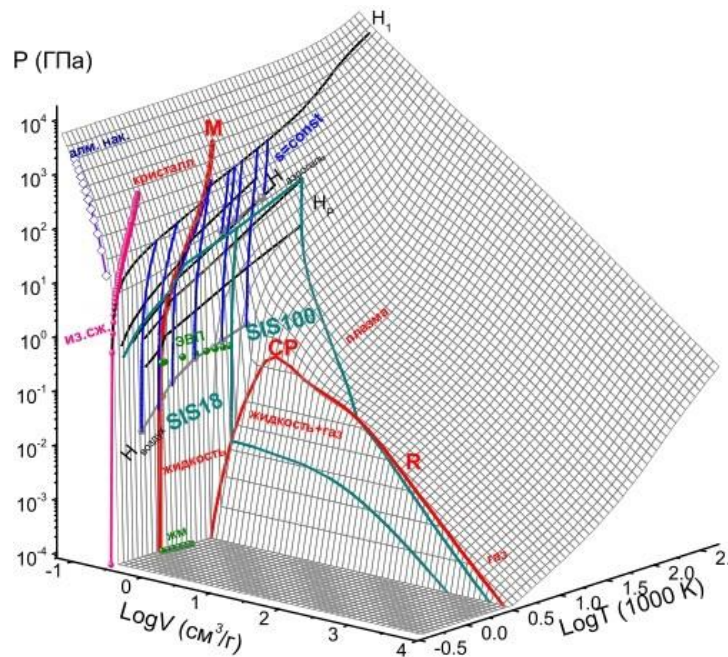
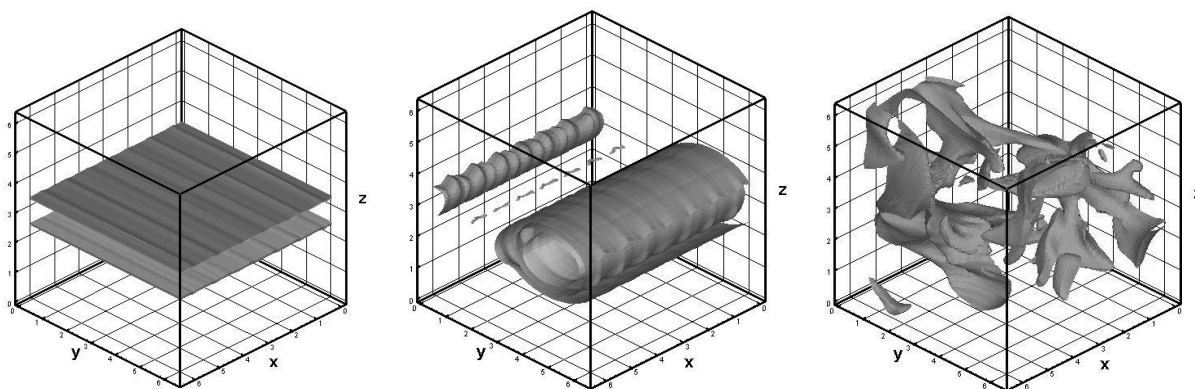


Рис.4 Фазовая диаграмма

**Шестая глава** посвящена численному анализу начальной стадии вихревых течений, возникающих через гидродинамические неустойчивости, образование вихрей и их взаимодействие.

Вычислительные эксперименты, проведенные с применением пакета прикладных программ **HYPERBOLIC\_SOLVER**, показали (см. **Рис.5**), что начальный этап развития вихревых структур состоит из формирования одной крупной структуры. Возникает вторичное течение в виде вихревого рулона, плавно обтекаемого внешним потоком. Затем на поверхности вихревого рулона начинают появляться неустойчивости в виде вихревых жгутов, формирующиеся при обтекании внешним потоком первичного вихря. Данные вихревые жгуты приводят к разрушению крупной структуры и возникновению в течении вихрей различных масштабов. Данное явление получило название, согласно академику О.М. Белоцерковскому, «вихревого каскада неустойчивостей в сдвиговом слое».



*Рис.5* Формирование вихревого каскада: образование и распад крупной структуры в различные моменты времени  $t=3, 9, 15$

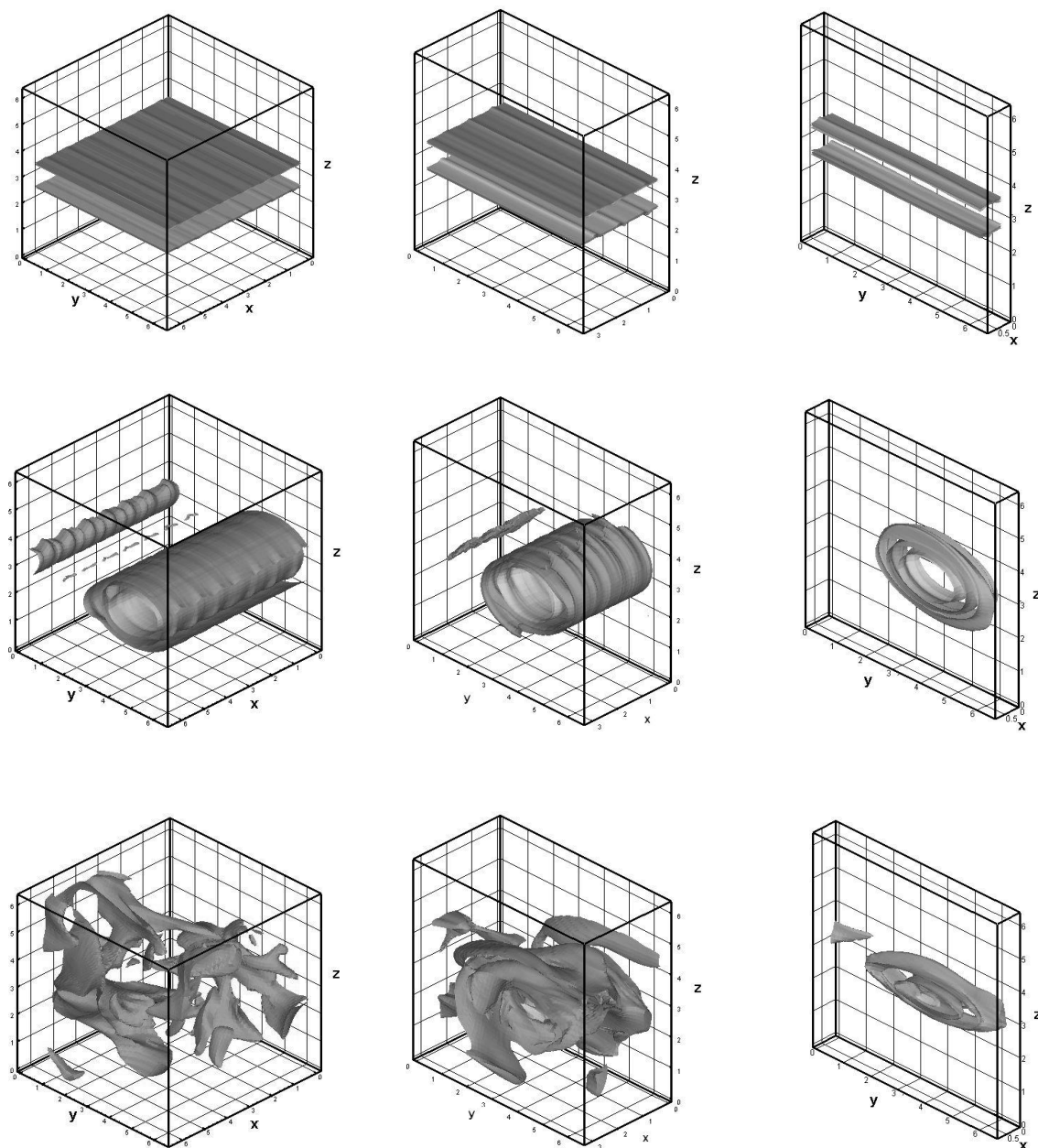
**Раздел 6.1** состоит из обзора литературы и обсуждения основных аспектов численного исследования процессов, происходящих при зарождении вихрей, и динамике их развития до перехода к стадии развитого вихревого течения.

**Раздел 6.2** включает в себя описание используемой математической модели, постановки начальных и граничных условий. В **разделе 6.3** численно исследованы влияние параметров течения на формирование вихревого каскада: граничных и начальных условий, амплитуды возмущения в слое смешения, ширины слоя смешения и размеров расчетной области (**раздел 6.3.1**, **раздел 6.3.3**).

Полученные результаты показывают, что наличие в начальный момент времени как случайного возмущения вертикальной составляющей скорости, так и детерминированного возмущения скорости в вертикальном и поперечном направлении приводит к возникновению вихревого каскада неустойчивостей и переходу течения в развитое вихревое. В этих случаях вторичная неустойчивость появляется на поверхности крупной структуры в виде вихревых жгутов в поперечном направлении, что может являться определяющим фактором возникновения вихревого каскада. При наличии детерминированного возмущения только вертикальной составляющей скорости, вторичное течение сохраняет свою устойчивость в течение определенного времени с последующем «коллапсом» вихревой структуры. Определяющим фактом при возникновении данного режима течения, по-видимому, является то, что вторичная неустойчивость появляется на поверхности вихря в продольном направлении. Рост амплитуды возмущения компонент скорости приводит к увеличению скорости развития вихревого течения. При малой ширине области в поперечном направлении (двумерный случай) течение представляет собой устойчивую во времени крупную структуру.

На **Рис.6** представлен сравнительный анализ влияния ширины области на динамику и кинематику процесса. Показано, что возникновение вихревого каскада является существенно трехмерным явлением. На **Рис.7** продемонстрирован переход от устойчивого ламинарного течения в узком канале к пространственному

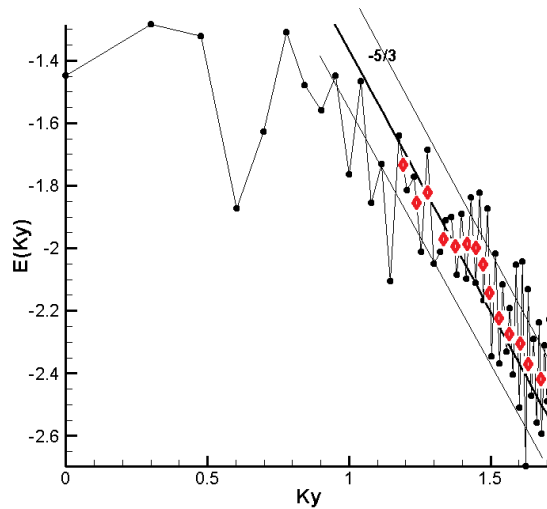
турбулентному. Полученные результаты показывают, что при увеличении ширины области в поперечном направлении течение перестает быть ламинарным и представляет собой устойчивую во времени крупную структуру (вторичное течение). При дальнейшем увеличении расчетной области формируется вихревой каскад.



*Рис.6 Возникновение вихревого каскада и его зависимость от размеров расчетной области. Исоповерхности условной концентрации. Моменты времени - 5,7,12(сверху вниз). Протяженность сдвигового слоя в направлении X -  $2\pi$ ,  $\pi$ ,  $\pi/4$*

В разделе 6.3.2 приведены энергетические характеристики вихревого течения. В вычислительных экспериментах с точностью 15-20 процентов

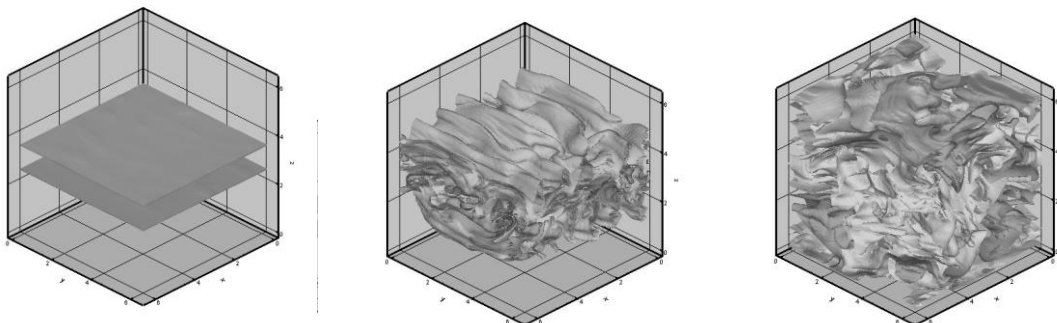
воспроизведен «закон  $-5/3$  Колмогорова» для инерционного участка энергетического спектра (см. **Рис.7**).



**Рис.7** Спектр кинетической энергии  $E(K_y)$  в зависимости от волнового числа  $K_y$  на развитой стадии турбулентности в момент времени  $t=28$

**Раздел 6.3.4** посвящен исследованию влияния постоянной внешней силы на формирование вихревых каскадов в пространственном сдвиговом слое сжимаемой невязкой среды, и дано сравнение с задачей о сдвиговом слое без воздействия внешней силы, рассмотренной в **разделах 6.3.1-6.3.3**.

Исследовано вихревое течение в сдвиговом слое при наличии внешней силы (течение Колмогорова). Показано ее влияние на формирование вихревых каскадов (см. **Рис.8**). Силы, действующие внутри сдвигового слоя, как бы растягивают его в противоположных направлениях. В результате чего сдвиговый слой принимает вид «гребенки», состоящей из нескольких зубцов, которые постепенно увеличиваются в размерах и деформируются. Вторичные неустойчивости, появляющиеся на каждом из зубцов, со временем нарушают эту регулярную структуру, и течение переходит в многомасштабную хаотическую стадию.



**Рис.8** Вихревой каскад для задачи Колмогорова. Моменты времени - 5,7,15

Вычислительный алгоритм основан на монотонной гибридной схеме 2-го порядка.

В разделе 6.4 приведены основные выводы, сделанные в результате численного моделирования вихревых каскадов в сдвиговых слоях.

- Изучена начальная стадия вихреобразования, т.е. эволюция крупномасштабных образований и статистическая трансформация потока энергии по каскаду вихрей. Прямым численным моделированием показано, что переход к развитому вихревому течению осуществляется через вихревой каскад неустойчивостей.
- Выявлены условия, при которых данный каскад возникает. Подтверждена важная роль трехмерности для возникновения развитого вихревого течения.
- В расчетах получен инерционный участок спектра энергии и подтвержден «закон  $-5/3$  Колмогорова».
- Исследовано вихревое течение в сдвиговом слое при наличии внешней силы (течение Колмогорова). Показано ее влияние на формирование вихревых каскадов.

В приложении к шестой главе проведено численное моделирование двумерного течения Колмогорова при наличии периодического поля внешней силы, исследован процесс формирования режима течения типа «паркет» (система вихрей, имеющих определенную структуру) в слое идеальной слабо сжимаемой среды. На Рис.9 показано экспериментальное исследование формирования течения «паркет» в слое слабо проводящей среды под действием периодического поля внешней силы.



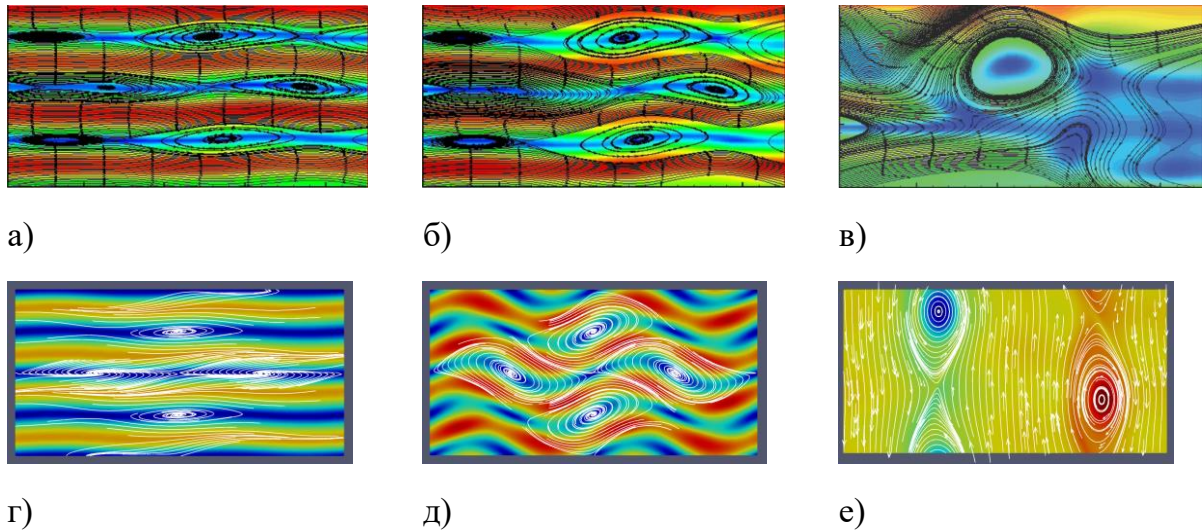
*Рис.9 Течение «паркет». Натурный эксперимент*

На основе уравнений Эйлера проведено численное моделирование процесса формирования вихревого режима (течения типа «вихревого паркета») в слое сжимаемой среды. Показано, что на формирование данного течения существенное влияние оказывают начальные условия. А именно, малое возмущение компонент скорости приводит к возникновению «вихревого паркета». В качестве начальных условий для поля скоростей применяется суперпозиция скорости основного течения вида  $u = \sin y$ , и наложенных на основное течение малых возмущений  $A \sin(cx)$ . Такая постановка начальных условий позволила получить аналог автоколебательного режима («вихревого паркета»). Исследованы два вида начальных условий для

скорости в продольном направлении:  $u_0 = 0.1\sin(y) + 0.005\sin(2x)$  и  $u_0 = 0.1\sin(y) + 0.005\sin(4x)$  соответственно. Скорость в поперечном направлении  $v$  в начальный момент времени равна 0. Остальные значения основных параметров течения соответствуют данным из экспериментального исследования:

$$\rho_0 = 1000 \text{ кг} / \text{м}^3, G = 10^{-2} \text{ Н} / \text{кг}, p = 10^5 \text{ Па}$$

В процессе численного эксперимента обнаружена неустойчивость сформировавшегося течения, образование крупного вихря и возникновение обратного каскада. Результаты проведенных численных исследований показывают, что развитие процесса потери устойчивости течения может происходить при отсутствии влияния вязкости и стенок. Отмечено, что реализация когерентных структур происходит как для невязкого, так и для вязкого случая (см. **Рис.10**).



**Рис.10** Формирование «вихревого паркета» и его распад при численном моделировании задачи Колмогорова. Линии тока и модуль скорости для невязкого а) -в) и вязкого г) -е) случаев

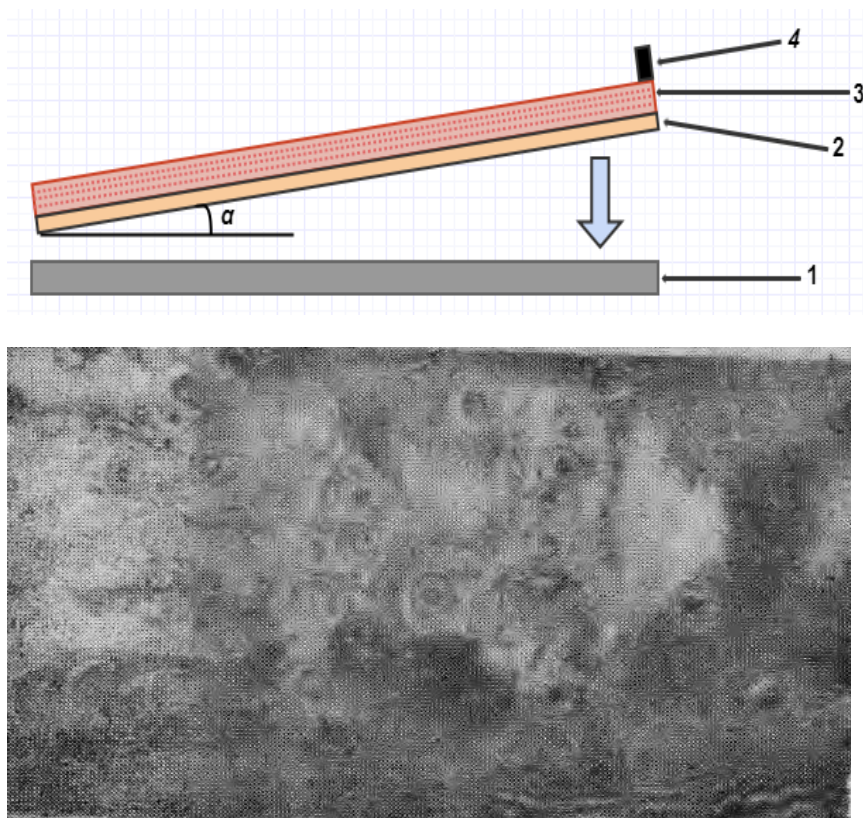
Вычислительный алгоритм основан на линеаризованной схеме Годунова.

**Седьмая глава** посвящена численному исследованию процесса высокоскоростного соударения металлических пластин применительно к технологическим экспериментам по сварке и упрочнению взрывом [15,16], характерным для взрывных промышленных технологий [15-19]. Используя автоматические решения и сквозные одномерные, двумерные и трехмерные коды пакета **HYPERBOLIC\_SOLVER** нестационарной гидродинамики, рассчитаны поля гидродинамических течений металлов, характеристики возникающих ударных волн и волн разгрузки Римана, их кинематика и интенсивность. В трехмерной постановке проанализировано развитие неустойчивости Рэлея-Тейлора на контактной границе «мишень- ударник». Воспроизведено наблюдаемое во взрывных экспериментах [16] появление кольцевых пространственных структур на поверхности сталкивающихся материалов. Детально исследован процесс кратерообразования, определены высота

и длина волны выплеска в зависимости от плотности и скорости соударения металлических пластин. В расчетах использованы различные виды УРС из Главы 5 настоящей диссертации.

В разделе 7.1 обсуждаются вопросы, связанные со сваркой и упрочнением взрывом при соударениях на примере высокоскоростного удара разогнанных продуктами детонации конденсированных ВВ металлических пластин, а также особенности процессов, происходящих в приграничных слоях металлических мишеней и ударника.

Раздел 7.2 посвящен оценке газодинамических условий соударения.



*Рис.11* Схема взрывного эксперимента. 1 – стальная пластина, 2 – метаемая взрывом свинцовая пластина, 3 – заряд взрывчатого вещества, 4 – детонатор

Отметим основные особенности взрывного эксперимента, схематически представленного на (Рис.11):

- Развитие неустойчивости на границе раздела при соударении пластин характеризуется кольцеобразными выплесками металла из стальной пластины в сторону свинцовой.
- Изменение толщины стальной пластины, создание возмущений на его свободной поверхности практически не влияет на рост неустойчивости на границе раздела пластин при сохранении толщины свинцовой пластины.

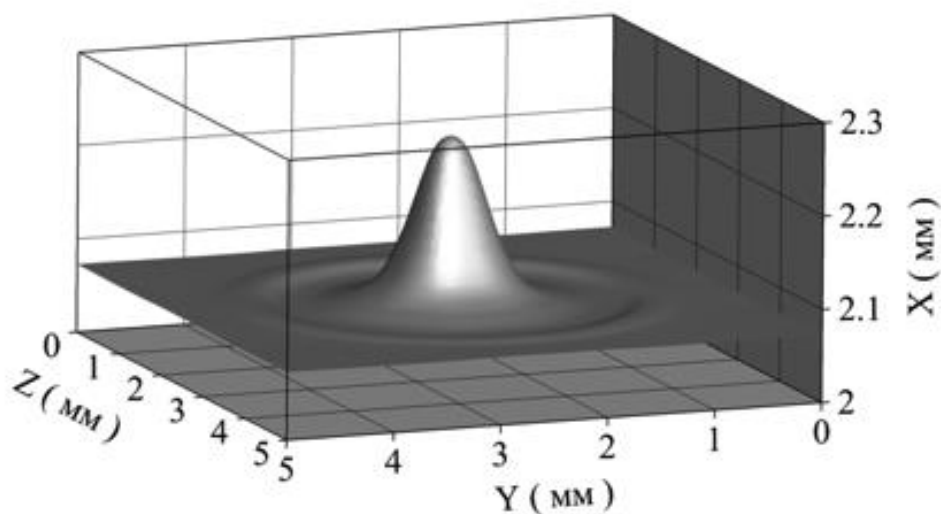
При высокоскоростном ударе на границе раздела металлов возникают мощные ударные волны с амплитудными давлениями в десятки гигапаскалей, что в десятки раз превосходит пределы динамической упругости соударяющихся металлов, составляющие для свинца, меди и железа  $\sigma_{Fe}^* = 1$  ГПа,  $\sigma_{Cu}^* \approx 0.1$  ГПа,  $\sigma_{Fe}^* \leq 0.1$  ГПа. В течение  $(1-10) \cdot 10^{-6}$  секунд материал ударника и мишени находятся в пластическом (псевдожидком) состоянии, после чего по мере падения давления в волнах разгрузки ниже предела упругости и перехода металла в упруго-пластическое состояние возникает упруго-пластический режим течения, при котором прочностные эффекты останавливают дальнейшее гидродинамическое движение. В расчетах рассматривается именно эта гидродинамическая стадия процесса вплоть до упруго-пластического режима с  $P < \sigma^*$ . В пользу такого механизма течения свидетельствуют представленные в диссертации оценки характерных возникающих давлений, а также исследование сохраненной после удара поверхности стальной пластины, на поверхности которой были хорошо видны кольцевые кратерообразные выплески. Объяснение наличия таких выплесков дается из предположения развития неустойчивости Рэлея-Тейлора на границе раздела пластин. Как показали расчеты, данный вид неустойчивости реализуется в волнах разрежения, проходящих на контактную границу раздела пластин со стороны свободных поверхностей ударника и мишени, а также в волнах разгрузки, проходящих от зоны динамического откола внутри пластин.

**В разделе 7.3** приведены результаты 3D-моделирования высокоскоростного соударения двух металлических пластин: постановка задачи (**раздел 7.3.1**), математическая модель (**раздел 7.3.2**), вычислительный алгоритм (**раздел 7.3.3**). В **разделе 7.3.4** особое внимание уделено калибровке численных параметров УРС и граничных условий.

Основные результаты вычислительного эксперимента приведены в разделе **раздел 7.3.5**. Математическая модель основывается на системе уравнений Эйлера для среды, подчиняющейся двучленному уравнению состояния из Главы 5. Параметры уравнения состояния откалиброваны по расчетно-экспериментальным данным, основанным на реальных широкодиапазонных уравнениях состояния металлов из Главы 5. Вычислительный алгоритм основан на схеме Harten-Lax-van Leer.

**В разделе 7.4** приведены выводы, сделанные на основе численного исследования высокоскоростного соударения металлических пластин в постановке, соответствующей натурным опытам [16]. Качественно и количественно верно воспроизводятся стадии формирования ударных волн, их взаимодействие со свободными границами пластин с образованием волн разрежения, взаимодействие волн разрежения с контактной границей металлов. Исследовано развитие возмущения формы контактной границы после однократного прохождения через контактную границу волн разрежения. Продемонстрировано, что начальное синусоидальное возмущение контактной границы между пластинами после

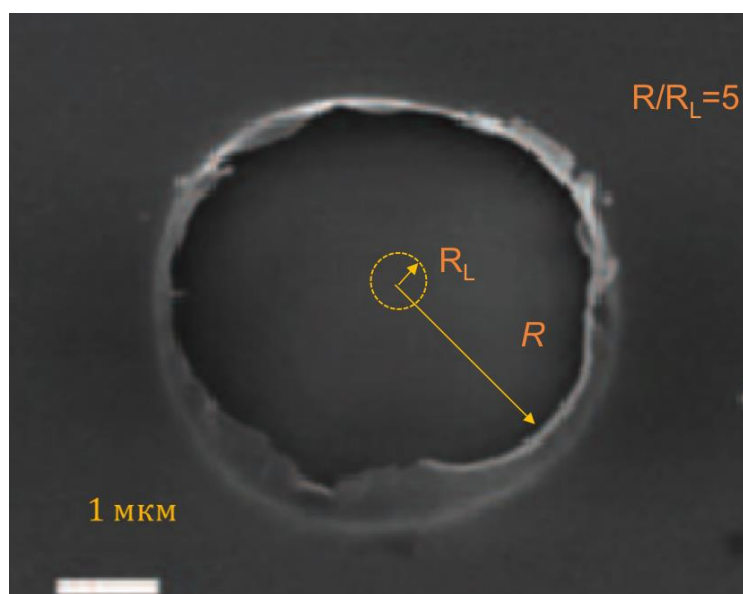
прохождения волн разрежения от свободных границ пластин приобретает кратерообразную форму, что качественно соответствует натурным опытам [16].



*Рис. 12. Развитие неустойчивости контактной границы*

В **восьмой** главе проведено двумерное численное моделирование технологической задачи формирования отверстий при фемтосекундной лазерной абляции золотой пленки, напыленной на диэлектрическую подложку. Приведено описание и дан численный анализ механизма отрыва пленки на основе ударно-волнового механизма.

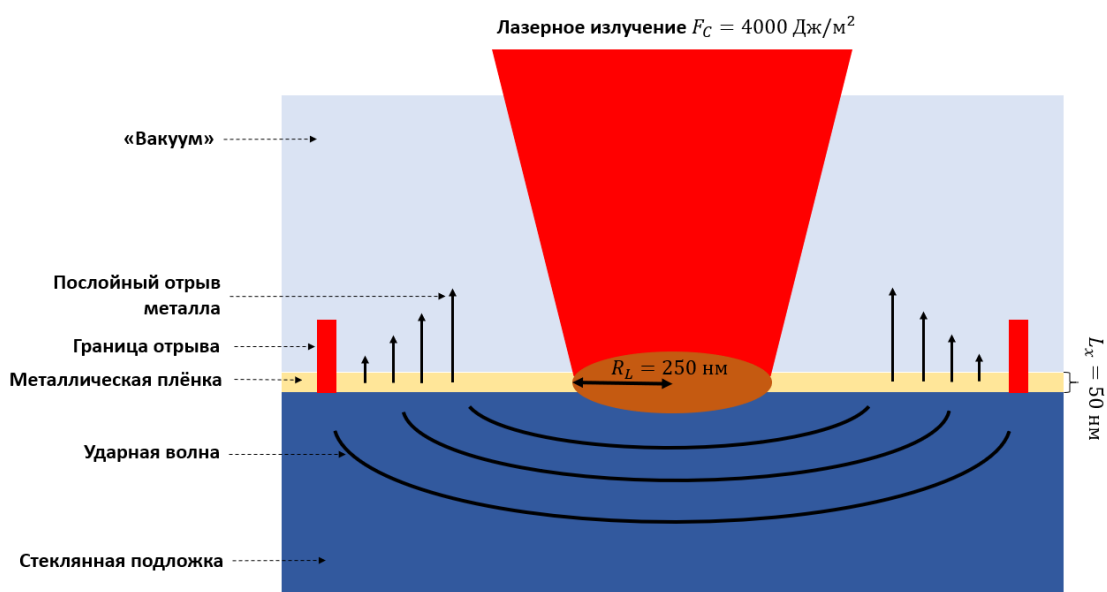
**Раздел 8.1** посвящен обсуждению вопросов, связанных с воздействием мощного фемтосекундного лазерного излучения на тонкие металлические пленки, расположенные на толстой диэлектрической подложке. Рассмотренный в данном разделе эксперимент является физической основой широко применяемой промышленной технологии LIPPS (лазерно- индуцированные периодические поверхностные структуры). Активные исследования в этой теме мотивированы важными технологическими приложениями в нанoeлектронике, плазмонике, сенсорике и в производстве метаструктур. Действие лазеров в данном случае превращает изначально гладкую поверхность в наноструктурированную с заданными параметрами и свойствами. На **Рис.13** представлены изображение отверстия со сканирующего электронного микроскопа, образовавшихся после воздействия одиночных фемтосекундных лазерных импульсов. Длина волны излучения 515 нм, длительность импульса 200 фс. Использовались серебряные пленки толщиной 50 нм, напыленные на стеклянную подложку. Опыты показывают, что при превышении некоторого порога лазерного импульса в пленке появляются сквозные отверстия [20].



*Рис.13 Фотографии, сделанные сканирующим электронным микроскопом. Визуализация поверхностей, облученных единичным лазерным импульсом [20]*

Результаты технологического эксперимента представлены в **разделе 8.2**, где обсуждаются возможные механизмы образования отверстий в металлической пленке. Эксперименты показали, что радиусы полученных отверстий  $R$  в несколько раз превышают радиус фокального пятна  $R_L$ . При анализе краев образовавшихся отверстий, заметно отсутствие валика из расплавленного и застывшего металла. Эти два факта объясняются влиянием принципиально иного, отличного от плавления, механизма образования отверстий, который и анализируется в настоящей работе. Представляется, что образование отверстий происходит вследствие послойного механического отрыва металла от подложки.

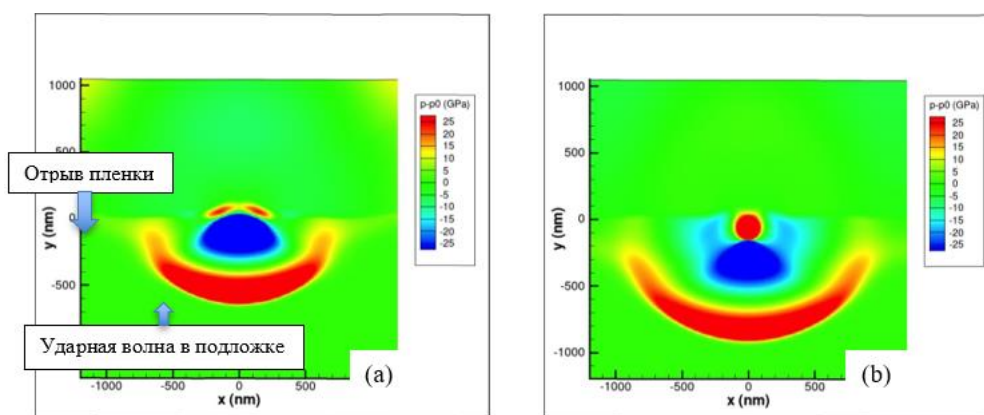
Численное моделирование рассмотренного в **разделе 8.2** процесса приведено в **разделе 8.3**. Схема численного эксперимента изображена на **Рис. 14**.



*Рис. 14* Схема численного эксперимента

Рассматривается плоское двумерное (2D) движение в системе координат (XY), где горизонтальная ось  $X$  направлена вдоль контактной границы между пленкой и подложкой. Ось  $Y$  является осью симметрии лазерного луча. Вычислительный эксперимент начинается с момента времени, когда значение температуры определяется распределением поглощенной энергии по Гауссовому закону  $F = F_c \exp(-x^2/R_L^2)$  вдоль золотой пленки. В расчетах радиус фокального пятна составлял  $R_L = 0,25 \mu\text{м}$ , импульс имел фемтосекундную длительность ( $10^{-15}$  сек.). При воздействии такого лазерного импульса в подложке создается положительное давление, действующее на пленку и ускоряющее ее в сторону вакуума (по оси  $Y$ ). Выше некоторого порога давления скорость движения ускоренной пленки становится достаточной, чтобы отделиться от подложки. В таких случаях размер образовавшегося в пленке отверстия оказывается, как показывают опыты, значительно больше (до 10-ти раз), чем фокальное лазерное пятно на поверхности пленки. Граница отверстия при этом определяется распространением УВ в подложке и становится, как показывают расчеты, близка к экспериментальным значениям.

Численное моделирование реализуется с помощью двумерного гидродинамического кода на основе схемы Годунова. Подход учитывает поглощение излучения электронной подсистемой металла, двухтемпературную гидродинамику металла (путем учета уравнения для электронной температуры), электронную теплопроводность и электронно-ионный обмен.



**Рис. 15** Распространение квазисферической ударной волны в подложке. (а) - распределение давления в момент времени  $t=40$  ps. Движение краев УВ вдоль поверхности в направлении оси  $Y$  вызывает отрыв пленки от подложки. Дальнейшее распределение давления при  $t=60$  ps показано на рисунке (b)

**Раздел 8.4** содержит основные результаты численного моделирования формирования отверстий при фемтосекундной лазерной абляции золотой пленки, напыленной на стеклянную подложку. Вычислительная область представляет собой прямоугольник размером  $2400 \times 2250$  нм. Начальная плотность в каждом слое постоянна, начальная скорость равна нулю. Верхний слой соответствует вакууму, средний золоту и нижний стеклу. После включения лазерного импульса начальное давление в пленке распределено так, чтобы соответствовать распределению давления в металле в области светового пятна радиусом  $R_L=250$  нм. Это гауссово распределение с  $e$ -кратным радиусом  $R_L$ . Граничными условиями являются полностью проницаемые стенки, чтобы возмущения могли свободно уходить за края вычислительной области и не влиять на дальнейшие процессы.

Ударная волна, движущаяся в подложке, порождается расширением быстро нагреваемой лазерным излучением пленки вглубь подложки. Пленка нагревается лазерным излучением быстрее, чем звуковая волна пересекает пленку  $t_{heating} \ll t_s = d_f / c_s$ , а нагрев пленки происходит однородно по всей толщине. Это приводит к тому, что контактная граница между разогретой пленкой и подложкой действует как поршень, вызывающий ударную волну сжатия в подложке. Ускорение пленки продолжается в течение интервала времени акустического масштаба  $t_s$ . После прохождения волны сжатия к контактной границе раздела прибывает волна разрежения от внешней границы пленки, и поршень перестает давить на подложку, что приводит к началу затухания квазисферической ударной волны в подложке. Именно это затухание позволяет объяснить существование повышенного диаметра (до 10 раз больше диаметра лазерного пучка) отверстия в металлической пленке. Данный процесс продемонстрирован на **Рис.15**.

Таким образом, выполненное в Главе 8 численное моделирование процесса фемтосекундной лазерной абляции позволило объяснить сложные процессы современной технологии.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы и выводы:

1. Создан комплекс программ **HYPERBOLIC\_SOLVER** для численного моделирования широкого спектра задач нестационарной механики сплошных сред на параллельных ЭВМ. Возможности пакета продемонстрированы на примерах решения различных задач механики сплошных сред.
2. Разработан линеаризованный вариант классической схемы Годунова с нелинейными распадами гидродинамических разрывов. Данный метод включен в комплекс программ **HYPERBOLIC\_SOLVER**.
3. Рассмотрены современные требования и особенности полуэмпирических широкодиапазонных уравнений состояния вещества, являющихся необходимым элементом для моделирования газодинамических явлений при экстремально высоких давлениях и температурах. Методика использования широкодиапазонных уравнений состояния вещества включена в качестве блока в комплекс программ **HYPERBOLIC\_SOLVER**.
4. Проведено численное исследование плоских и пространственных нестационарных течений в сдвиговых слоях сжимаемой невязкой среды.
5. Проведено численное моделирование двумерного течения типа «паркет» Колмогорова при наличии периодической внешней силы.
6. Численно исследована газодинамика нестационарных ударно-волновых явлений в задаче о высокоскоростном соударении разогнанных взрывом металлических пластин с использованием полуэмпирических уравнений состояния вещества.
7. Проведено двумерное численное моделирование задачи о формировании отверстий при фемтосекундной лазерной абляции.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность за постоянное внимание, поддержку и совместную работу академику О.М. Белоцерковскому, академику С.К. Годунову, академику А.С. Холодову, академику Э.Е. Сону, к.ф.-м.н. А.М. Опарину.

Я признательна за ценные обсуждения и полезные советы моим соавторам – члену-корреспонденту РАН д.ф.-м.н. Иногамову Н.А., профессору, д.ф.-м.н. Ломоносову И.В., а также директору ИАП РАН профессору, д.ф.-м.н. Никитину И.С., научным сотрудникам к.ф.-м.н. Шепелеву В.В., к.ф.-м.н. Уткину П.С., Опариной Е.И. и всему коллективу ИАП РАН за доброжелательное отношение, содействие и помощь в работе.

## РАБОТЫ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных в диссертационном совете МГУ по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и входящих в списки Scopus и/или RSCI**

1. *Фортова С.В., Пасконов В.М.*, Течение вблизи кормы продольно обтекаемого тела при поперечном вдуве с его боковой поверхности // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 1996, № 2, с. 157-163.  
*ПЕРЕВОД Fortova S. V., Paskonov V. M.*, Flow around the after body of a plate in a longitudinal gas stream with transverse injection from the lateral surface // Fluid Dynamics. – 1996, vol. 31, № 2, pp. 296-301.  
(Scopus, RSCI WoS, ИФ РИНЦ 0,986)
2. *Fortova S.V.*, On vortex cascades in shear flow instabilities // Physica Scripta. – 2010, vol. 142, № 014058, 4p. DOI: 10.1088/0031-8949/2010/T142/014058  
(WoS, Scopus, ИФ 0,971)
3. *Белоцерковский О.М., Фортова С.В.*, Макропараметры пространственных течений в свободной сдвиговой турбулентности // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2010, том 50, № 6, с. 1-14.  
*ПЕРЕВОД Belotserkovskii O.M., Fortova S.V.*, Macroscopic Parameters of Three Dimensional Flows in Free Shear Turbulence // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2010, vol. 50, № 6, pp. 1071-1084.  
(WoS, Scopus, RSCI WoS, ИФ РИНЦ 0,554)
4. *Белоцерковский О.М., Опарин А.М., Трошкин О.В., Фортова С.В., Конюхов А.В.*, О структурировании хаоса // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2011, том 51, №2, с.237-250.  
*ПЕРЕВОД Belotserkovskii O.M., Oparin A.M. et al.*, Structurization of chaos // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2011, vol. 51, № 2, pp. 222-234.  
(WoS, Scopus, RSCI WoS, ИФ РИНЦ 0,482)
5. *Белоцерковский О.М., Фортова С.В.*, Исследование спектральных характеристик однородного турбулентного потока // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2012, том 52, № 2, с. 1-8.  
*ПЕРЕВОД Belotserkovskii O.M., Fortova S.V.*, Study of Spectral Characteristics of a Homogeneous Turbulent Flow // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2012, vol. 52, № 2, pp. 285-291.  
(WoS, Scopus, RSCI WoS, ИФ РИНЦ 0,659)
6. *Белоцерковский О.М., Фортова С.В.*, Исследование каскадного механизма развития турбулентности в свободно- сдвиговом течении // Доклады Академии наук. – 2012, том 443, № 1, с. 44-47.

- ПЕРЕВОД Belotserkovskii O.M. and Fortova S.V., Investigation of the Cascade Mechanism of Turbulence Development in Free Shear Flow // Doklady Physics. – 2012, vol. 57, № 3, pp. 110-113.  
(WoS, Scopus, RSCI WoS, ИФ РИНЦ 0,376)*
7. Fortova S.V., Investigation of spectrum characteristics of the vortex cascades in shear flow // *Physica Scripta.* – 2013, № 014049, DOI: 10.1088/0031-8949/2013/T155/014049  
(WoS, Scopus, ИФ 1,359)
8. Фортова С. В., Крагинский Л. М., Чикиткин А.В., Опарина Е.И., Программный пакет для решения гиперболических систем уравнений // *Математическое моделирование.* – 2013, том 25, № 5, с. 123-135.  
*ПЕРЕВОД Fortova S.V., Kraginskii L.M., Chikitkin A.V., and Oparina E.I., Software Package for Solving Hyperbolic Type Equations // Mathematical Models and Computer Simulations.* – 2013, vol. 5, № 6, pp. 607-616.  
(Scopus, RSCI WoS, ИФ РИНЦ 0,378)
9. Фортова С.В., Численное моделирование трехмерного течения Колмогорова для сдвигового слоя // *Журнал вычислительной математики и математической физики.* – 2013, том 53, № 3, с. 433–441.  
*ПЕРЕВОД Fortova S.V., Numerical simulation of the tree-dimensional Kolmogorov flow in a shear layer // Computational Mathematics and Mathematical Physics.* – 2013, vol. 53, № 3, pp. 311-319.  
(WoS, Scopus, RSCI WoS, ИФ РИНЦ 0,634)
10. Белоцерковский О.М., Белоцерковская М.С., Денисенко В.В., Ериклинцев И.В., Козлов С.А., Опарина Е.И., Трошкин О.В., Фортова С.В., Об установлении спутного вихря в потоке идеальной среды // *Журнал вычислительной математики и математической физики.* – 2014, том 54, № 1, с. 164-169. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0044466914010037>  
*ПЕРЕВОД Belotserkovskii O.M., Belotserkovskaya M.S., Denisenko V.V., Eriklintsev I.V., Kozlov S.A., Oparina E.I., Troshkin O.V., Fortova S.V., On the development of a wake vortex in inviscid flow // Computational Mathematics and Mathematical Physics.* – 2014, vol. 54, № 1, pp. 172-176.  
(WoS, Scopus, RSCI WoS, ИФ РИНЦ 0,428)
11. Фортова С.В., Вихревой каскад неустойчивостей и переход к турбулентности // *Журнал вычислительной математики и математической физики.* – 2014, том. 54, № 3, с. 536-544. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0044466914030053>  
*ПЕРЕВОД Fortova S.V., Eddy Cascade of Instabilities and Transition to Turbulence // Computational Mathematics and Mathematical Physics.* – 2014, vol. 54, № 3, pp. 553-560.  
(WoS, Scopus, RSCI WoS, ИФ РИНЦ 0,428)
12. Fortova S.V., Numerical simulation of turbulence flows in shear layer // *J. Archives of metallurgy and materials.* – 2014, vol. 59, № 3, pp. 1155-1158. DOI: 10.2478/amm-2014-0201

- (Scopus, ИФ 1,23)
13. Долуденко А.Н., Фортова С.В., Численное моделирование Релей-Тейлоровской неустойчивости невязкой и вязкой средах // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2015, том 55, № 5, с. 876-885. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0044466915050099>  
*ПЕРЕВОД Doludenko A.N. and Fortova S.V., Numerical Simulation of Rayleigh-Taylor Instability in Inviscid and Viscous Media // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2015, vol. 55, № 5, pp. 874-882.*  
(WoS, Scopus, RSCI WoS, ИФ РИНЦ 0,564)
  14. Фортова С.В., Сравнительный анализ формирования вихревых каскадов в различных турбулентных задачах // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2015, том 55, № 2, с. 302-309. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0044466915020088>  
*ПЕРЕВОД Fortova S.V., Comparative Analysis of Eddy Cascade Formation in Various Turbulent Problems // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2015, Vol. 55, № 2, pp. 298-304.*  
(WoS, Scopus, RSCI WoS, ИФ РИНЦ 0,564)
  15. Fortova S.V., Pronina A.P., Influence of artificial viscosity on the formation of vortex cascades in the shear layer // Journal of Physics, Conference series. – 2015, vol. 653, № 012104. DOI: 10.1088/1742-6596/653/1/012104  
(Scopus, ИФ 0,490)
  16. Fortova S.V., Utkin P.S., Shepelev V.V., Application of software complex Turbo Problem Solver to Rayleigh-Taylor instability modeling // Journal of Physics, Conference series. – 2016, vol. 754, № 062003 DOI: 10.1088/1742-6596/754/6/062003  
(Scopus, ИФ 0,498)
  17. Белоцерковский О.М.†, Фортова С.В., Трошкин О.В., Пронина А.П., Ериклинцев И.В., Козлов С.А., Численное моделирование высокоскоростного столкновения металлических пластин // Математическое моделирование. – 2016, том 28, № 2, с. 19-30.  
*ПЕРЕВОД Belotserkovskii O.M.†, Fortova S.V., Troshkin O.V., Pronina A.P., Eriklintsev I.V., and Kozlov S.A., Numerical Simulation of a High-Speed Collision of Metal Plates // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2016, vol. 8, № 5, pp. 497-505.*  
(Scopus, RSCI WoS, ИФ РИНЦ 0,378)
  18. Фортова С.В., М. Белоцерковская М.С., Шепелев В.В., Пронина А.П., Применение программного комплекса TURBO PROBLEM SOLVER для решения некоторых задач газодинамики // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2016, том 56, № 6, с. 1185-1196. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0044466916060077>  
*ПЕРЕВОД Fortova S.V., Belotserkovskaya M.S., Shepelev V.V., Pronina A.P., Application of the program package TURBO problem solver for some fluid dynamics*

- problems // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. – 2016, vol. 56, № 6, pp.1162-1173.  
(*WoS, Scopus, RSCI WoS, ИФ ПИИЦ 0,730*)
19. *Doludenko A.N., Fortova S.V., Son E.E.*, The Rayleigh-Taylor instability of the Newtonian and non-Newtonian fluids // *Physica Scripta*. – 2016, vol.91, № 10, № 104006. DOI: 10.1088/0031-8949/91/10/104006  
(*WoS, Scopus, ИФ 1,222*)
20. *Fortova, S.V., Shepelev, V.V., Pronina, A.P., Utkin, P.S.*, Three-dimensional numerical simulation of the instability of the interface between two high-speed colliding metal plates // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016, vol 774, № 1, № 012028. DOI: 10.1088/1742-6596/774/1/012028  
(*WoS, Scopus, ИФ 0,498*)
21. *Fortova S.V., Utkin P.S., Narkunas T.S., Shepelev V.V.*, Numerical simulation of the impact of high-speed metallic plates using two approaches // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017, vol. 899. № 052006. DOI: 10.1088/1742-6596/899/5/052006  
(*WoS, Scopus, ИФ 0,534*)
22. *Ломоносов И.В., Фортова С.В.*, Широкодиапазонные полуэмпирические уравнения состояния вещества для численного моделирования высокоэнергетических процессов // *Теплофизика высоких температур*. – 2017, том 55, № 4, с. 596-626. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0040364417040111>  
*ПЕРЕВОД Lomonosov I.V. and Fortova S.V.*, Wide-Range Semiempirical Equations of State of Matter for Numerical Simulation on High-Energy Processes // *High Temperature*. – 2017, vol. 55, № 4, pp. 585-610.  
(*Scopus, RSCI WoS, ИФ ПИИЦ 1,887*)
23. *Fortova S.V., Shepelev V.V., Troshkin O.V. and Kozlov S.A.*, Numerical simulation of the hydrodynamic instabilities of Richtmyer-Meshkov and Rayleigh-Taylor // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017, vol. 899, № 5. DOI: 10.1088/1742-6596/899/5/052007  
(*WoS, Scopus, ИФ 0,534*)
24. *Utkin P.S., Fortova S.V.*, Mathematical modeling of impact of two metal plates using two-fluid approach // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018, vol. 946, № 012047. DOI: 10.1088/1742-6596/946/1/012047  
(*WoS, Scopus, ИФ 0,543*)
25. *Fortova S.V., Utkin P.S., Pronina A.P., Narkunas T.S., Shepelev V.V.*, Improvement of three-dimensional mathematical for the simulation of impact of high-speed metallic plates // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018, vol. 946, № 012052. DOI: 10.1088/1742-6596/946/1/012052  
(*WoS, Scopus, ИФ 0,543*)
26. *Godunov S.K., Klyuchinskiy D.V., Safronov A.V., Fortova S.V., Shepelev V.V.*, Experimental study of numerical methods for the solution of gas dynamics problems with shock waves // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018, vol. 946, №

012048. DOI: 10.1088/1742-6596/946/1/012048.  
(Scopus, ИФ 0,543)
27. Shepelev V.V., Inogamov N.A., Fortova S.V., Danilov P.A., Kudryashov S.I., Kuchmizhak A.A., Vitrik O.B., Action of a femtosecond laser pulse on thin metal film supported by glass substrate // Journal of Physics: Conference Series. – 2018, vol. 1128, № 012092. DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012092  
(Scopus, ИФ 0,543)
28. Fortova S.V., Oparina E.I., Belotserkovskaya M.S., Numerical simulation of the Kolmogorov Flow under the influence of the periodic field of the external force // Journal of Physics: Conference Series. – 2018, vol. 1128 (1), № 012089. DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012089.  
(Scopus, ИФ 0,543)
29. Годунов С.К., Ключинский Д.В., Фортова С.В., Шепелев В.В., Экспериментальные исследования разностных моделей газовой динамики с ударными волнами // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2018, том 58, № 8, с. 5-19. DOI: <https://doi.org/10.31857/S004446690001997-7>  
ПЕРЕВОД Godunov S.K., Klyuchinskii D.V., Fortova S.V., Shepelev V.V., Experimental studies of difference gas dynamics models with shock waves // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2018, vol. 58, № 8, pp. 1201-1216.  
(WoS, Scopus, RSCI WoS, ИФ РИНЦ 0,844)
30. Уткин П.С., Фортова С.В. Двухжидкостная модель высокоскоростного соударения металлических пластин // Горение и взрыв. – 2018. – том 11, № 4. – с. 118-124. DOI: 10.30826/CE18110414.  
(ИФ РИНЦ 0,27)
31. Уткин П.С., Фортова С.В., Математическое моделирование высокоскоростного взаимодействия металлических пластин в рамках двухжидкостного эйлера подхода // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2018, Т.58, № 8, с. 90-96. DOI: <https://doi.org/10.31857/S004446690002011-3>  
ПЕРЕВОД Utkin P.S., Fortova S.V., Mathematical Modeling of High-Speed Interaction of Metallic Plates within the Two-Fluid Euler Approach // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2018, vol. 58, № 8, pp. 1377-1383.  
(WoS, Scopus, RSCI WoS, ИФ РИНЦ 0,844)
32. Шепелев В.В., Фортова С.В., Опарина Е.И., Использование программного комплекса Turbulence Problem Solver (TPS) для численного моделирования взаимодействия лазерного излучения с металлами // Компьютерные исследования и моделирование. – 2018, том 10, № 5, с. 619-630. DOI: 10.20537/2076-7633-2018-10-5-619-630.  
ПЕРЕВОД Shepelev V.V., Fortova S.V., Oparina E.I., Application of Turbulence Problem Solver (TPS) software complex for numerical modeling of the interaction between laser radiation and metals // Computer research and modeling. – 2018, vol.

- 10, № 5, с. 619-630.  
(RSCI WoS, ИФ РИНЦ 0,213)
33. *Utkin P. S. and Fortova S. V.*, Numerical modeling of dense flows of two-phase media with shock waves using two- fluid models // AIP Conference Proceedings . – 2018, vol. 2027, 030107. DOI: 10.1063/1.5065201.  
(WoS, Scopus, ИФ 0,543)
34. *Blinnikov S.I., Ilkaev R.I., Mochalov M.A., Mikhailov A.L., Iosilevskiy I.L., Yudin A.V., Glazyrin S.I., Golubev A.A, Gryaznov V.K., Fortova S.V.*, Dynamics of supernova bounce in laboratory // Phys.Rev.E. – 2019, vol. 99, № 1, Paper № 033102. DOI: 10.1103/PhysRevE.99.033102  
(Scopus, ИФ 2,296)
35. *Doludenko A.N., Fortova S.V., Shepelev V.V., Son E.E.*, Numerical simulation of the Rayleigh-Taylor instability of inviscid and viscous fluid // Physica Scripta. – 2019, vol. 94, № 9. DOI: 10.1088/1402-4896/ab028a  
(WoS, Scopus, ИФ 1,866)
36. *Фортова С.В., Уткин П.С., Казакова Т.С.*, Трехмерное численное моделирование развития неустойчивости контактной границы сталкивающихся металлических пластин в газодинамическом приближении // Теплофизика высоких температур. – 2019, том 57, № 2, с. 262-268. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040364419020030>  
*ПЕРЕВОД Fortova S.V., Utkin P.S., Kazakova T.S.*, Three-Dimensional Numerical Simulation of the Development of Instability of a Contact Boundary of Colliding Metal Plates within the Gas-Dynamic Approximation // High Temperature. – 2019, vol. 57, pp. 236-241.  
(WoS, Scopus, RSCI WoS, ИФ РИНЦ 1,887)
37. *Трошкин О.В., Козлов С.А., Фортова С.В., Шепелев В.В., Ериклинцев И.В.*, Бифуркационная модель ламинарно-турбулентного перехода в пристеночном слое // Математическое моделирование. – 2019, том 31, № 1, с. 114-126. DOI: 10.1134/S0234087919010076.  
*ПЕРЕВОД Troshkin, O.V., Kozlov, S.A., Fortova, S.V., Shepelev, V.V., Eriklintsev, I.V.*, Bifurcation Model of Laminar-Turbulent Transitions Near Flat Walls // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2019, vol. 11 (5), pp. 722-730. DOI: 10.1134/S2070048219050193  
(Scopus, RSCI WoS, ИФ РИНЦ 0,929)
38. *Fortova, S.V., Oparina, E.I., Doludenko, A.N.*, Numerical modeling of the Kolmogorov flow in a viscous and inviscid media // Journal of Physics: Conference Series. – 2019, vol. 1359, № 012079 DOI: 10.1088/1742-6596/1359/1/012079  
(Scopus, ИФ 0,580)
39. *Shepelev, V.V., Inogamov, N.A. and Fortova, S.V.*, Thermal and dynamic effects of laser irradiation of thin metal films // Optical and Quantum Electronics. – 2020. vol. 52, № 2. DOI: 10.1007/s11082-020-2214-0  
(WoS, Scopus, ИФ 1,416)

40. Годунов С.К., Денисенко В.В., Ключинский Д.В., Фортова С.В., Шепелев В.В., Исследование энтропийных свойств линеаризованной редакции метода Годунова // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2020, том 60, № 4, с. 639-651. DOI: 10.31857/S0044466920040080  
*ПЕРЕВОД Godunov S.K., Denisenko V.V., Fortova S.V., Shepelev V.V., Klyuchinskii D.V., Study of entropy properties of a linearized version of Godunov's method // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2020, vol. 60, № 4, pp. 628-640.*  
(WoS, Scopus, RSCI WoS, ИФ РИНЦ 0,844)

#### Другие публикации

41. Фортова С.В., Вихревой каскад неустойчивостей в различных задачах газодинамики // Вестник КБГУ. – 2014, том. 4, № 1, с. 34-39.
42. Сон Э.Е., Фортова С.В., Долуденко А. Н., Неустойчивость Рэлея-Тейлора при высокоскоростном соударении металлических пластин // Известия МАМИ, сер. Естественные науки. – 2015, с. 123.
43. Fortova, S.V., Shepelev, V.V., Pronina, A.P., Utkin, P.S., Numerical simulation of the high-speed impact of two metal plates // Book of abstracts of XXXI International Conference on Equations of State for Matter. March 1 - 6, 2016, Elbrus. - Moscow & Chernogolovka & Nalchik. – 2016. - p. 91.
44. Fortova, S.V., Shepelev, V.V., Pronina, A.P., Utkin, P.S., Mathematical modeling of Rayleigh-Taylor instability at the interface of two colliding metal plates // Book of abstracts of XIII International Symposium on Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations (EPNM-2016). June 20-24, 2016, Coimbra, Portugal. - pp. 55-57.
45. Фортова С.В., Шепелев В.В., Уткин П.С., Применение программного комплекса TURBO PROBLEM SOLVER для решения задач механики сплошных сред // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика», Ялта, 18 - 26 сентября 2016 г. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН. – с. 129.
46. Fortova S.V., Shepelev, V.V., Utkin, P.S., Mathematical modeling of high-speed impact of metal plates using different equations of state // Тезисы докладов III Международной конференции «Неизотермические явления и процессы: от теории теплового взрыва к структурной макрокинетике», Черногоровка, ноябрь 2016 г. – Черногоровка: Изд-во ИСМАН. – с. 9-10.
47. Фортова С.В., Шепелев В.В., Пронина А.П., Применение пакета прикладных программ Turbo Problem Solver (TPS) для численного моделирования развития неустойчивости Рэлея-Тейлора // Тезисы докладов XXII международная конференция «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность», 14-21 февраля 2016 г. – Московская область, Звенигород, М.: МГУ. – 2016. - 311 с.

48. *Fortova S., Utkin P., Shepelev V., Narkunas T.*, Mathematical modeling of the impact of high-speed metallic plates // Proceedings of 31st International Symposium on Shock Waves, 9-14 July 2017, Nagoya, Japan. – Paper SBM000247.
49. *Utkin P.S., Fortova S.V.*, Mathematical modeling of high-speed flows of two-phase media with shock waves // 50 Years of the Development of Grid-Characteristic Method. Conference handbook and proceedings, March 31-April 3 2018, Dolgoprudny, MIPT.
50. *Fortova S.V., Kazakova T.S., Utkin P.S.*, Mathematical modeling of the instability development on the contact surface of two media under the high-speed impact // Book of abstracts of XXXIII International Conference on Equations of State for Matter. March 16, 2018, Elbrus. – Moscow & Chernogolovka & Nalchik. – 2018, p. 169.
51. *Фортова С.В., Опарина Е.И., Трошкин О.В., Белоцерковская М.С.*, Численное моделирование течения Колмогорова под действием периодического поля внешней силы // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика», Ялта, 10-27 сентября 2018 г. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН. – с. 167.
52. *Фортова С.В., Шепелев В.В., Иногамов Н.А., Данилов П.А., Кудряшов С.И., Кучмижак А.А., Витрик О.Б.*, Действие фемтосекундного лазерного излучения на тонкие металлические пленки // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика», Ялта, 10-27 сентября 2018 г. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН. – с. 169.
53. *Годунов С.К., Ключинский Д.В., Фортова С.В.*, Экспериментальное исследование разрывных решений разностной модели газовой динамики со свойством неубывания энтропии // Тез. докл. XXII Всероссийской научной конференции «Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов для решения задач математической физики», Новороссийск, пос. Абрау-Дюрсо, 3-8 сентября 2018 г. – М.: ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2018. – с. 39-40.
54. *Годунов С.К., Шамолин М.В., Фортова С.В., Шепелев В.В.*, Численное исследование разностных моделей газовой динамики с ударными волнами // Тез. докл. XXII Всероссийской научной конференции «Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов для решения задач математической физики», Новороссийск, пос. Абрау-Дюрсо, 3-8 сентября 2018 г. – М.: ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2018. – с. 40-41.
55. *Годунов С.К., Ключинский Д.В., Фортова С.В.*, Экспериментальное исследование разрывных решений линеаризованной конечно-разностной модели газовой динамики со свойством неубывания энтропии // Международная школа-конференция «Соболевские чтения», 10-16 декабря 2018 г., Новосибирск.
56. *Godunov S.K., Klyuchinskiy D.V., Fortova S.V. and Denisenko V.V.*, An extension of a linearized finite-difference model of gas dynamics with the property of entropy nondecreasing to 2D case // Материалы XXXIV International Conference on

- Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, 1-6 марта 2019 г., Эльбрус, Кабардино-Балкария, Россия.
57. *Шепелев В.В., Фортова С.В., Опарина Е.И.*, Численное исследование механизма формирования отверстий в металле при воздействии фемтосекундного лазерного импульса // Материалы XXI Международной конференции по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2019), 24-31 мая 2019 г., Алушта, Крым, с. 127.
  58. *Сон Э.Е., Долуденко А.Н., Фортова С.В., Опарина Е.И.*, Численное моделирование двумерного течения проводящей среды под действием периодической силы // Материалы XXI Международной конференции по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2019), 24-31 мая 2019 г., Алушта, Крым, с. 116.
  59. *Денисенко В.В., Фортова С.В., Трошкин О.В.*, Численное моделирование формирования проточных вихрей в идеальной среде // Материалы XXI Международной конференции по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2019), 24-31 мая 2019 г., Алушта, Крым. – с. 55.
  60. *Shepelev V.V., Fortova S.V., Inogamov N.A.*, Thermal and dynamic effects of laser irradiation of thin metal films // Материалы Международного Симпозиума «Fundamentals of laser assisted micro- and nanotechnologies», 30 июня-4 июля 2019 г., Санкт-Петербург, Россия.
  61. *Порошина, Я.Э., Уткин, П.С., Фортова, С.В.*, Численное исследование высокоскоростного соударения пластин с использованием широкодиапазонных уравнений состояния // Сборник научных трудов V Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2019. 12 – 15 февраля 2019 г. Москва. – ч. 1. – М.: НИЯУ МИФИ. – 2019. – с.341-342.
  62. *Fortova, S., Utkin, P., Shepelev, V., Kazakova, T.*, Mathematical modeling of the impact of high-speed metallic plates // Proceedings of 31st International Symposium on Shock Waves (Nagoya, Japan, 9–14 July 2017), v. 2, eds. A. Sasoh, T. Aoki, M. Katayama, Springer, 2019, pp.351-358. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-91017-8\\_44](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91017-8_44)
  63. *Фортова С.В., Денисенко В.В., Долуденко А.Н.*, Численное исследование двумерного течения жидкостей при постоянном внешнем воздействии на основе моделей Эйлера и Навье-Стокса // Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2020), 6-13 сентября 2020 г., Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2020. – с. 48-49.
  64. *Фортова С.В., Опарина Е.И.*, Численное исследование вихревого каскада неустойчивостей в сдвиговом слое невязкой сжимаемой среды // Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2020), 6-13 сентября 2020 г., Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2020. – с. 49.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Самарский А.А., Вабищевич П.Н., Математическое моделирование и вычислительный эксперимент. – Институт математического моделирования РАН, 2000.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Механика сплошных сред. – М.: Гостехтеориздат, 1953.
3. Рождественский Б.Л., Яненко Н.Н., Системы квазилинейных уравнений – М.: Наука, 1978.
4. Лойцянский Л.Г., Механика жидкости и газа. – 6-е изд. – М.: Наука, 1987.
5. Монин А.С., Яглом А.М., Статистическая гидромеханика. – том 1,2. – М.: Наука, 1965, 1967.
6. Белоцерковский О.М., Опарин А.М., Чечеткин В.М., Турбулентность: новые подходы. – М.: Наука, 2002.
7. Фабер Т.Е., Гидроаэродинамика. – М.: Постмаркет, 2001.
8. Годунов С.К., Рябенский В.С., Введение в теорию разностных схем. – М.: Физматгиз, 1962.
9. Роуч П., Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980
10. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П., Численное решение многомерных задач газовой динамики. – М.: Наука, 1976. – с. 100-110.
11. Белоцерковский О.М., Математическое моделирование на суперкомпьютерах (опыт и тенденции) // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2000, том 40, № 40.
12. Велихов Е.П., Бетелин В.Б., Кушниренко А.Г., Промышленность, инновации, образование и наука в России. – М.: Наука, 2010.
13. Куликовский А.Г., Погорелов Н.В., Семенов А.Ю., Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. – М.: Физматлит, 2001.
14. Четверушкин Б.Н., Гиперболическая квазигазодинамическая система // Матем. Моделирование. – 2018, том 30, № 2. – с. 81-98.
15. Яковлев И.В., Неустойчивость границы раздела соударяющихся поверхностей металлов // ФГВ. – 1973, том 9, № 3, с. 447.
16. Годунов С.К., Дерибас А.А., Козин Н.С., Волнообразование при сварке взрывом // Журн. прикл. мех. и техн. физики. – 1971, №3, с. 63-72.
17. Дерибас А.А., Захаров В.С., Соболенко Т.М., Тесленко Т.С., О переносе поверхностного рельефа в металлах ударными волнами // Физика горения и взрыва. – 1974, том 10, № 6, с. 931.
18. Волнообразование при косых соударениях: Сб. статей (под ред. Яковлев И.В., Кузьмин Г.Е., Пай В.В.) – Новосибирск: Изд-во Института дискрет. матем. и информатики, 2000. – 221 с.
19. Демченко В.В., Сергеев В. А., Неустойчивость поверхности соударения при высокоскоростном ударе // МЖГ. – 2003, № 6, с. 11-121.

20. Anisimov S.I., Zhakhovsky V.V., Inogamov N.A., Murzov S.A. and Khokhlov V.A., Formation and crystallisation of a liquid jet in a film exposed to a tightly focused laser beam // Quantum Electronics. – 2017, vol. 47 (6), p. 509.