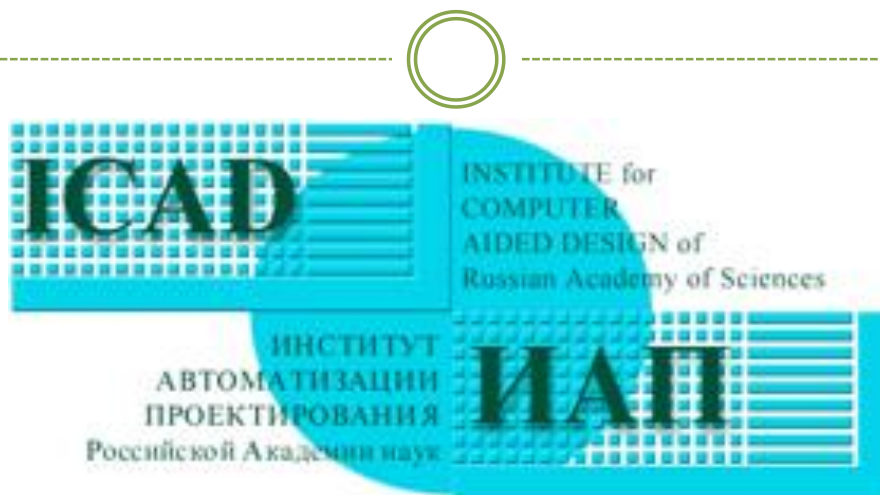


Пакет прикладных программ Turbulence Problem Solver (TPS)



**ИНСТИТУТ АВТОМАТИЗАЦИИ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАН
Г. МОСКВА, 2018**

Содержание



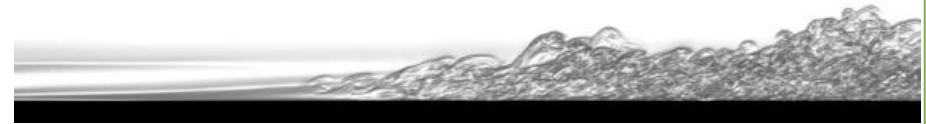
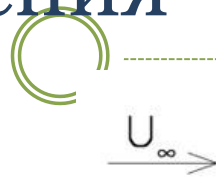
1. Характеристики пакета
2. Партнеры
3. Решаемые задачи:
 - Сдвиговые слои
 - Течение Колмогорова
 - Высокоскоростное соударение металлов
 - Фемтосекундная лазерная абляция
 - Неустойчивость Рэлея-Тейлора
4. Планы по развитию

Область применения пакета TPS

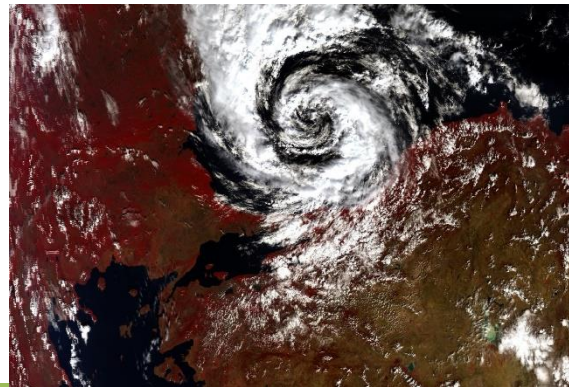


Численное описание
фундаментальных
физических эффектов в
натурных экспериментах

Спектр решаемых задач- невязкие течения



- Гидродинамика
- Турбулентные течения
- Действие интенсивного лазерного излучения
- Высокоскоростное столкновение

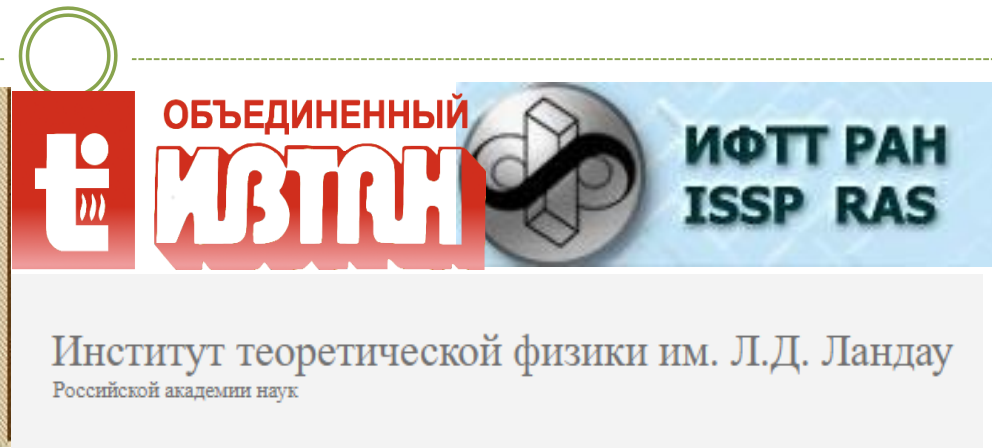
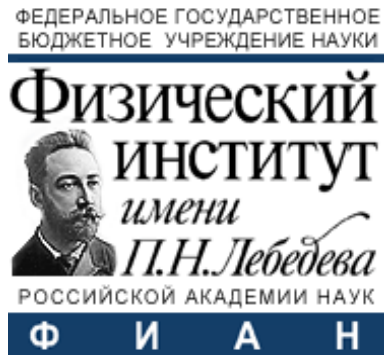


Коллектив авторов ИАП РАН



- Академик Белоцерковский О.М.
- Фортова С., к.ф.-м.н., с.н.с.
- Шепелев В., к.ф.-м.н., с.н.с.
- Опарин А.М., к.ф.-м.н., с.н.с.
- Опарина Е., н.с.
- Крагинский Л., к.ф.-м.н., н.с.
- Денисенко В., к.ф.-м.н., м.н.с.

Партнеры по научной работе

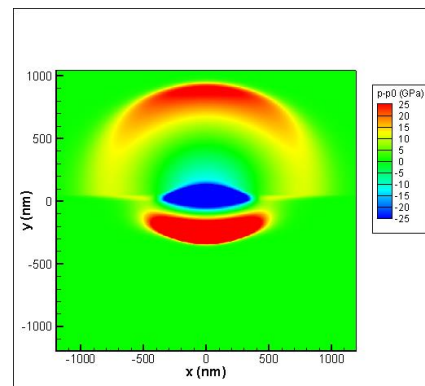
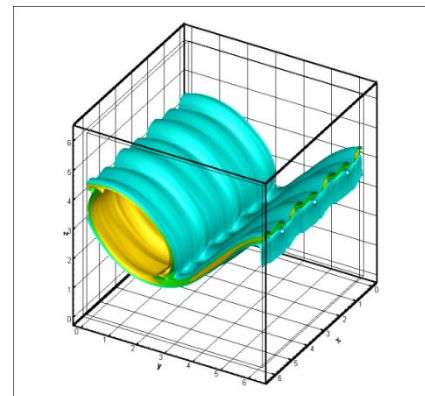
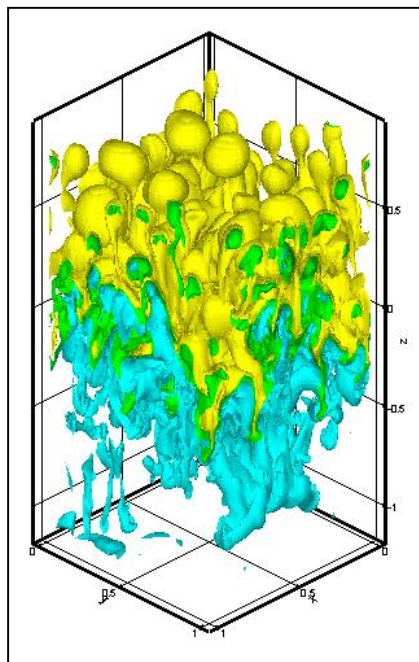
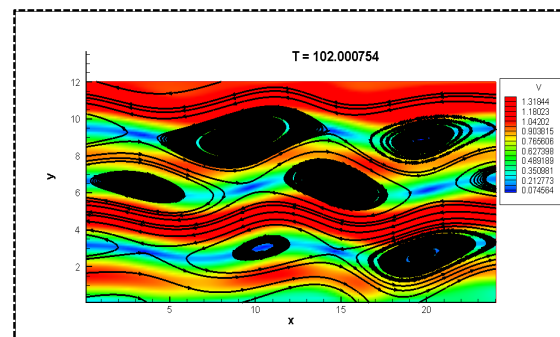
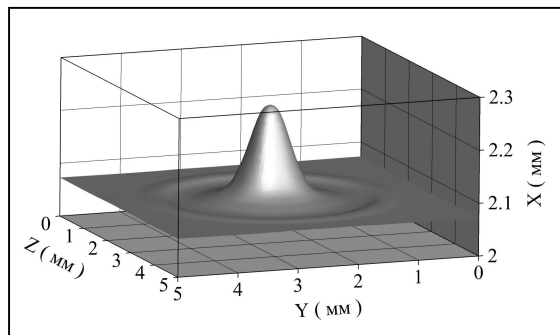


- Институт Теоретической физики им. Ландау РАН
- Институт Физики твердого тела РАН
- Объединенный Институт Высоких Температур РАН
- Физический Институт РАН
- Институт Проблем Химической Физики РАН
- Институт математики СО РАН

Пакет прикладных программ



TURBULENCE PROBLEM SOLVER (TPS)



* Фортова С.В., Опарина Е.И., Крагинский Л.М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ N 2013618035 TURBULENCE PROBLEM SOLVER , 2013

Патент Turbulence Problem Solver (TPS)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013618035

Turbulence Problem Solver (TPS)

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации проектирования Российской академии наук (ИАП РАН) (RU)*

Авторы: *Фортова Светлана Владимировна (RU), Опарина Елена Ивановна (RU), Крагинский Леонид Маркович (RU)*



Заявка № 2013616026

Дата поступления 11 июля 2013 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 29 августа 2013 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

Предпосылки создания кода



Идея создания кода принадлежит академику О.М. Белоцерковскому.

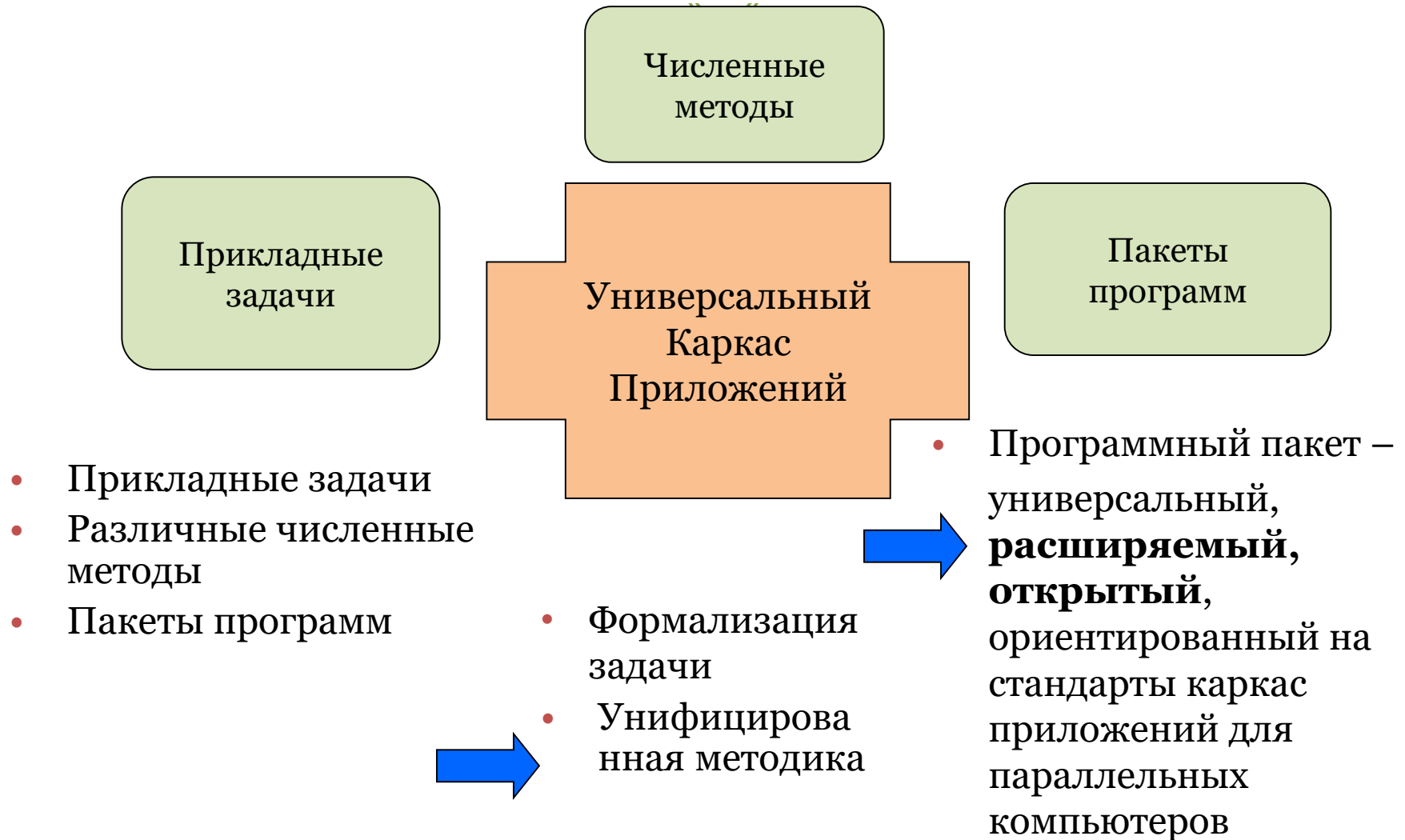
- Задачи, описываемые **системой уравнений гиперболического типа**, обобщены и формализованы для единообразного численного решения.
- Для решения этих таких задач разработаны различные расчетные методики, которые можно объединить в одном комплексе программ.

Цель создания кода



- **Цель**-создание единой технологии построения пакета прикладных программ для решения задач механики сплошных сред.
- **Способы реализации**- обобщение, формализация и объединение в единый программный комплекс:
 - различных численных методик;
 - граничных и начальных условий;
 - внешних сил;
 - уравнений состояния вещества.

Разработка новых параллельных солверов в рамках универсальной технологии параллельных вычислений для гиперболических уравнений в частных производных.



Характеристики пакета



Классы течений
сжимаемые невязкие,
двухкомпонентные

Модели
Уравнения Эйлера

Сетки
Структурированные
прямоугольные

Параллельность
MPI SPMD
Численные
методы

Солверы Годунова, Роу, HLL,
HLLC, Лакса-Фридрихса

Реконструкции TVD, ENO,
MUSCL

Методы крупных частиц,
Лакса-Вендроффа, Макормака

Технологии
C++, Python

Технологическая платформа



- Пакет тестировался на платформах:
Intel, Param, MBC-1000
- Операционные системы:
Windows, Solaris, Linux;
- Реализации MPI:
WMPI, MPICH.

TPS – Формализация постановки

Система уравнений в частных производных гиперболического типа

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + A \frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial Q}{\partial y} + C \frac{\partial Q}{\partial z} = G \quad (1)$$

Метод расщепления по физическим процессам и пространственным переменным

- Система гиперболических уравнений сводится к решению нескольких уравнений переноса
- Код решения уравнения переноса единообразен для любого солвера, реконструкции и сетки

Дерево наследования солверов

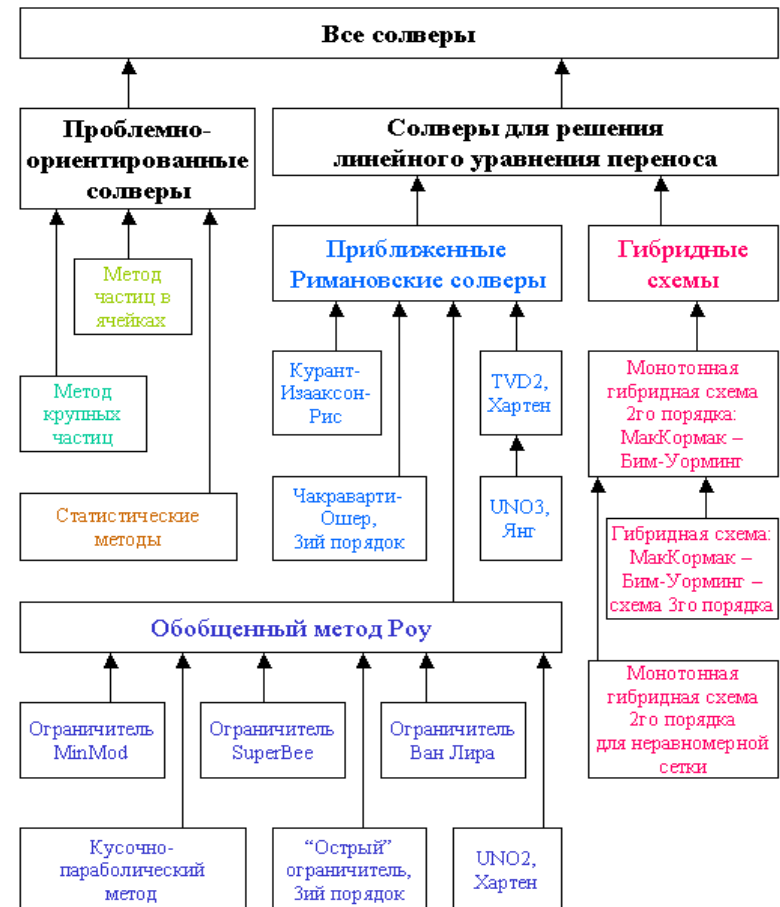


Диаграмма классов пакета TPS

HApplication:

Инициализация/деи
нициализация
пакета

HProblem:

Физическая
постановка задачи,
Начальные и
граничные условия,
Вид уравнений,
правая часть,
уравнения
состояния вещества.

Пакет TPS

HMethod:

Численный
метод

HState:

Решение в предыдущий и
настоящий момент
времени

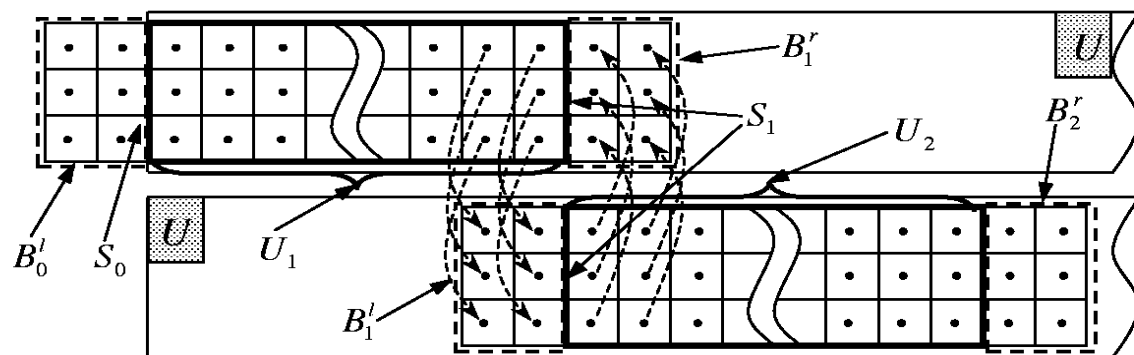
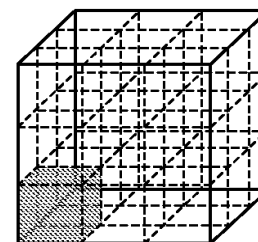
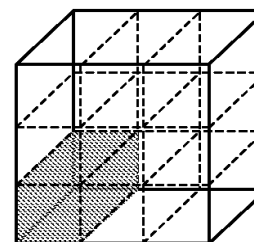
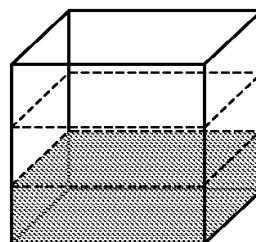
Параллельная реализация



Реализована декомпозиция по трем пространственным переменным, что приводит к сложности коммуникаций порядка $3\sqrt[3]{N}$

Модель программирования SPMD(Single Program, Multiply Data)

N	1	4	8	16	20	32
T (sec)	68.251	17.214	8.677	4.382	3.541	2.272
S	1	3.964854	7.865737	15.57531	19.2745	30.04005
E	1	0.991214	0.983217	0.973457	0.963725	0.938752



Показатели эффективности
для решетки 100x100x80.
Суперкомпьютер МВС-
1000/17 IAP с 32
процессорами
Intel Xeon с
быстродействием 1700 МГц.

Создание элементов пре- и постпроцессора для подготовки и обработки данных.

Элементы препроцессора:

- Задание конфигурации задачи
- Задание параметров задачи
- Задание алгоритмов решения

Элементы постпроцессора:

- Прореживание, интерполяция данных
- Построение недостающих полей
- Построение сечений и линий
- Визуализация

```
graph TD; A[Графический интерфейс – выполняется на однопроцессорном компьютере – щлюзе (возможно, удаленно по сети через X-сервер или web-браузер)] --> B[Параллельная программа – расчетная часть]; B --> C[Обработка данных: в пакетном режиме, визуализация];
```

Графический интерфейс –
выполняется на однопроцессорном
компьютере – щлюзе
(возможно, удаленно по сети через
X-сервер или web-браузер)

Параллельная
программа –
расчетная часть

Обработка данных: в пакетном режиме,
визуализация

Пример экранной формы



The screenshot shows a software window titled "Fire modelling configurator" with a blue header bar. It contains several tabs: "main data", "problem data", and "fire date". The "main data" tab is active. The window is divided into sections for loading and creating new data, with various input fields and buttons.

main data | **problem data** | **fire date**

load configuration file name
fire1.fmc Open

new data

i	j	k
250	250	100
ip	jp	kp
5	5	2

components number
6

solver name
HARTEN_TVD2

directory name
fire_harten_tvd Open

output file name prefix
fire Open

temporary file name
fire Open

control file name
control Open

time interval to save after
900

frames number
20

Generate Run

Преимущества TPS



- Программный каркас- собрание функций, интерфейсов и классов, объединенных в общую программу
- Объектно- ориентированный подход к разработке приложений
- Пользователи работают только с последовательной частью программы.
- Сокращаются сроки разработки новых программных приложений
- Эффективно используются многопроцессорные вычислительных системы
- Быстрое переключение на альтернативный численный метод.

Сдвиговые слои

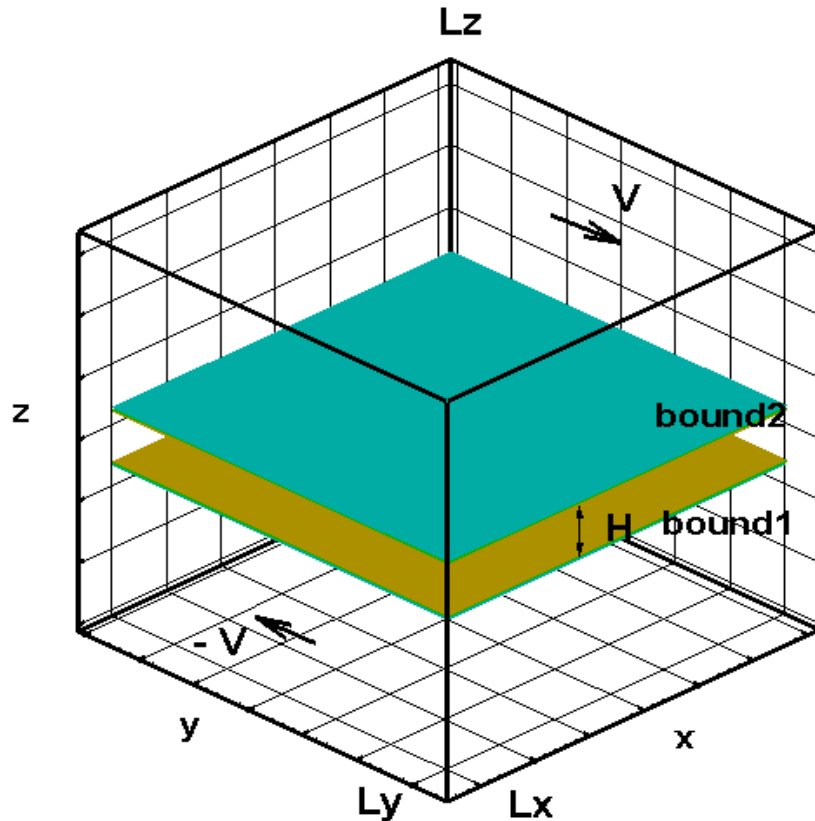
- 3D турбулентность
- Начальная стадия возникновения турбулентности
- Формирование вихревых каскадов

Цель исследования



- Смоделировать **начальную стадию** возникновения турбулентности в сдвиговом слое
- Показать, что турбулентность начинается с образования **крупных структур**
- Получить **прямой вихревой каскад**, соответствующий энергетическому каскаду Колмогорова

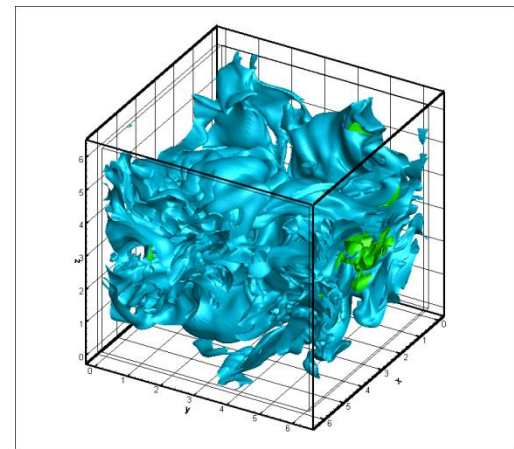
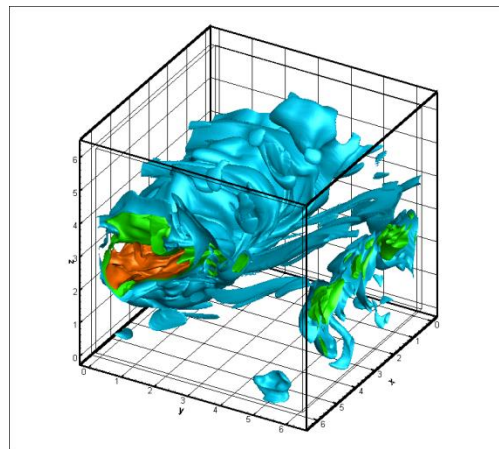
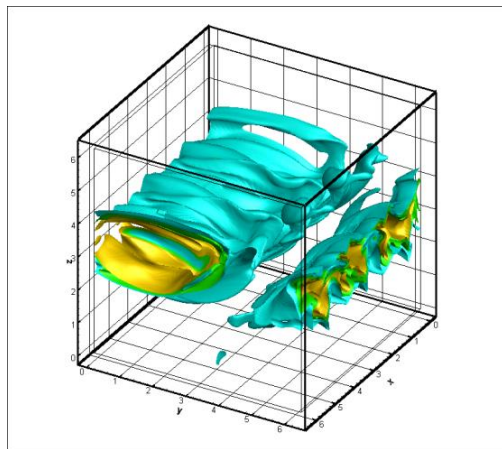
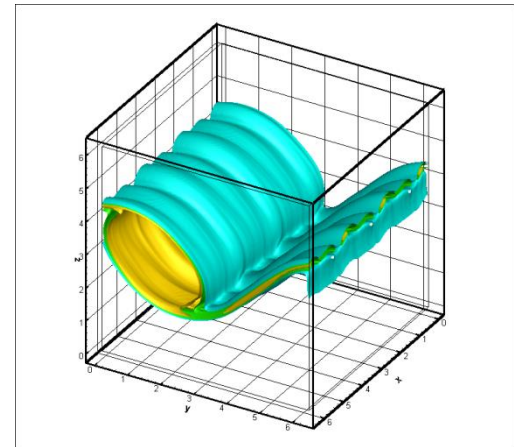
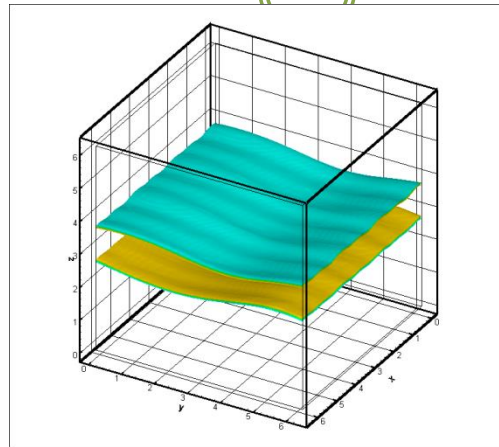
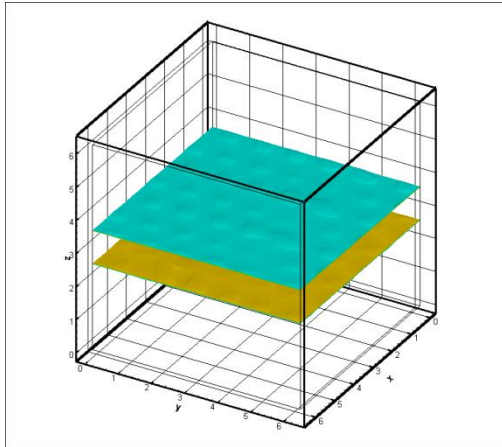
Постановка задачи



Исследуется эволюция структуры сдвигового течения с конечной в поперечном сечении областью постоянного ненулевого градиента скорости с различными параметрами течения.

- Начальные условия различные
- Граничные условия: сверху и снизу стенки, на остальных границах условия периодичности
- Идеальное уравнение состояния вещества.

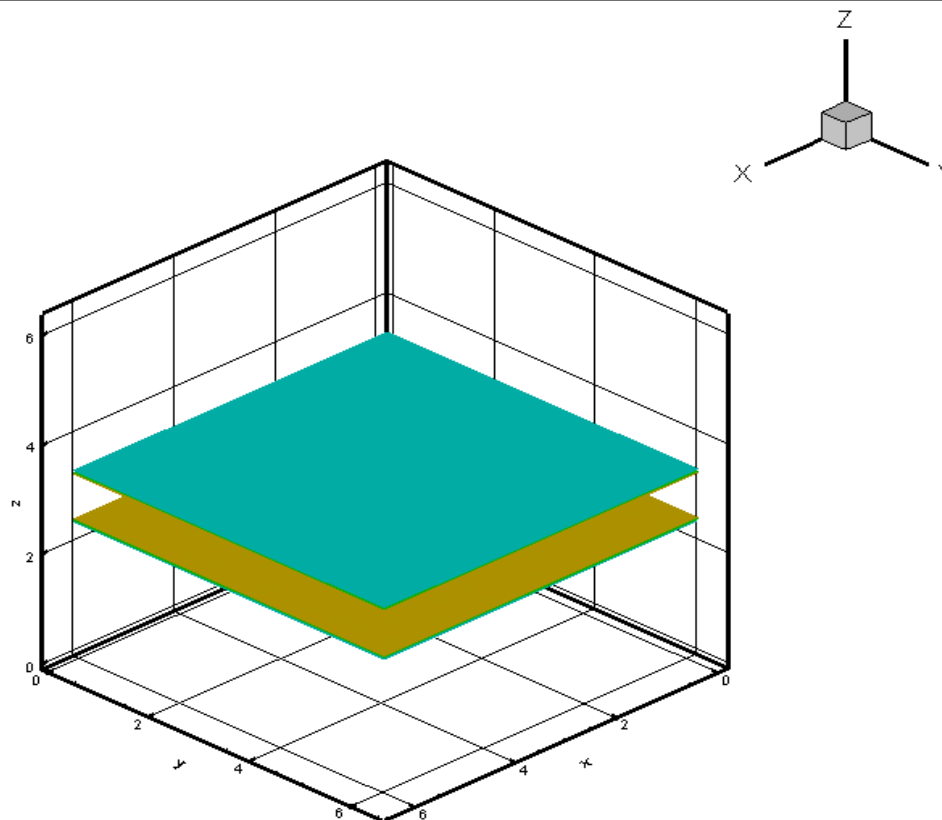
Вихревой каскад



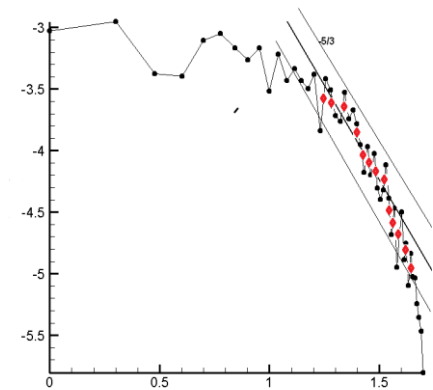
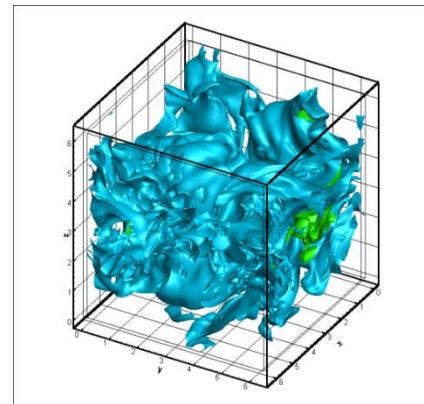
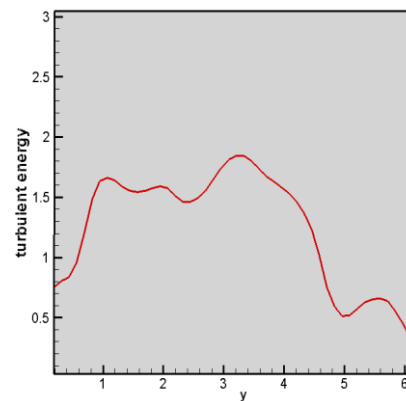
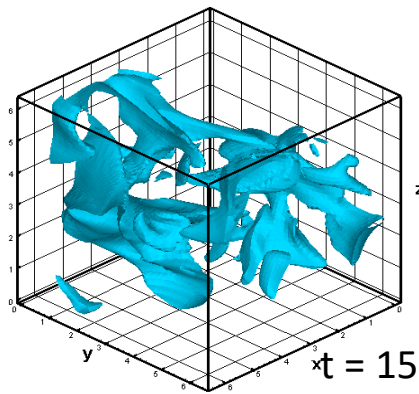
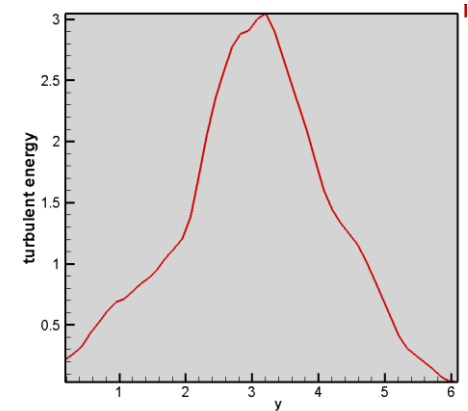
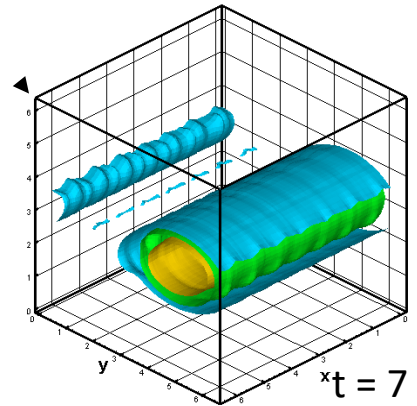
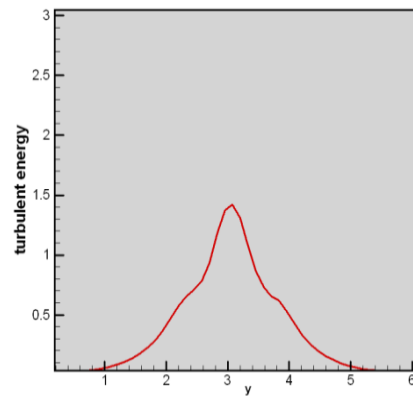
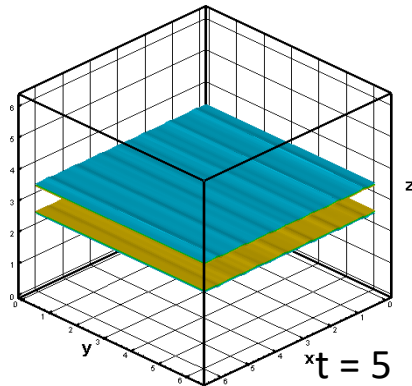
Изоповерхности плотности в различные моменты времени.

Вихревой каскад неустойчивостей. 3D моделирование

Frame 001 | 25 Jun 2009 | |||||



Распределение энергии и закон Колмогорова $-5/3$



* Белоцерковский О. М., Фортова С. В. Исследование каскадного механизма развития турбулентности в свободно-сдвиговом течении. // Доклады АН, 2012, Т. 443, № 1, с. 1-4.

Результаты



- ✓ Численное исследование начальной стадии турбулентности
- ✓ Переход к хаосу осуществляется через вихревой каскад неустойчивости
- ✓ Выявлены условия, при которых данный каскад возникает
- ✓ Воспроизведены основные характеристики колмогоровского процесса

Течение Колмогорова

- 2D турбулентность
- Формирование течения Колмогорова
- Формирование обратного вихревого каскада

Цели исследования



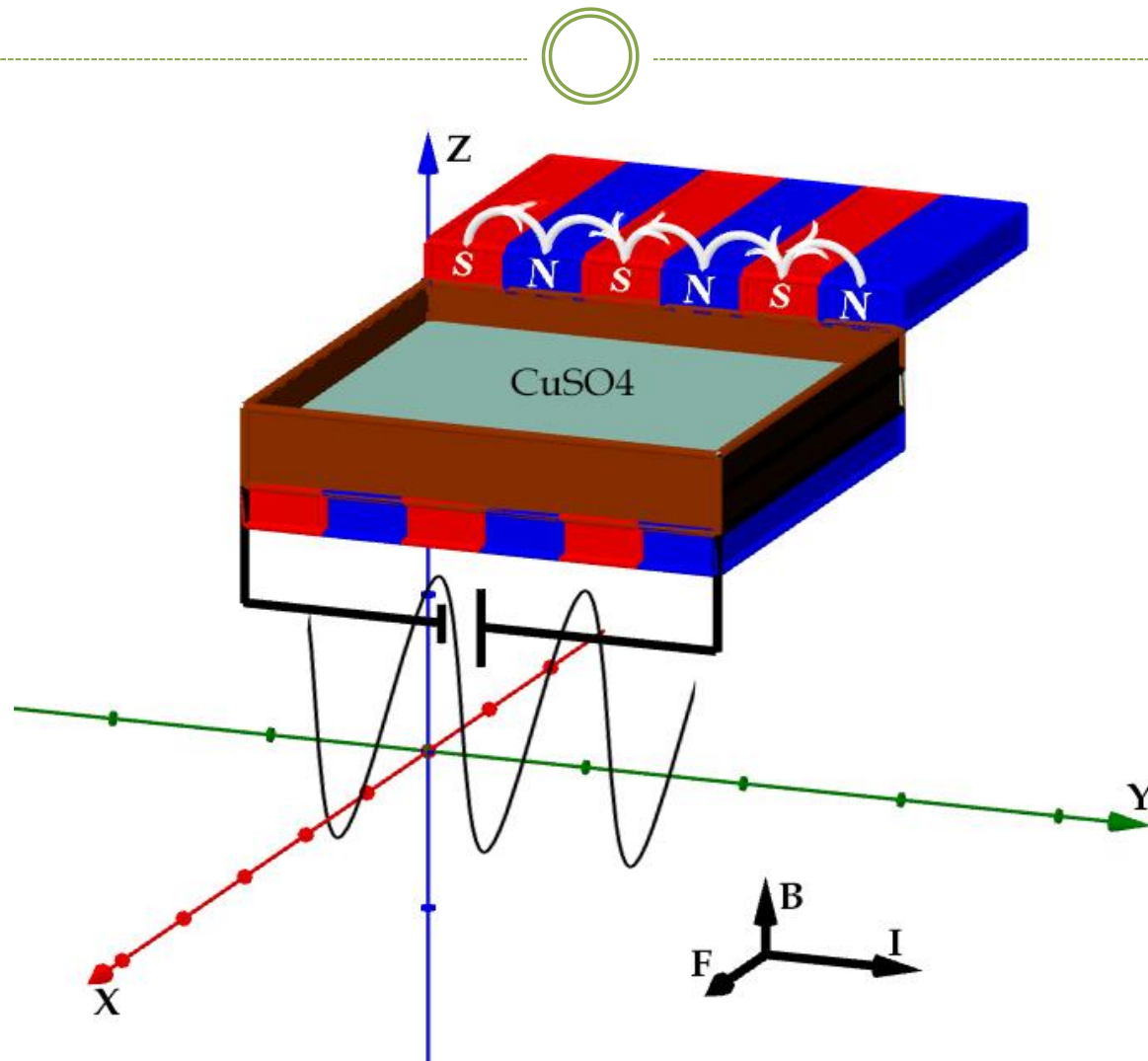
- Смоделировать течение Колмогорова- “ПАРКЕТ”
- Получить **обратный вихревой каскад**



Течение Колмогорова – двумерное движение жидкости под действием периодического поля внешней силы

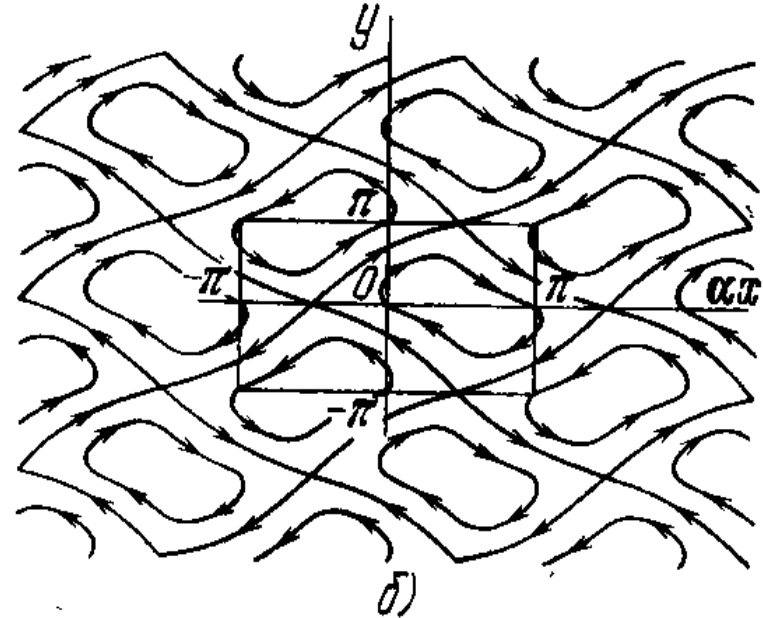
* G. Boffetta, R. E. Ecke, « Two-dimensional turbulence,» Annu.Rev. Fluid Mech7 44,427 (2012).

Схема эксперимента



* Гледзер Е.Б., Должанский Ф.В., Обухов. А. М. Системы гидродинамического типа и их применение. М.: Наука, 1981.

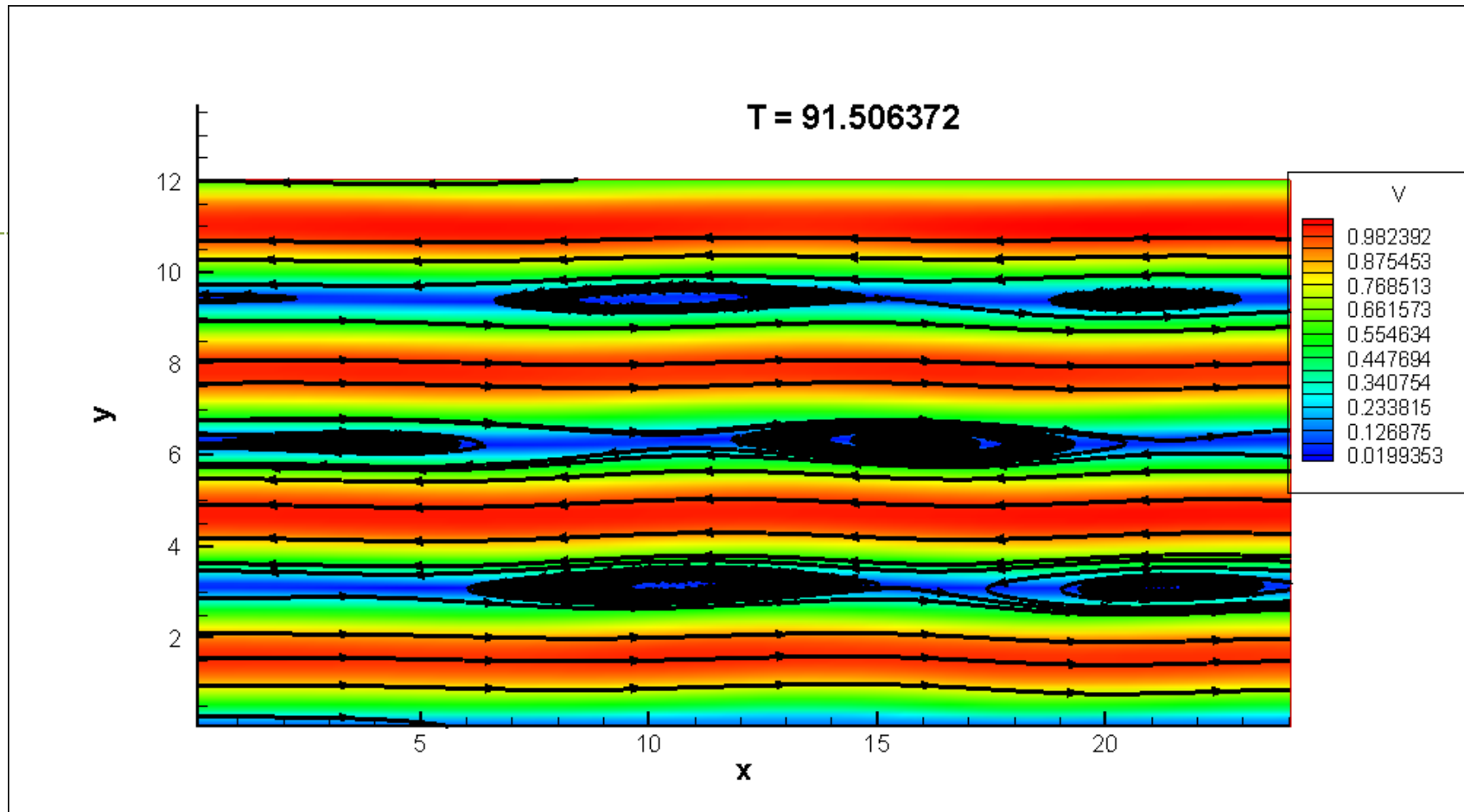
Течение “ПАРКЕТ”-образование когерентных структур



Картина течения. а) эксперимент, б) теория.

* Мешалкин Л.Д., Синай Я.Г. Исследование устойчивости стационарного решения одной системы уравнений плоского движения несжимаемой вязкой жидкости // ПММ. 1961. Т. 25. Вып. 6. С. 1140–1143.

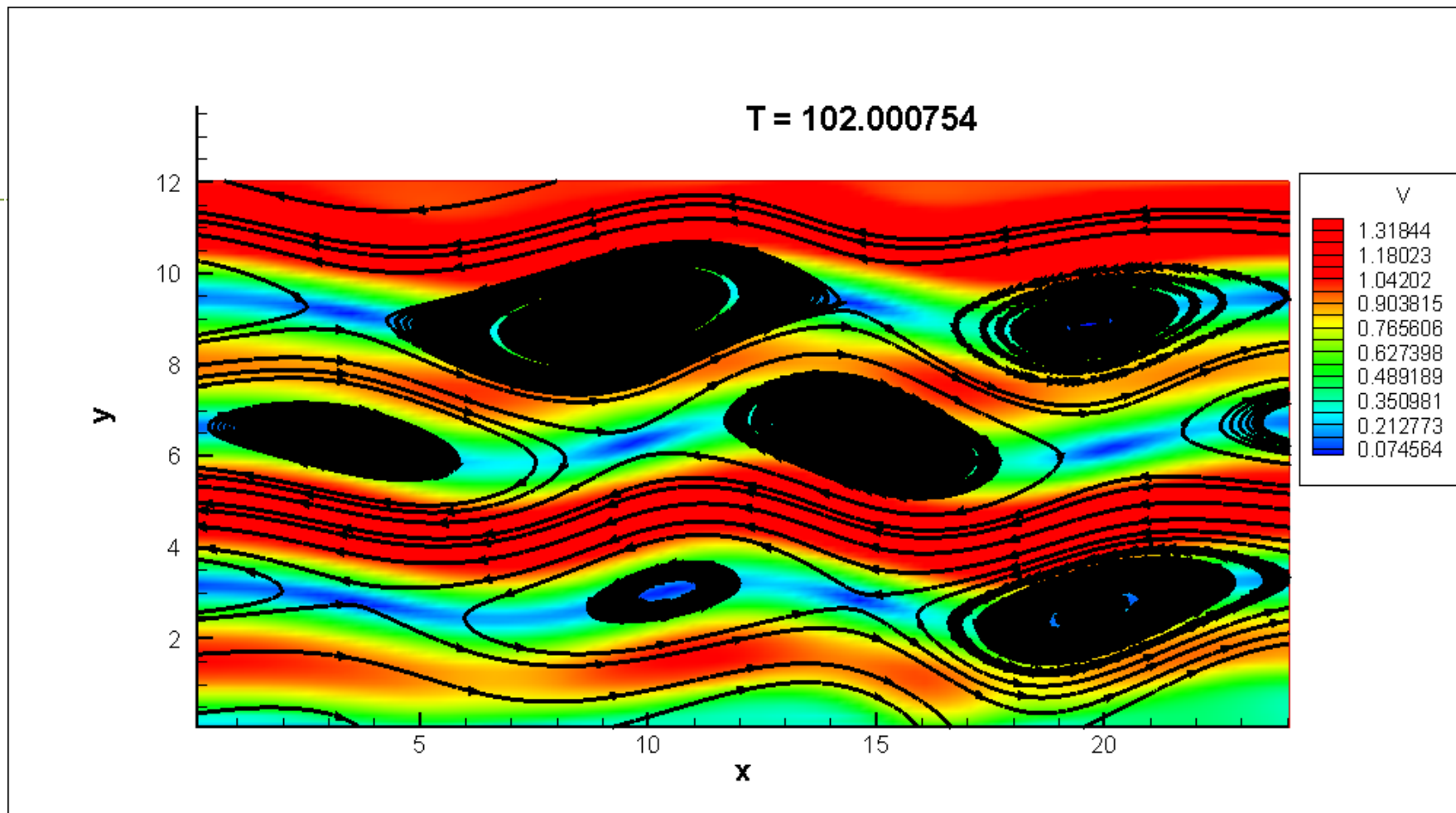
Результаты моделирования



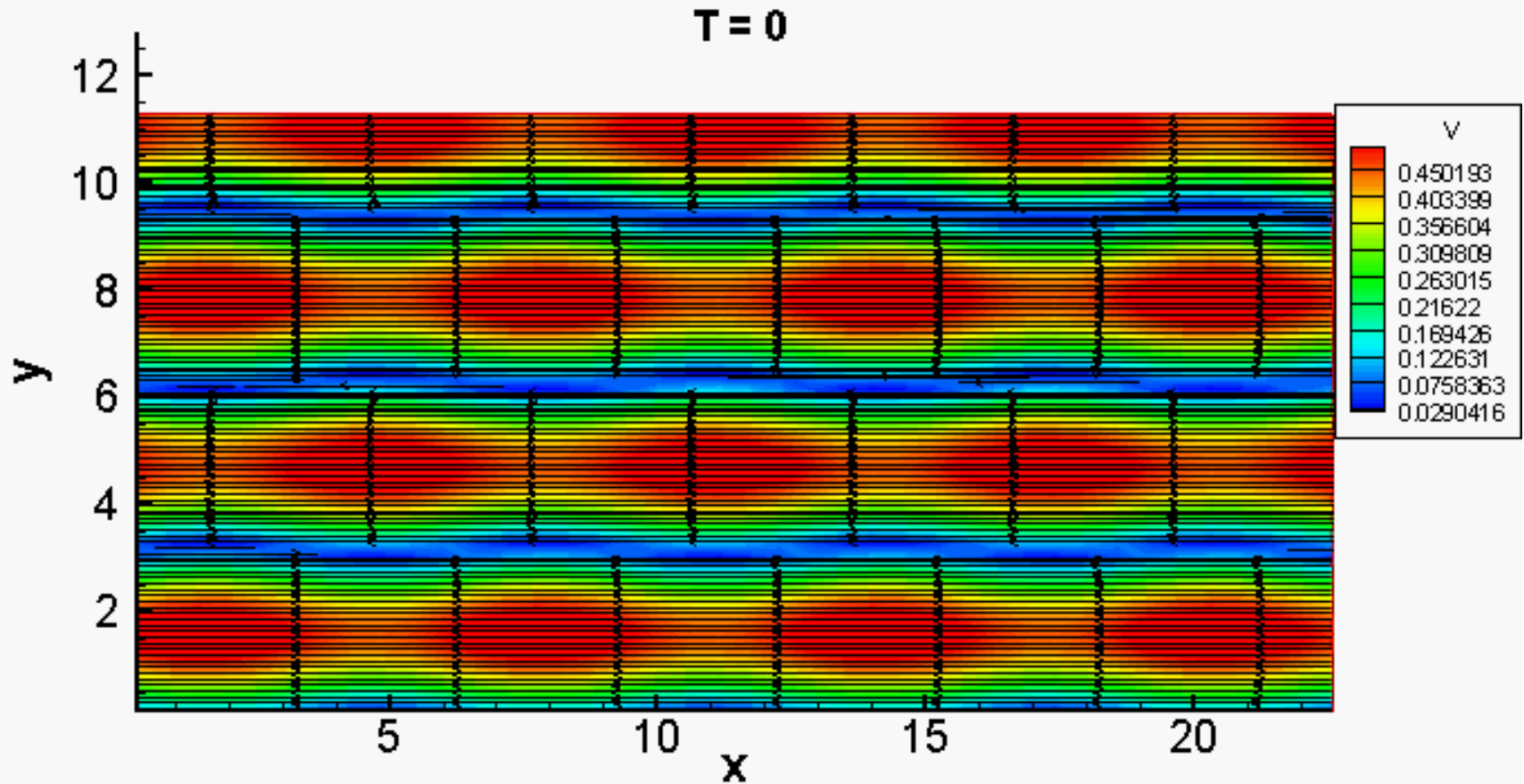
Начальное условие:

$$= 0.1\sin(y) + 0.005\sin(2x), [0; 8] \times [0; 4]$$

Результаты моделирования



Результаты моделирования



Результаты



- ✓ Прямое численное моделирование процесса формирования режима «паркет»
- ✓ Малое начальное возмущение скорости приводит к формированию течения типа «паркет»
- ✓ **Обратный вихревой каскад**

Высокоскоростное соударение металлических пластин

- Формирование кратеров на контактной границе
- Проверка гипотезы о развитии неустойчивости
- Различные вычислительные методы и УРС

Цель исследования



- Получить качественные и количественные характеристики процесса сверхзвукового столкновения металлических пластин
- Воспроизвести **Рэля-Тейлоровскую природу** возникновения кратеров на поверхности пластины
- Исследовать **влияние уравнения состояния** на характеристики процесса
- Построить модель, наиболее точно описывающую процесс соударения

Эксперимент



- 1 – стальная пластина
- 2 – свинцовая пластина
- 3 – заряд взрывчатого вещества
- 4 – детонатор

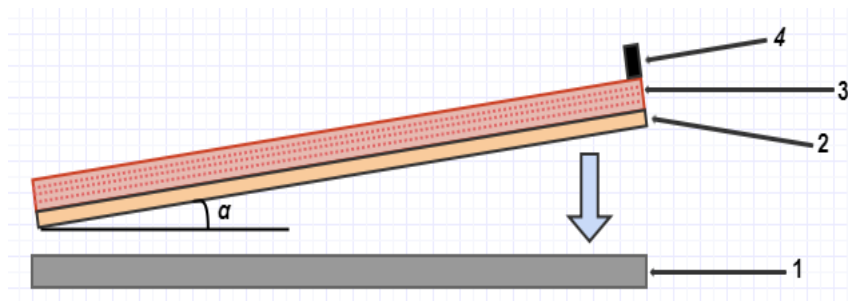
Параметры эксперимента:

- Скорость удара 470 м/с
- Толщина свинцовой пластины 2 – 9 мм
- Толщина стальной пластины 3 – 30 мм

Эксперименты:

- Варьируется толщина нижней пластины;
- Варьируется толщина верхней пластины (существенные различия в образовании структур)

Схема эксперимента:



- **Образование кратеровидных структур:**

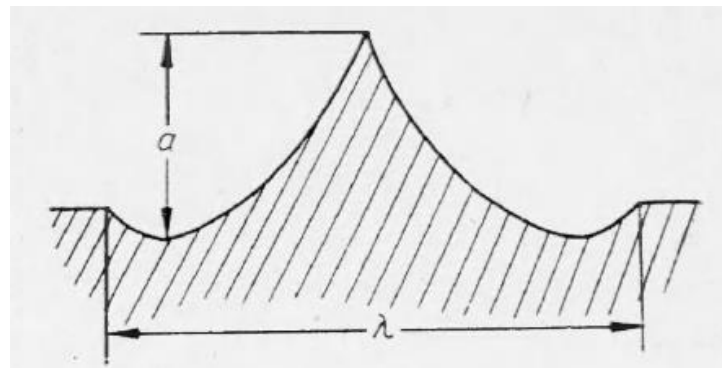


Результаты эксперимента

Кратеровидные образования на нижней пластине



Схематичное изображение выплеска



- В процессе удара происходит образование выплесков материала в стальной пластине;
- Толщина стальной пластины, не влияет на образование выплесков;
- Увеличение толщины свинца от 2 мм до 9 мм ведет к увеличению размеров кратеров;
- Толстые свинцовые пластины (9 мм и более) не приводят к образованию выплесков;
- Время нахождения металлов в пластическом состоянии 5-10 мкс;

Уравнения состояния и модели

Уравнения состояния

Идеальный газ

УРС Ми-Грюнайзена

Широкодиапазонные
УРС

Модели

Уравнения
Эйлера

Двухжидкостная
модель Баера-
Нунциато

Подходы

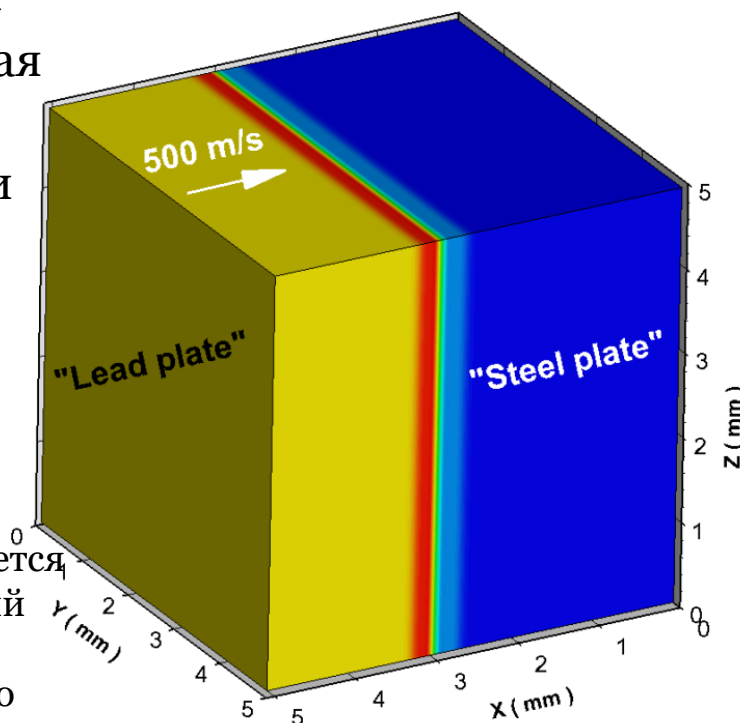
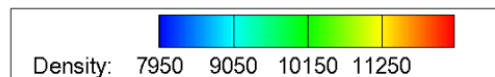
1-й подход

- ✓ 3D Уравнения Эйлера
- ✓ Монотонная гибридная схема
- ✓ УРС идеального газа и двучленный УРС

Для получения качественных трехмерных эффектов на контактной границе используется модель на основе 3D уравнений Эйлера.

Для получения количественно близких характеристик процесса внедрено двучленное УР С для среды.

УВ	Давление	Скорость УВ
Сталь	7.24 ГПа (–7%)	3.40 км/с (–28%)
Свинец	7.24 ГПа (–7%)	2.38 км/с (+28%)



Эталонные значения:

- ✓ База данных по ударным волнам, <http://www.ihed.ras.ru/rusbank/>

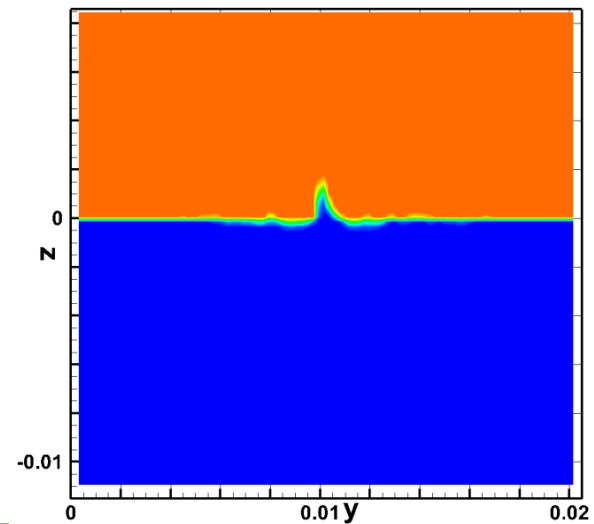
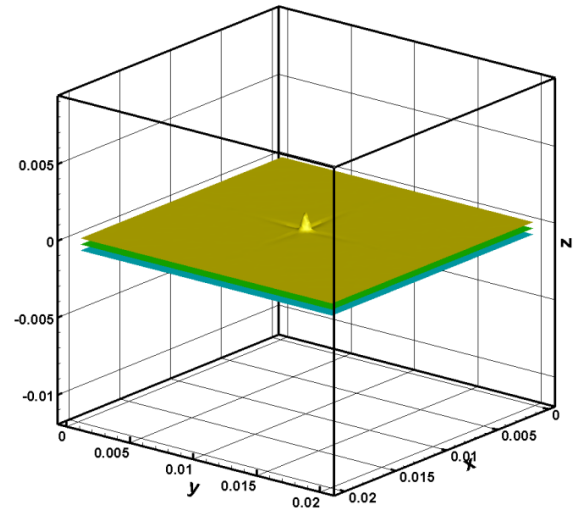
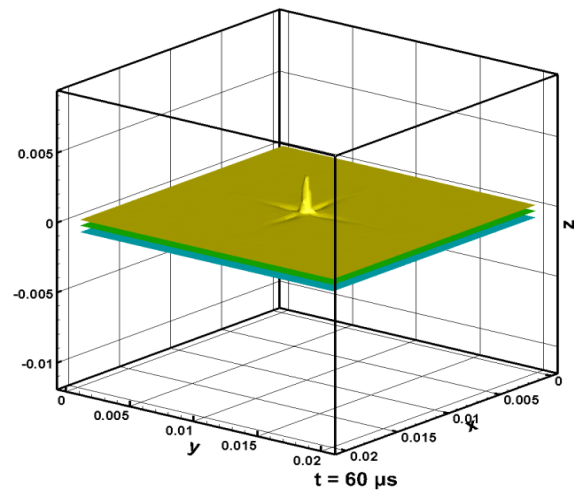
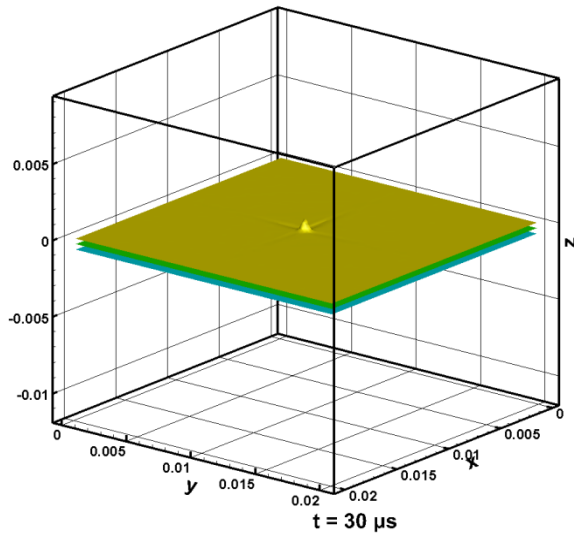
2-й подход

- ✓ 1D-3D уравнения двухжидкостной динамики типа Баера-Нунциато
- ✓ Схема HLL
- ✓ Двучленное УРС для каждой из жидкостей

Для получения количественно верных характеристик процесс используются уравнения двухжидкостной динамики.

УВ	Давление	Скорость УВ
Сталь	7.8 ГПа (–2%)	5.05 км/с (+7%)
Свинец	7.8 ГПа (–2%)	1.90 км/с (–4%)

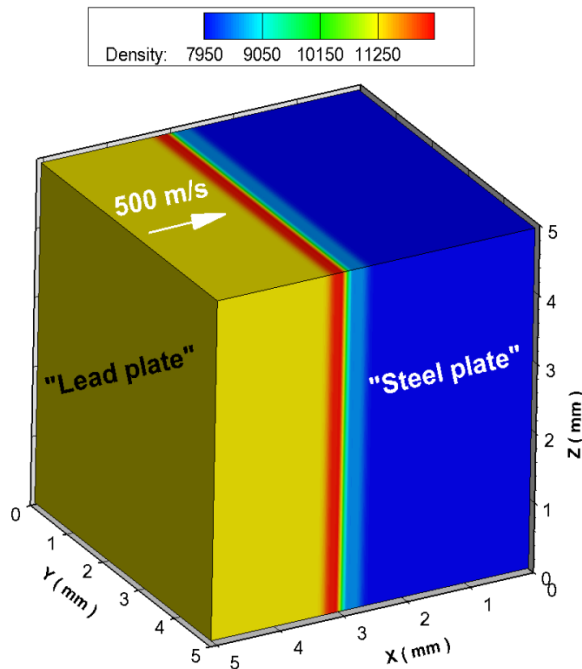
Неустойчивость Рэля-Тейлора



РТН – двучленное УРС



Трехмерные уравнения Эйлера в декартовой системе координат для двухкомпонентной смеси при наличии внешнего ускорения:



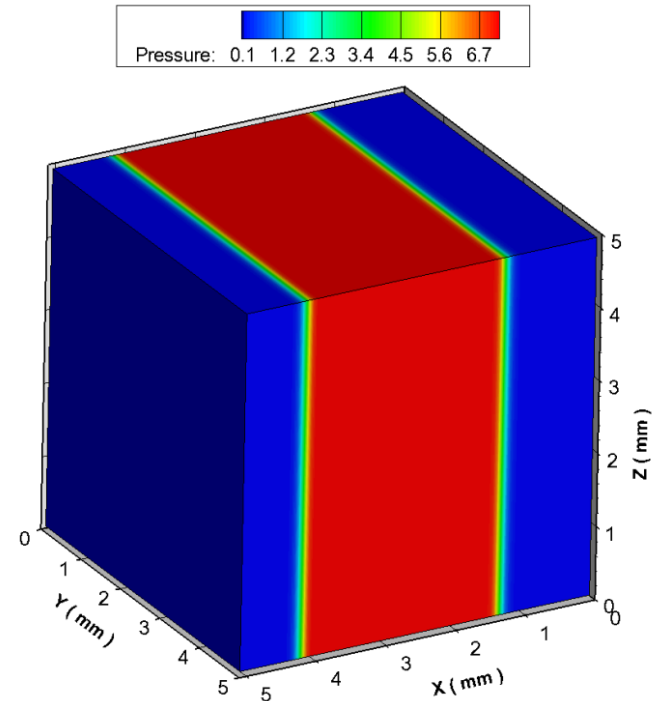
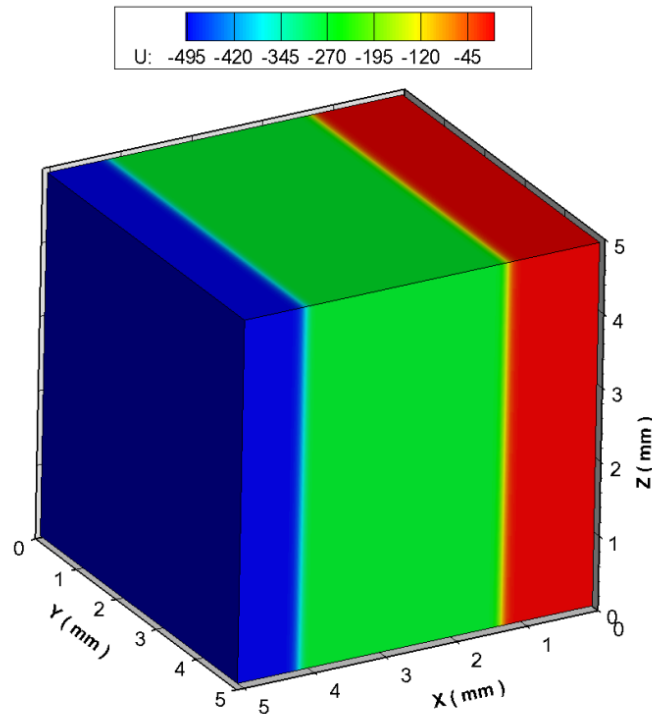
$$\mathbf{u}_t + \mathbf{f}_x(\mathbf{u}) + \mathbf{g}_y(\mathbf{u}) + \mathbf{h}_z(\mathbf{u}) = \mathbf{s},$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ e \\ \rho_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} \rho_1 u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ (e+p)u \\ \rho_2 u \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} \rho_1 v \\ \rho vu \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ (e+p)v \\ \rho_2 v \end{bmatrix}, \quad \mathbf{h} = \begin{bmatrix} \rho_1 w \\ \rho wu \\ \rho wv \\ \rho w^2 + p \\ (e+p)w \\ \rho_2 w \end{bmatrix}, \quad \mathbf{s} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\rho a \\ -\rho aw \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$e = \frac{\rho}{2}(u^2 + v^2 + w^2) + \rho \varepsilon(p, \rho), \quad \rho = \rho_1 + \rho_2,$$

$$\varepsilon_{ideal}(p, \rho) = \frac{p}{\rho(\gamma - 1)}, \quad \varepsilon_{stiff}(p, \rho) = \frac{p + \gamma P_0}{\rho(\gamma - 1)}.$$

Калибровка двучленного УРС

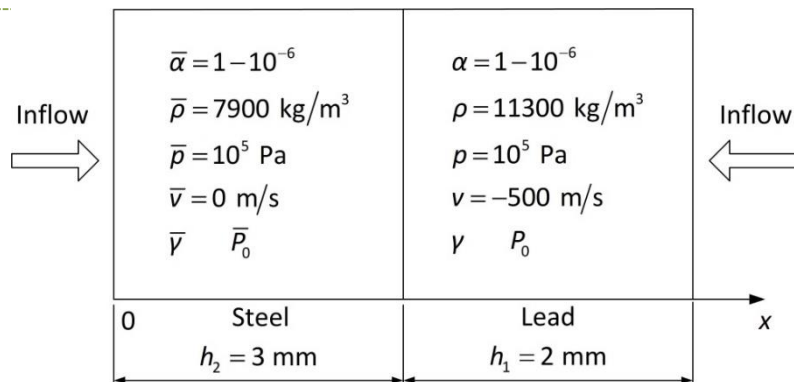


$$\gamma = 3.0, P_0 = 25 \text{ GPa}$$

Эталонные значения:

✓ База данных по ударным волнам, <http://www.ihed.ras.ru/rusbank/>

Двухжидкостная модель



Модель из 7 уравнений типа Баера-Нунциато (Saurel R., Abgrall R. // JCP. 1999. 150):

Члены для релаксации скорости и давления на контактной границе

Неконсервативные члены

$$\mathbf{u}_t + \mathbf{f}_x(\mathbf{u}) = \mathbf{h}(\mathbf{u}) \bar{\alpha}_x + \mathbf{p},$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \bar{\alpha} \\ \bar{\alpha}\bar{\rho} \\ \bar{\alpha}\bar{\rho}\bar{v} \\ \bar{\alpha}\bar{\rho}\bar{E} \\ \alpha\rho \\ \alpha\rho v \\ \alpha\rho E \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\alpha}\bar{\rho}\bar{v} \\ \bar{\alpha}(\bar{\rho}\bar{v}^2 + \bar{p}) \\ \bar{\alpha}\bar{v}(\bar{\rho}\bar{E} + \bar{p}) \\ \alpha\rho v \\ \alpha(\rho v^2 + p) \\ \alpha v(\rho E + p) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{h} = \begin{bmatrix} -\tilde{v} \\ 0 \\ \tilde{p} \\ \tilde{p}\tilde{v} \\ 0 \\ -\tilde{p} \\ -\tilde{p}\tilde{v} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{p} = \begin{bmatrix} \mu\Delta p \\ 0 \\ -\lambda\Delta v \\ -\mu\tilde{p}\Delta p - \lambda\tilde{v}\Delta v \\ 0 \\ \lambda\Delta v \\ \mu\tilde{p}\Delta p + \lambda\tilde{v}\Delta v \end{bmatrix},$$

Законы сохранения для стали

Законы сохранения для свинца

Уравнение переноса объемной доли одного из металлов

Вектор консервативных переменных Вектор потоков

$$\bar{\alpha} + \alpha = 1, \quad \tilde{p} = \alpha\rho + \bar{\alpha}\bar{p}, \quad \tilde{v} = \frac{\alpha\rho v + \bar{\alpha}\bar{\rho}\bar{v}}{\alpha\rho + \bar{\alpha}\bar{\rho}}, \quad \Delta p = \bar{p} - p, \quad \Delta v = \bar{v} - v,$$

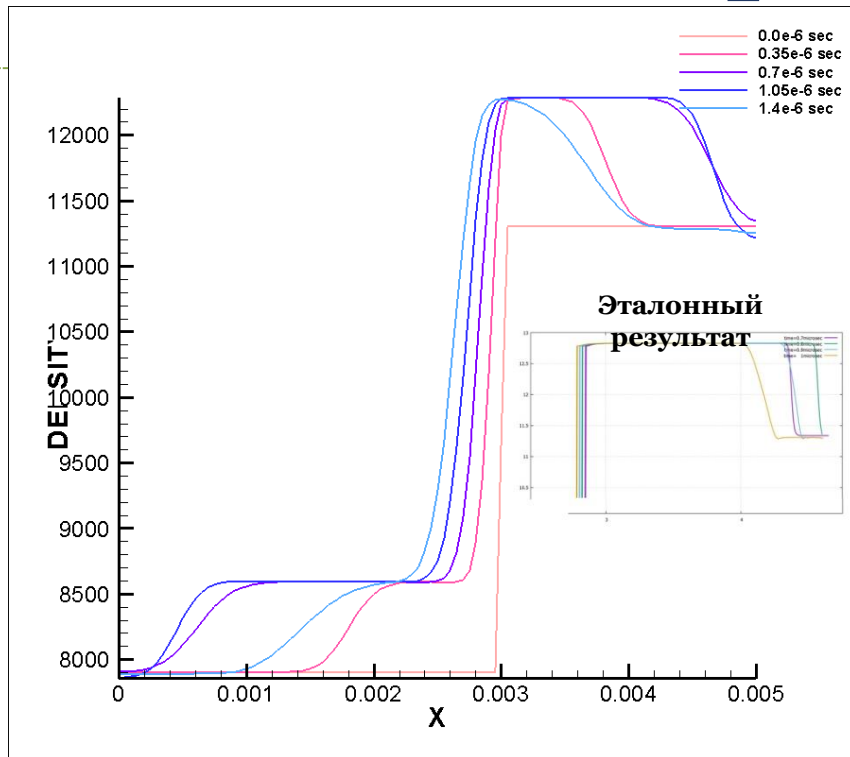
Параметры с чертой относятся к стали, без черты – к свинцу.

Параметры с тильдой - параметры на контактной границе.

$$\bar{E} = \frac{\bar{v}^2}{2} + \frac{\bar{p} + \bar{\gamma}\bar{P}_0}{\bar{\rho}(\bar{\gamma} - 1)}, \quad E = \frac{v^2}{2} + \frac{p + \gamma P_0}{\rho(\gamma - 1)},$$

Двучленные УРС с различными параметрами для различных металлов

Свободные границы пластин

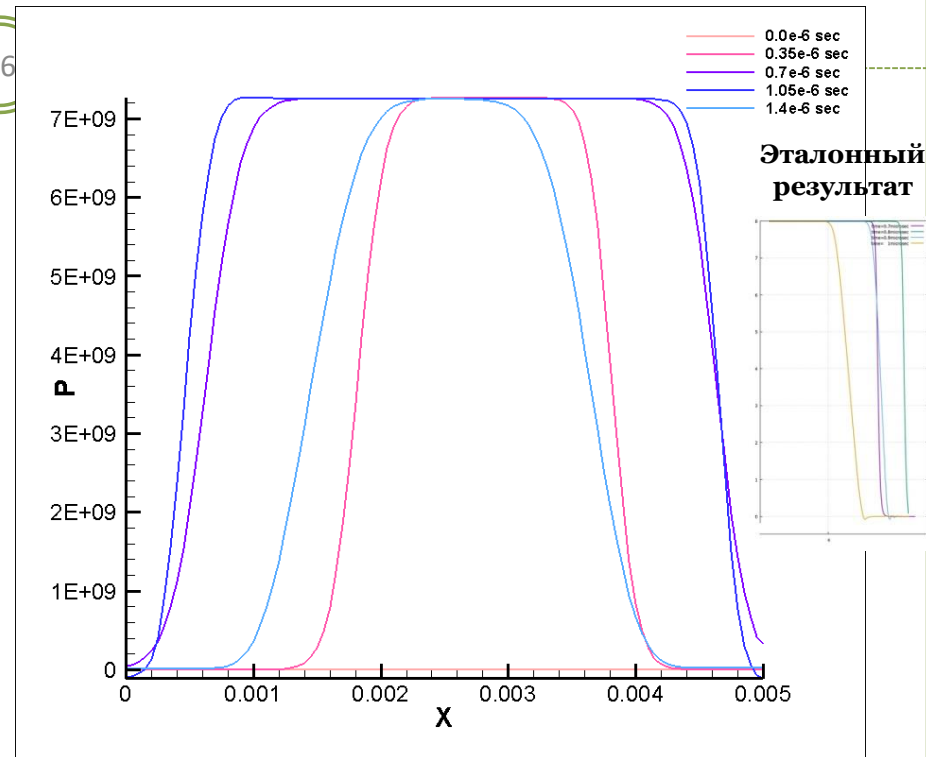


Левая граница:

$\rho_{in}^1 = 7900 \text{ кг/м}^3$	$\rho_{in}^2 = 7900 \text{ кг/м}^3$
$u_{in}^1 = v_{in}^1 = w_{in}^1 = 0 \text{ м/с}$	$u_{in}^2 = -544.8 \text{ м/с}$
	$v_{in}^2 = w_{in}^2 = 0 \text{ м/с}$
$p_{in}^1 = 10^5 \text{ Па}$	$p_{in}^2 = 10^5 \text{ Па}$

Если $t \leq 0.88 \text{ мкс}$

Если $t > 0.88 \text{ мкс}$



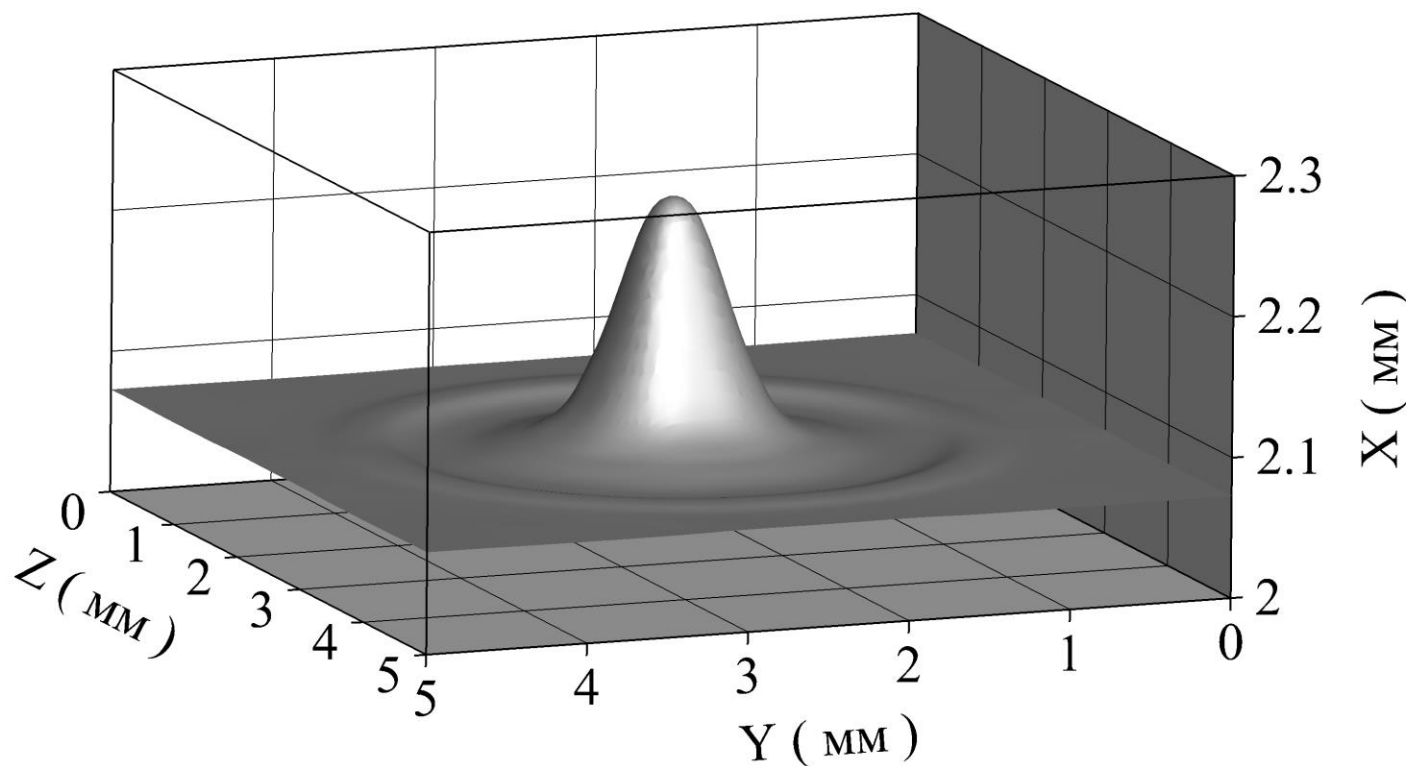
Правая граница:

$\rho_{in}^1 = 11300 \text{ кг/м}^3$	$\rho_{in}^2 = 11300 \text{ кг/м}^3$
$u_{in}^1 = -500 \text{ м/с}$	$u_{in}^2 = -45 \text{ м/с}$
$v_{in}^1 = w_{in}^1 = 0 \text{ м/с}$	$v_{in}^2 = w_{in}^2 = 0 \text{ м/с}$
$p_{in}^1 = 10^5 \text{ Па}$	$p_{in}^2 = 10^5 \text{ Па}$

Если $t \leq 0.92 \text{ мкс}$

Если $t > 0.92 \text{ мкс}$

Результаты



Изоповерхность плотности $\rho / 200 \text{ кг/м}^3$ в момент времени 2.3 мкс после начала соударения. Начальное возмущение – выпуклость в сторону свинца (сверху).

Результаты



- ✓ Представлена вычислительная технология исследования начальной стадии развития неустойчивости контактной границы металлических пластин при их высокоскоростном соударении.
- ✓ Решаются трехмерные уравнения Эйлера для среды с двучленным уравнением состояния.
- ✓ Вычислительный алгоритм второго порядка аппроксимации по пространственным переменным на гладких решениях основан на схема Harten-Lax-van Leer.
- ✓ Использованы полуэмперические уравнения состояния, построенные на основе расчетно-экспериментальных данных в НИИЭФ и ИПХФ РАН.
- ✓ Проведено численное исследование задачи высокоскоростного соударения свинцовой и металлической пластин в постановке, соответствующей натурным опытам И.В. Яковлева, ИГД СО РАН.
- ✓ Воспроизводятся стадии формирования ударных волн, их взаимодействия 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 возмущение контактной границы между пластинами после прохождения волн разрежения от свободных границ пластин приобретает кратерообразную форму, соответствующую натурным экспериментам.

Фемтосекундная лазерная абляция металлов

- Тонкая металлической пленки на стеклянной подложке
- Механизм образования технологических отверстий
- Газодинамическое приближение

Цель исследования



- Изучение возникновения технологических отверстий при воздействии фемтосекундного лазера на тонкие металлические пленки;
- **Моделирование ударно-волнового механизма образования отверстий.**

Фемтосекундные лазеры

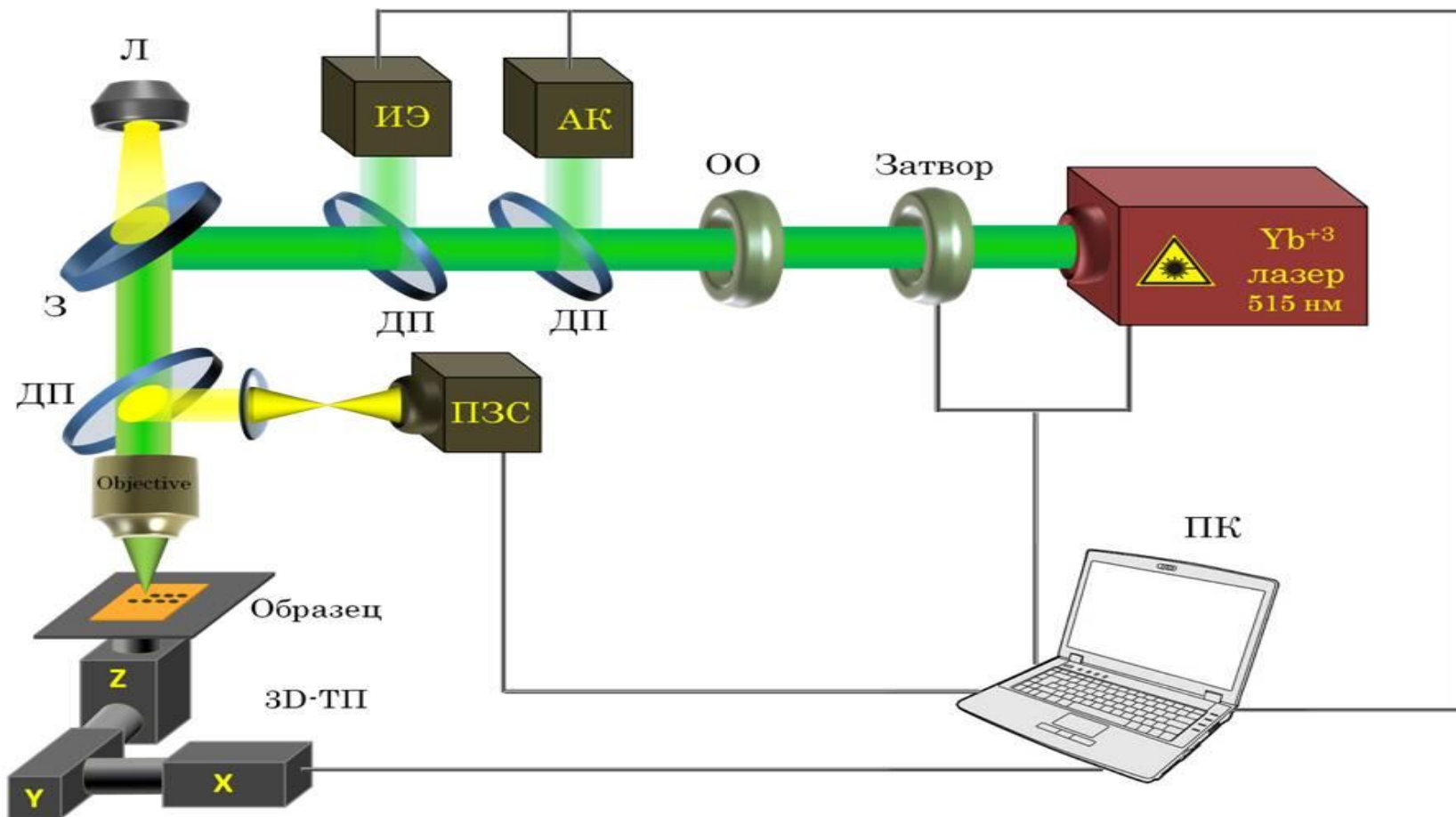


$$1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$$

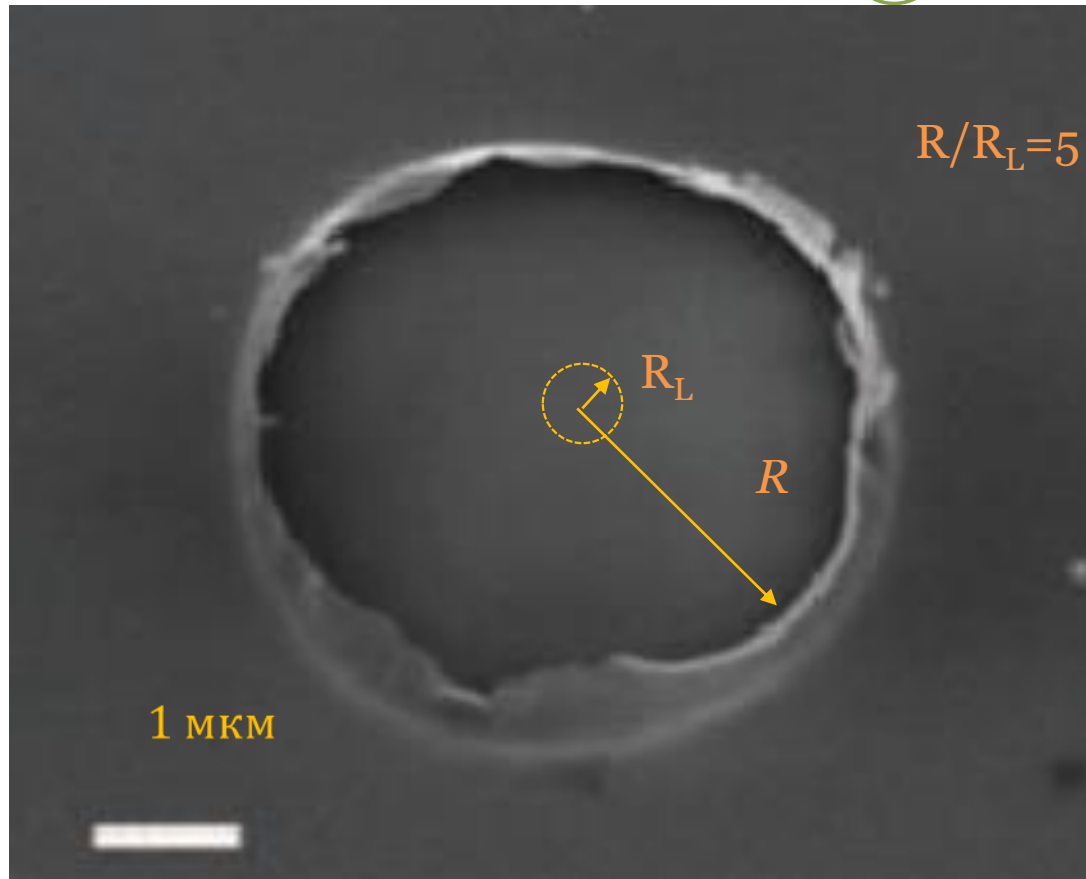
Технологическое применение

1. Генерация экстремальных плотностей энергии, давлений, температур.
2. Медицина.
3. Высокоточная обработка материалов.

Экспериментальная установка



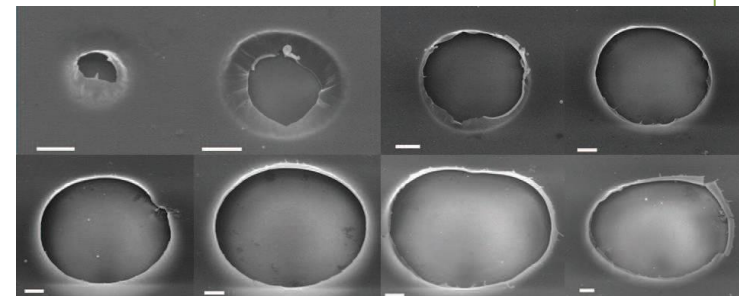
Результаты эксперимента



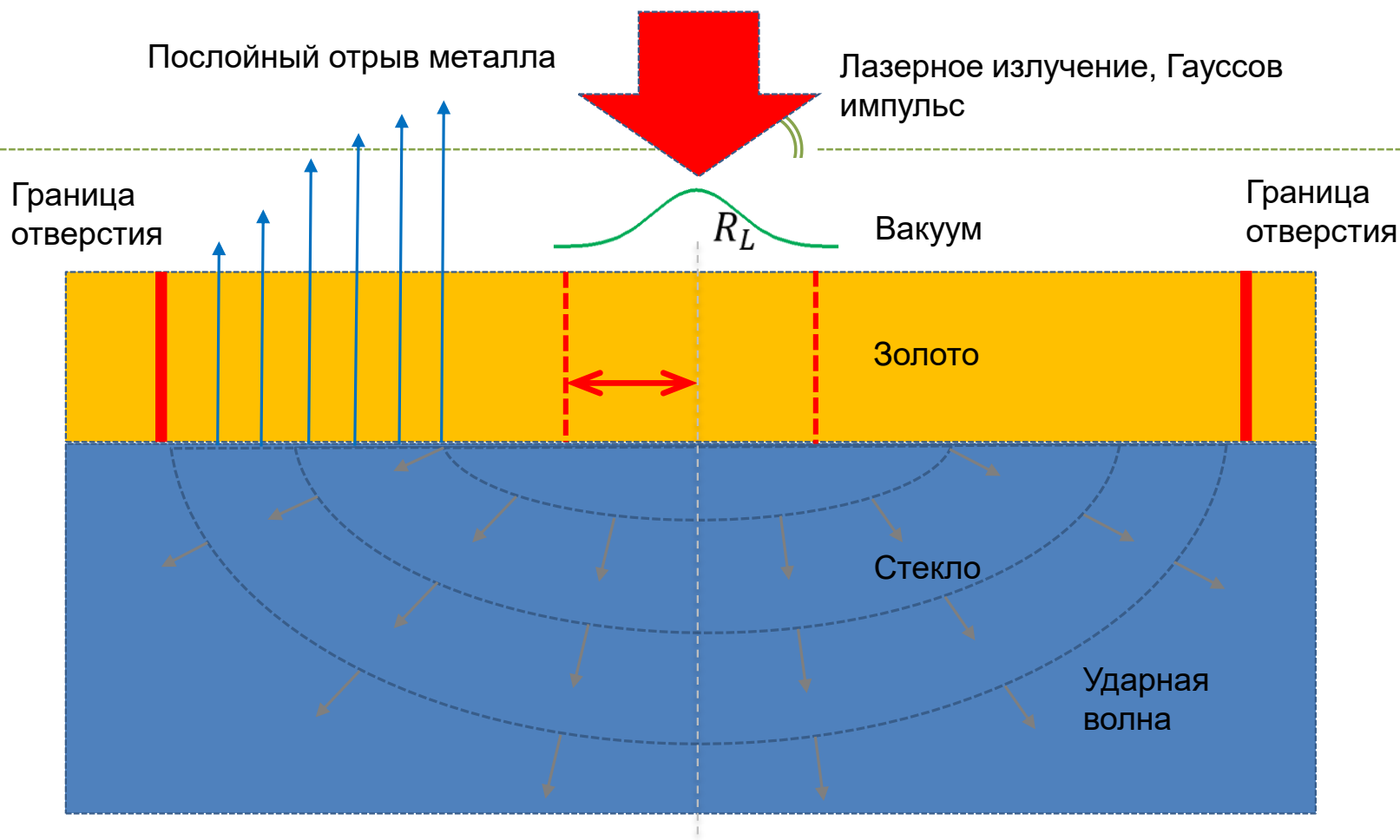
$$\tau = 200\phi\text{с}$$

$$\lambda = 515\text{нм}$$

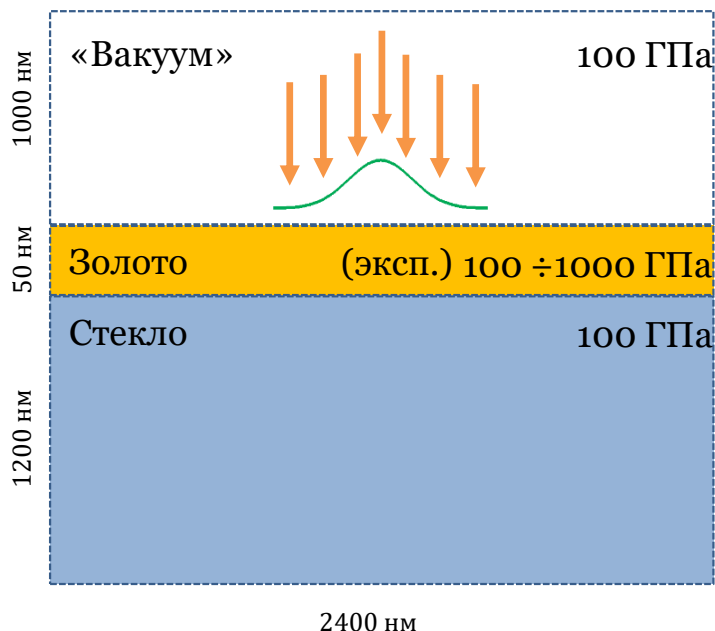
$$R_L \approx 250\text{нм} = 0.25\text{мкм}$$



Взаимодействие мощного лазерного излучения с металлом



Постановка задачи



Граничные условия:

Прозрачные стенки.

Метод Годунова

Начальные условия

1 ячейка = 5 нм

Стекло

480 x 240 ячеек

$$\rho = 2300 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$P = 100 \text{ ГПа}$$

«Вакуум»

480 x 200 ячеек

$$\rho = 200 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$P = 100 \text{ ГПа}$$

Золото

480 x 10 ячеек

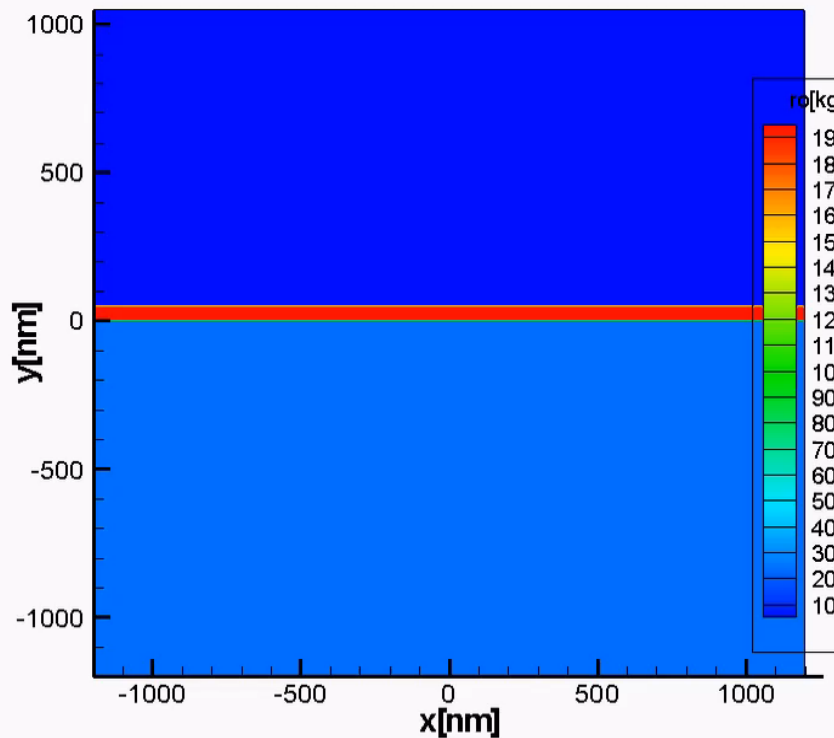
$$\rho = 19300 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$P = 100 \text{ ГПа} + 900 \text{ ГПа} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{R_L^2}\right)$$

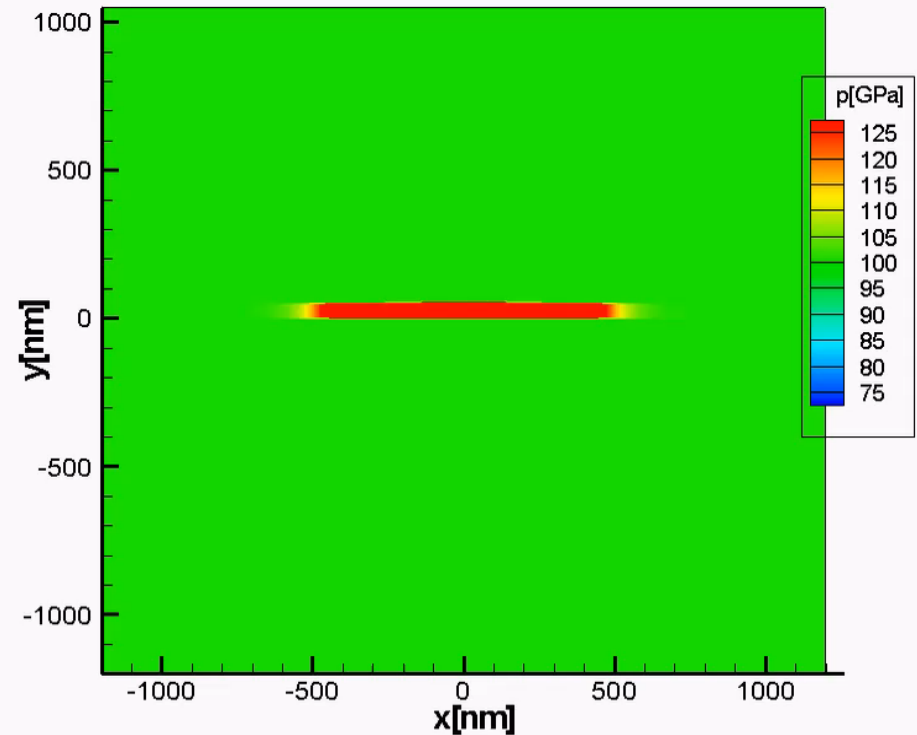
Результаты: видео от 0 до 100 пс



Плотность



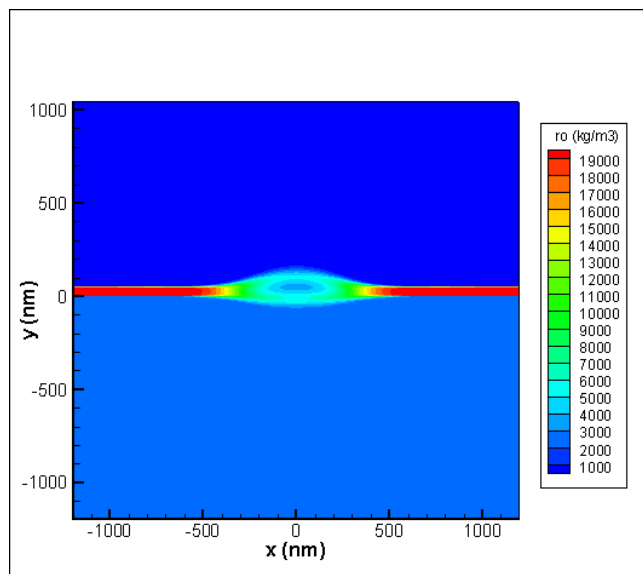
Давление



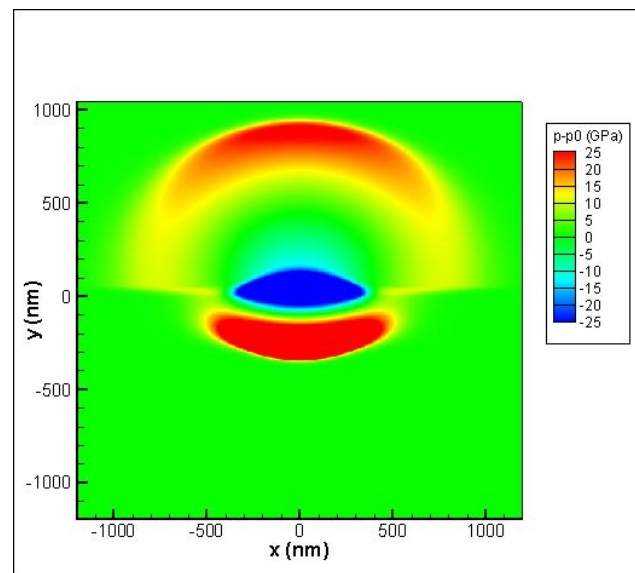
Результаты: $t=20$ пс



Плотность



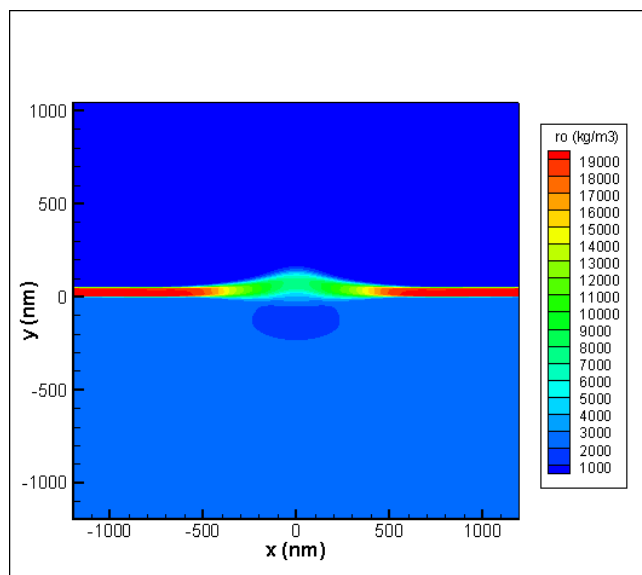
Давление



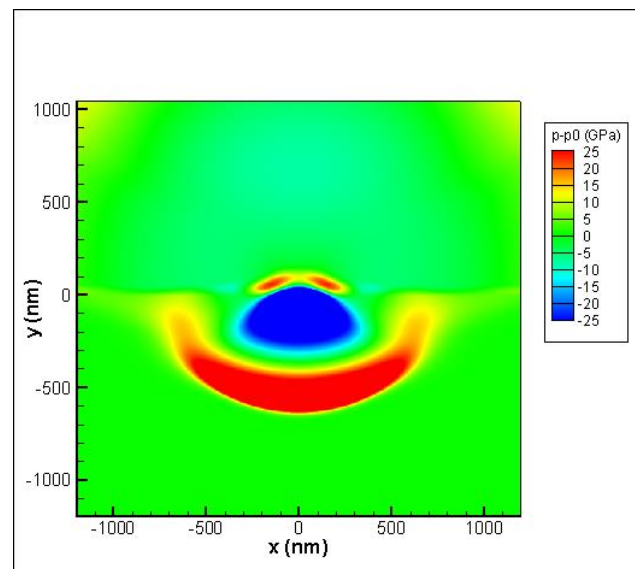
Результаты: $t=40$ пс



Плотность



Давление

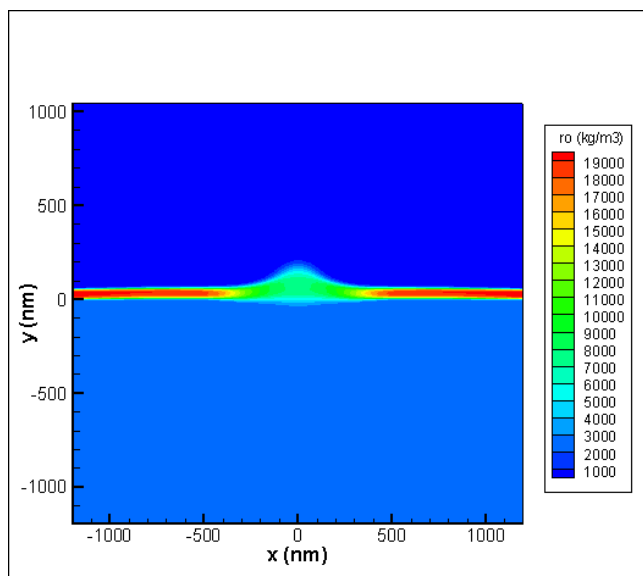


Сферизация ударной волны в стекле

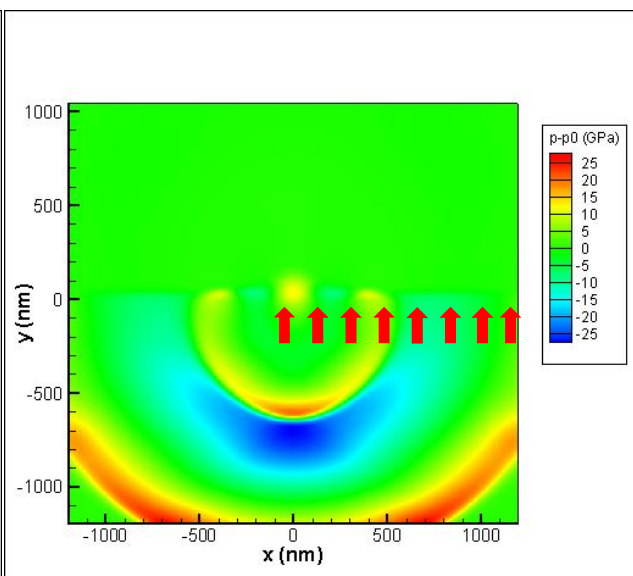
Результаты: $t=100$ пс



Плотность



Давление



Вычисляем в контрольных точках накопившийся импульс. Он толкает слои металла пленки вверх, действуя, как поршень.

Анализ послойного отрыва

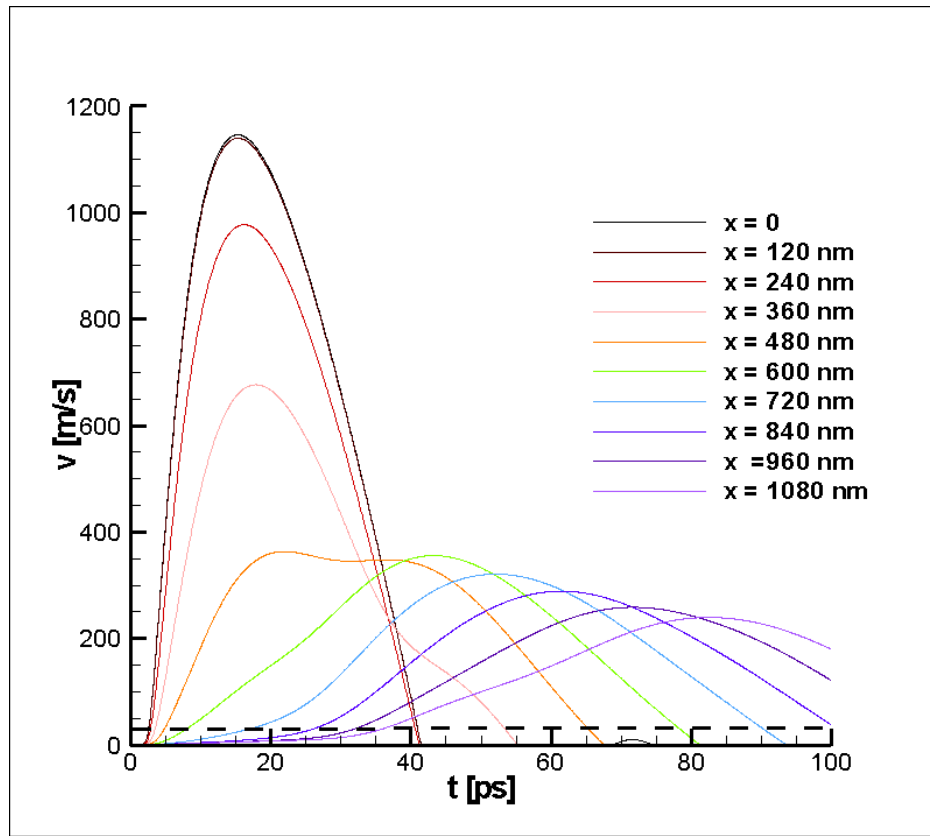


- ✓ Послойный отрыв металла от подложки в результате гидродинамических эффектов
- ✓ Скорость ускоряемого вещества в контрольных точках определяется как отношение импульса к толщине и плотности пленки
- ✓ Пороговая скорость отрыва золота от стекла составляет около 30 м/с (на основе 1D-расчетов с реальным УРС)

Оценка размеров отверстия



Эволюция скоростей в контрольных точках



- Пороговая скорость:
 $v = 30 \text{ м/с}$

- Радиус отверстия:
 $R \approx 2 \text{ мкм}$

(при поглощенной энергии
 $F_{abs} = 4000 \text{ Дж/м}^2$
и радиусе пятна
 $R_L = 0,25 \text{ мкм}$)

Результаты

- ✓ 2D-моделирование нестационарного процесса, сопровождающего действие мощного УКЛИ на металл на подложке.
- ✓ Ударно-волновой механизм образования отверстий.
- ✓ Суть процесса: послойный отрыв металла от подложки в результате 2D-гидродинамических эффектов.

Выводы



С помощью пакета прикладных
программ

Turbulence Problem Solver

проведено

численное моделирование ряда
фундаментальных физических
процессов

Дальнейшее развитие пакета TPS

- Методы повышенного порядка точности
- МГД-солвер
- Метод VOF для моделирования задач со свободной поверхностью
- Вложенные и неструктурированные сетки



Спасибо за внимание!