



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики  
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES  
Nuclear Safety Institute



*Трехмерный код КАБАРЕ для расчета  
нестационарных задач  
тепломассопереноса без использования  
моделей турбулентности и настроечных  
параметров*

Соловьев А.В.

[solovjev@ibrae.ac.ru](mailto:solovjev@ibrae.ac.ru)



# Назначение кода

## «Медленные» задачи

$$|u| \ll c$$
$$p \approx \text{const}$$

- Течение жидкометаллического теплоносителя
- Течения газов под контайнментом

Несжимаемая жидкость

Слабо сжимаемое приближение

$$p = c^2(\rho - \rho^*)$$

## «Быстрые» задачи

$$|u| \sim c$$
$$p \neq \text{const}$$

- Течение струй смеси газов

Сжимаемый газ

$$p = (\gamma - 1)\rho\varepsilon$$

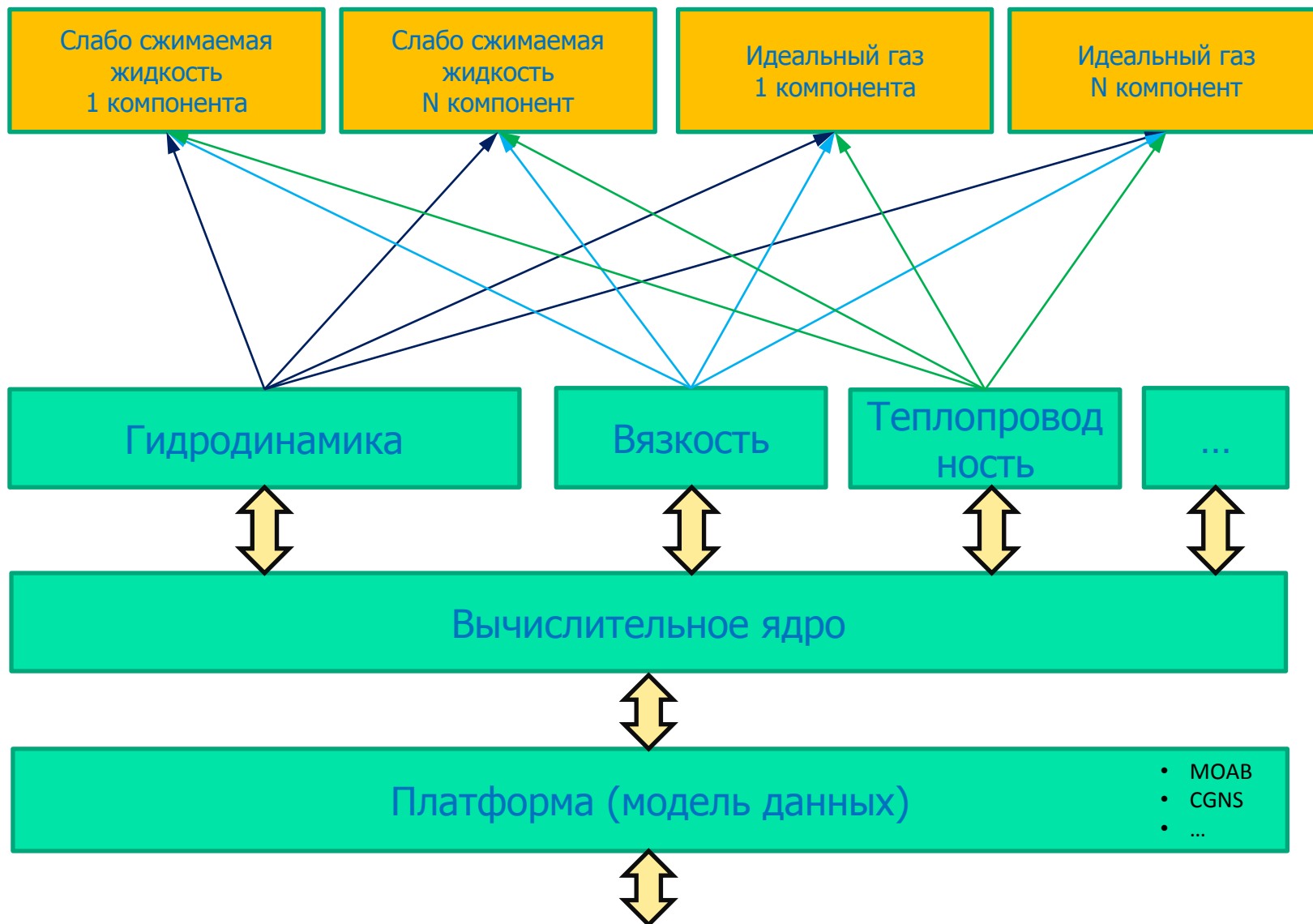
- Многокомпонентные течения



# Особенности кода

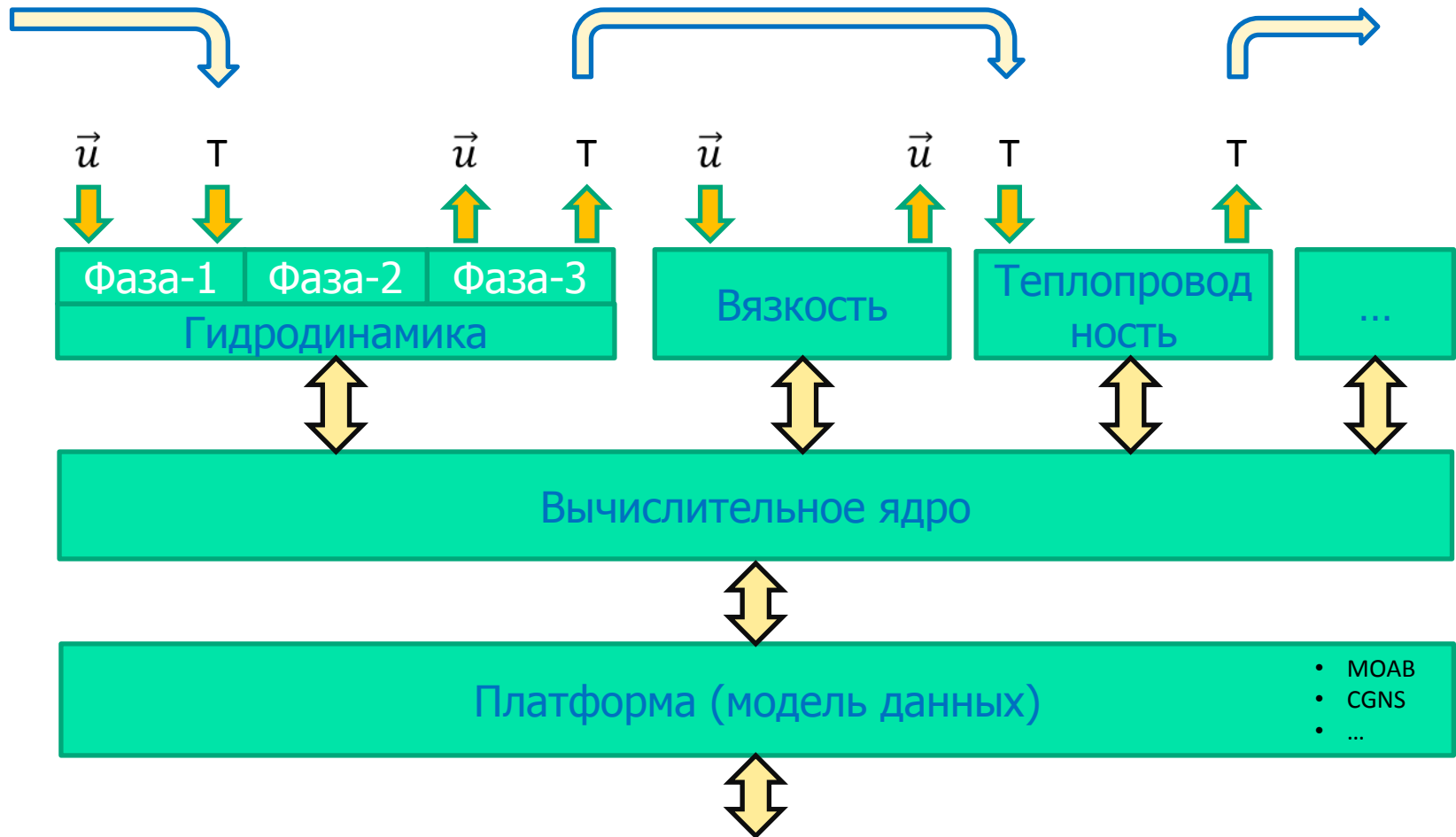
- Код является реализацией методики КАБАРЕ для проведения массивных параллельных вычислений на кластерных ЭВМ задач гидродинамики на неструктурированных гексаэдральных сетках
- Реализован на языке C++
- Единый код для нескольких гидродинамических моделей
- Вычисления, исходя из первых принципов. Отсутствие в коде моделей турбулентности и настроечных параметров
- В линейном приближении – второй порядок точности на неравномерных сетках
- В линейном приближении – бездиссипативная схема
- MPI-распараллеливание на произвольное число процессоров
- Асинхронный обмен данных без блокировок через общие грани ячеек

# Единый код



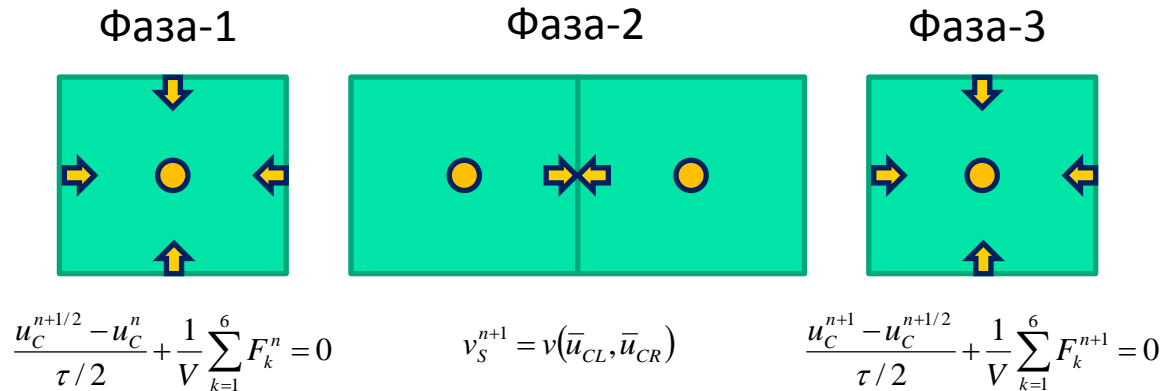
# Асинхронное распараллеливание

## 1. Задержка «готовность – потребность»



# Асинхронное распараллеливание

## 2. Порядок вычислений



### Параллельные вычисления:

- Все консервативные переменные вычисляются локально
- Вклад в потоковую переменную от консервативных вычисляется локально
- Вклады в потоковые переменные пересылаются между партициями
- Потоковые переменные вычисляются на каждой партиции единым образом

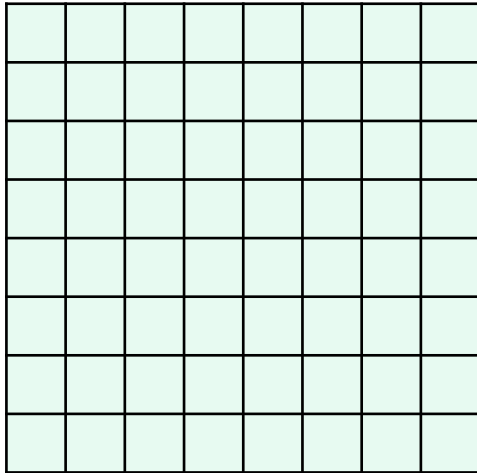


# Асинхронное распараллеливание

## 2. Порядок вычислений

Параллельные вычисления:

- Все консервативные переменные вычисляются локально
- Инварианты на гранях вычисляются локально
- Инварианты пересылаются между партициями
- Поточковые переменные по инвариантам вычисляются на каждой грани локально



1. Вычисления инвариантов с одной стороны на интерфейсных гранях
2. Отправка инвариантов в соседние партиции
3. Вычисления инвариантов на внутренних гранях
4. Вычисление потоковых переменных на внутренних гранях
5. Получение инвариантов от соседних партиций
6. Вычисление потоковых переменных на интерфейсных гранях



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

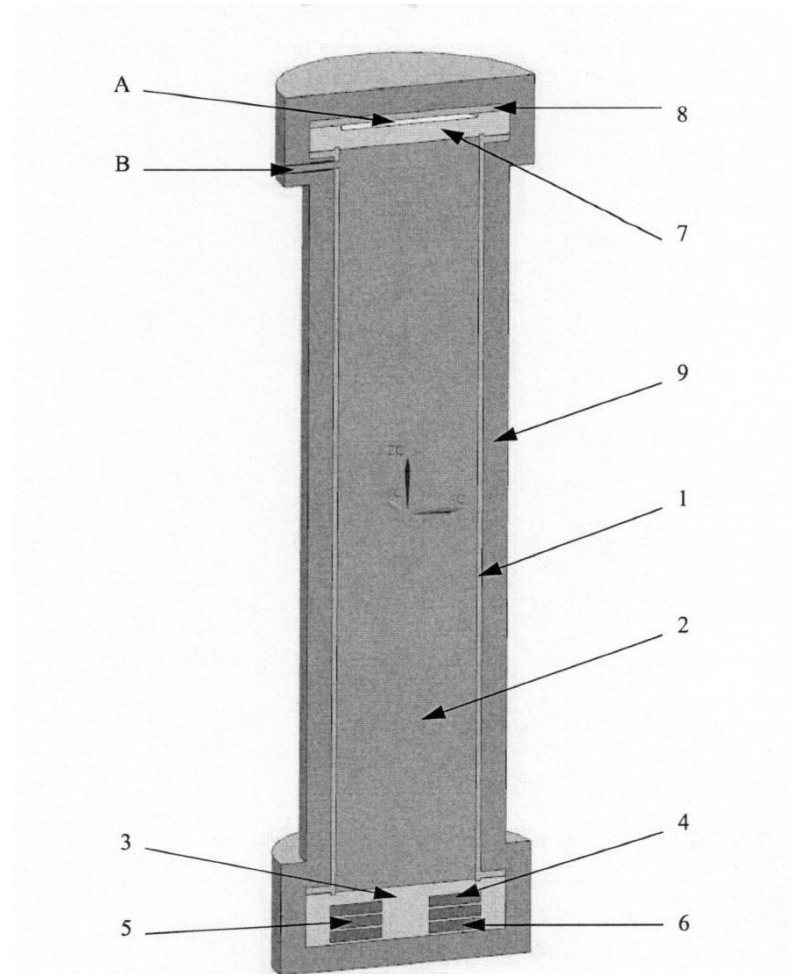
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

# **ОДНО-КОМПОНЕНТНАЯ НЕСЖИМАЕМАЯ ЖИДКОСТЬ**



# Свободная конвекция натрия в трубе $L/D=5^*$

- *Прямая цилиндрическая труба 1* заполнена жидким натрием 2.
- *На одном торце трубы расположен нагреватель, состоящий из медно-го массива 3 и трёх одновременно работающих кольцевых электронагревателей 4, 5, 6.*
- *На другом торце трубы расположен теплообменник натрий-масло, состоящий из медного массива 7 и крышки 8. В медном массиве теплообменника по полости А циркулирует минеральное масло.*
- *Труба полностью теплоизолирована минеральной ватой 9.*
- $Re=3 \cdot 10^4$

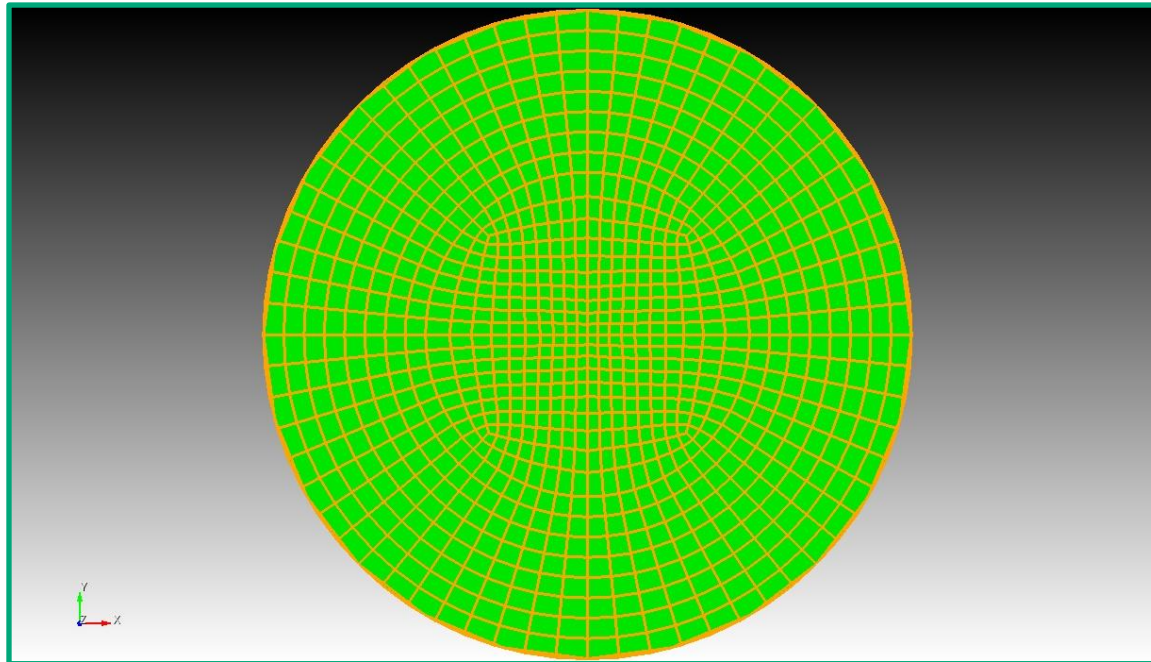




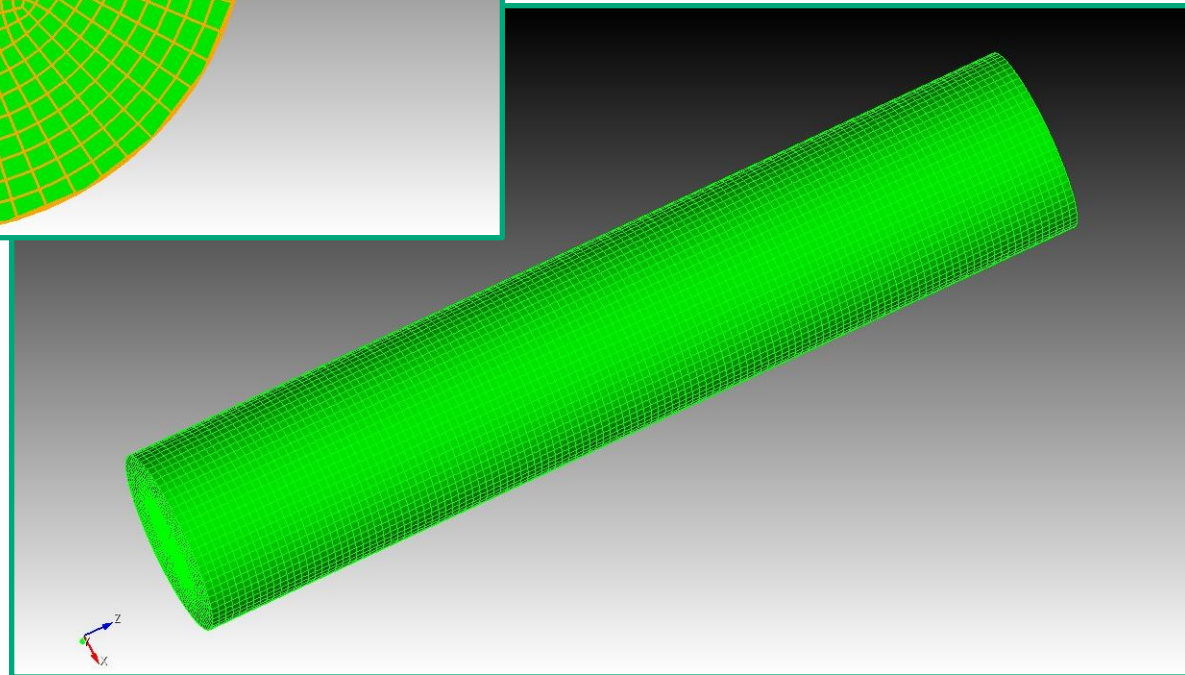
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

# Свободная конвекция натрия в трубе



*Сеточная модель (110 000  
гексаэдральных ячеек)*



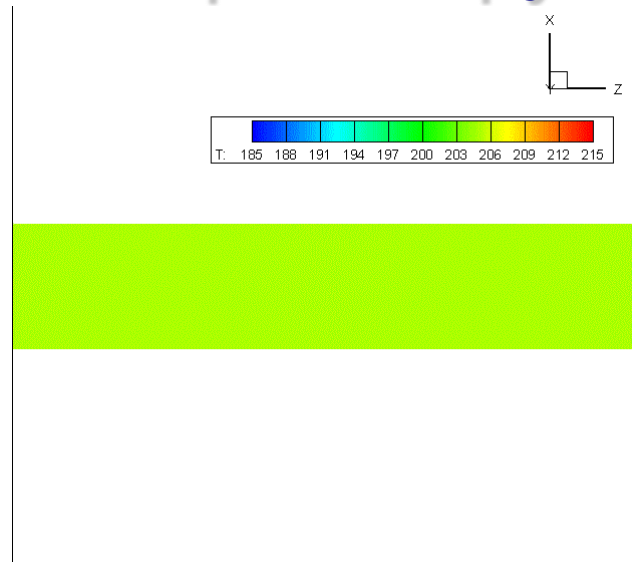
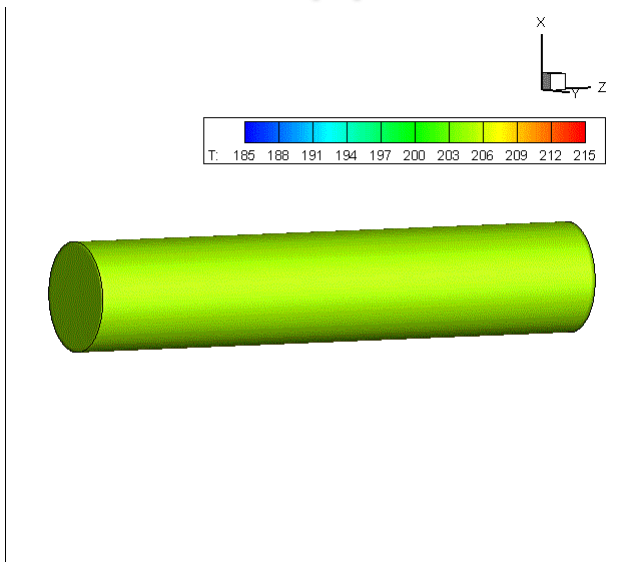


РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

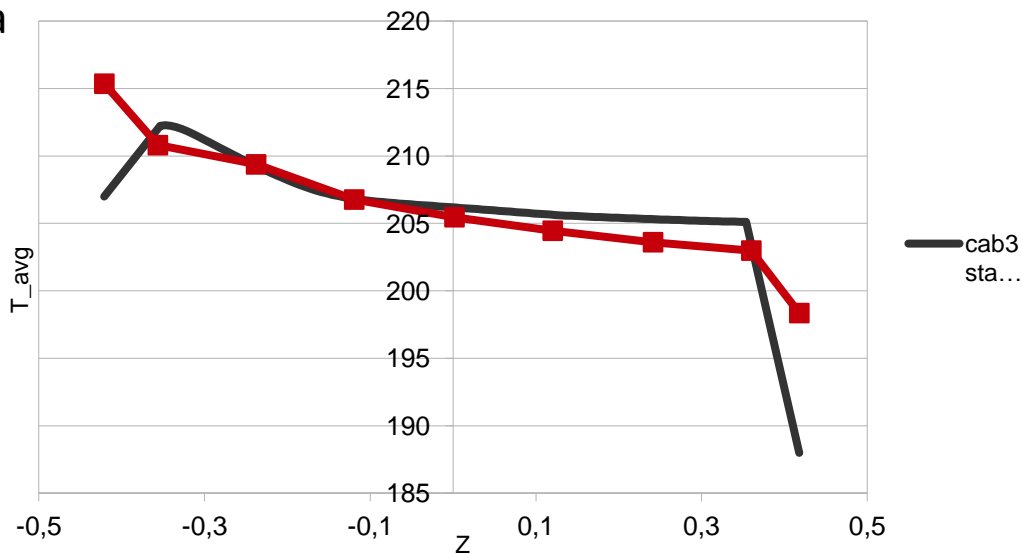
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

Горизонтальное положение

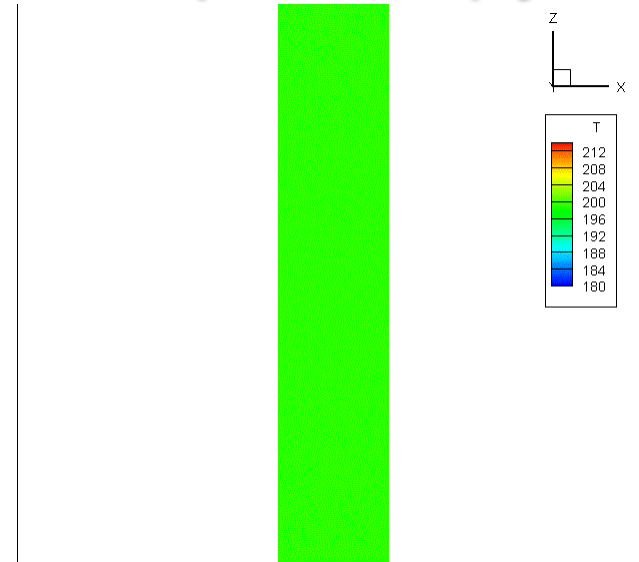
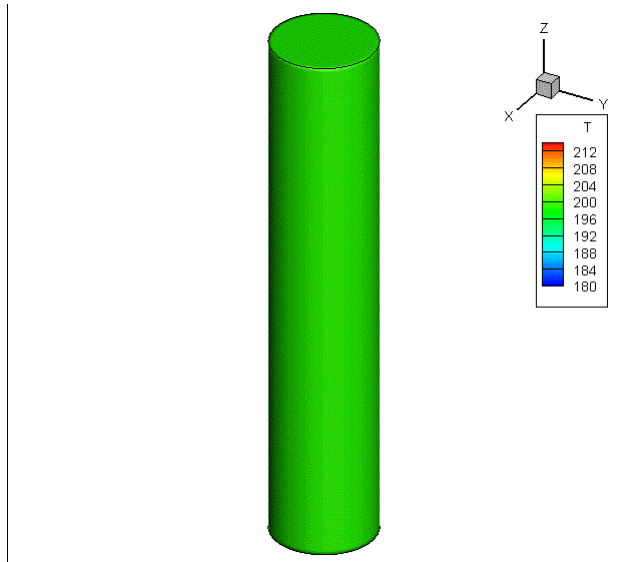
# Свободная конвекция натрия в трубе



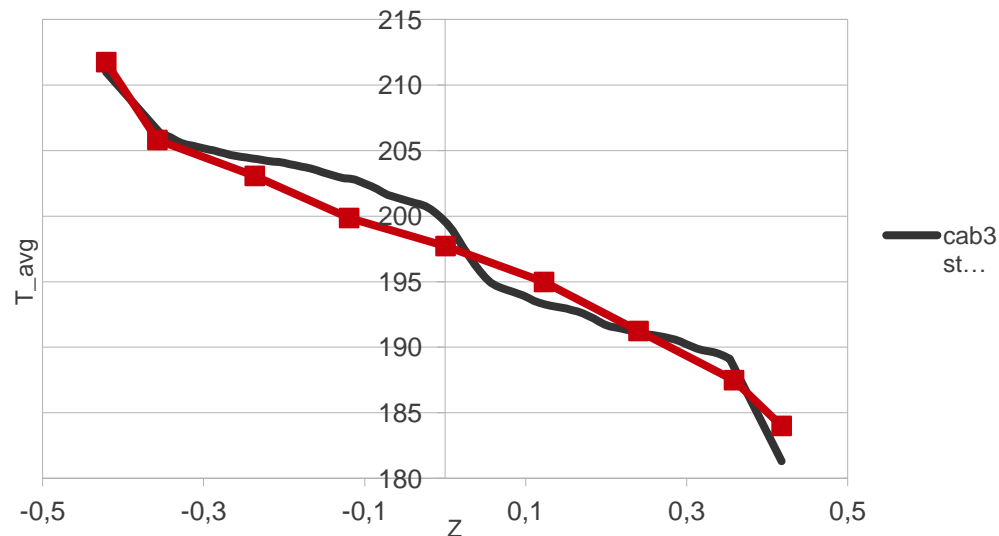
Температура



# Свободная конвекция натрия в трубе



Температура







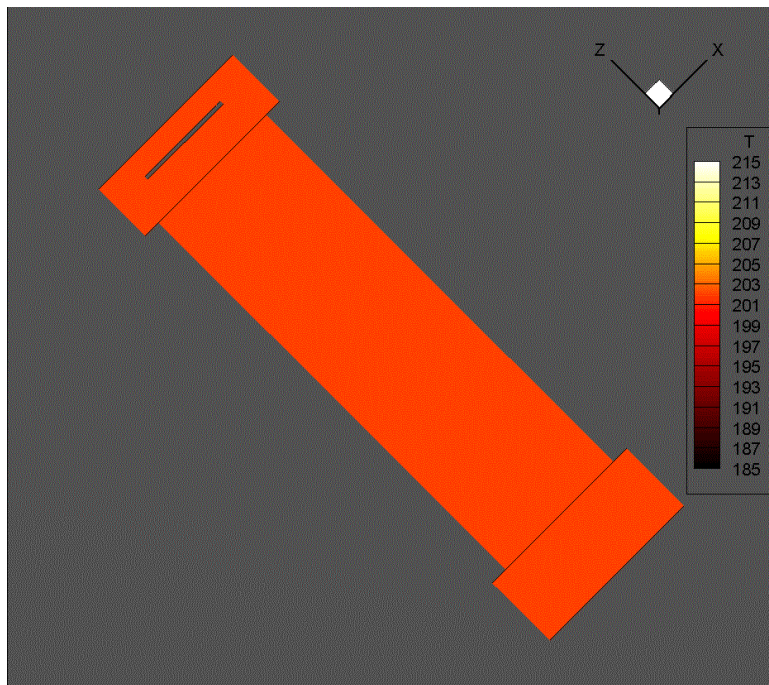
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

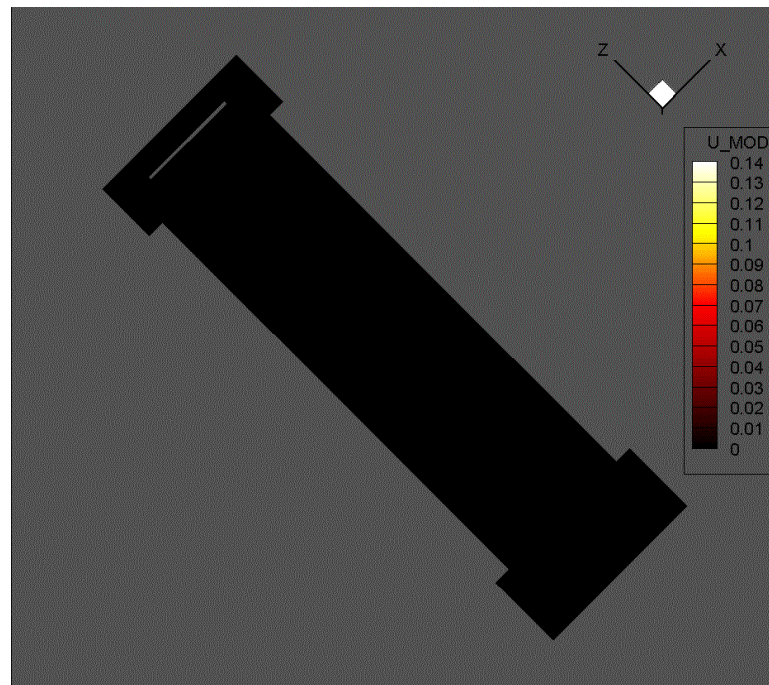
ИБРАЭ

# Свободная конвекция натрия в трубе

Расчет под углом 45 градусов (с учетом всех материалов, сетка 1,5 млн. ячеек)



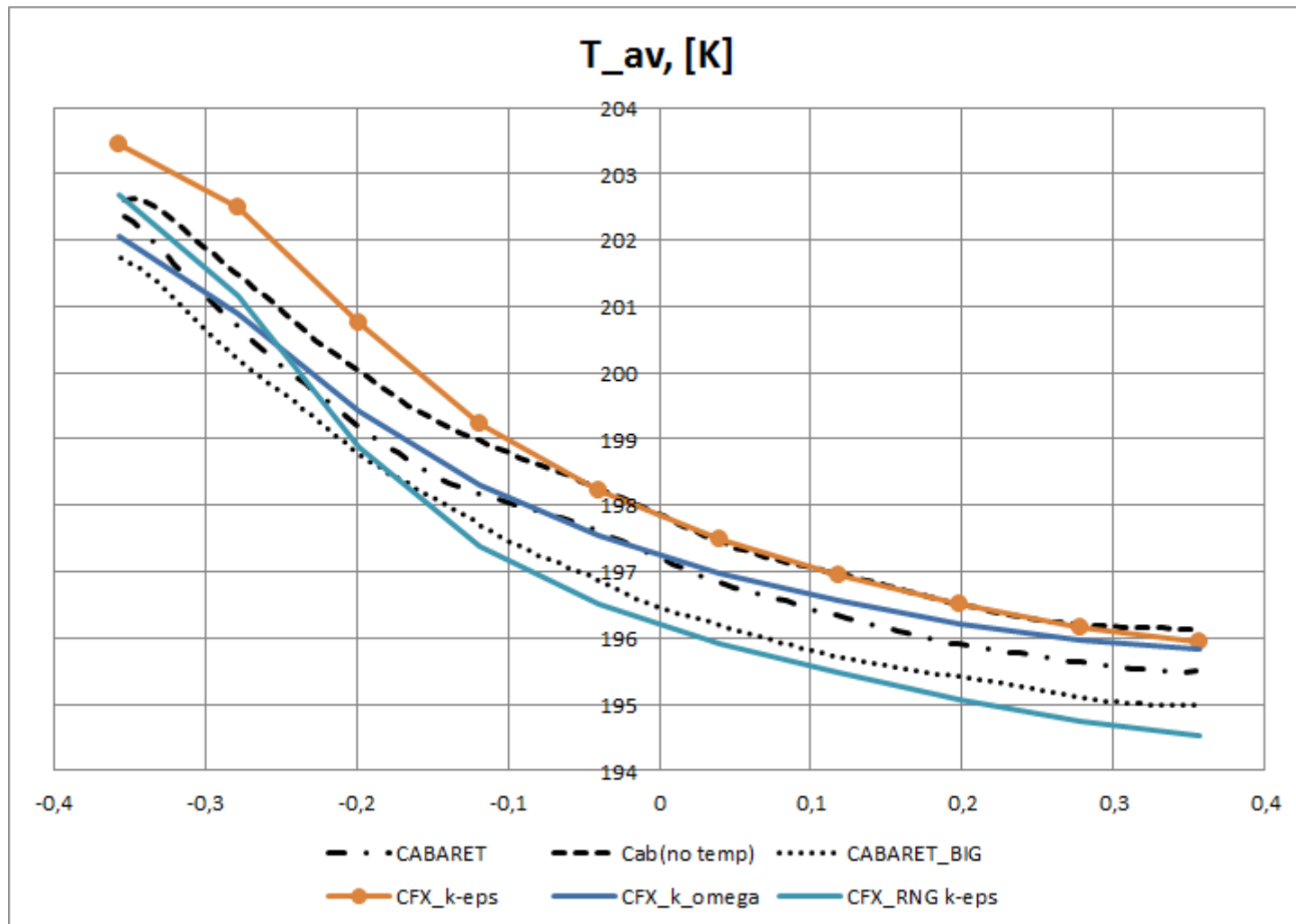
Температура



Модуль скорости

# Сравнение средней температуры

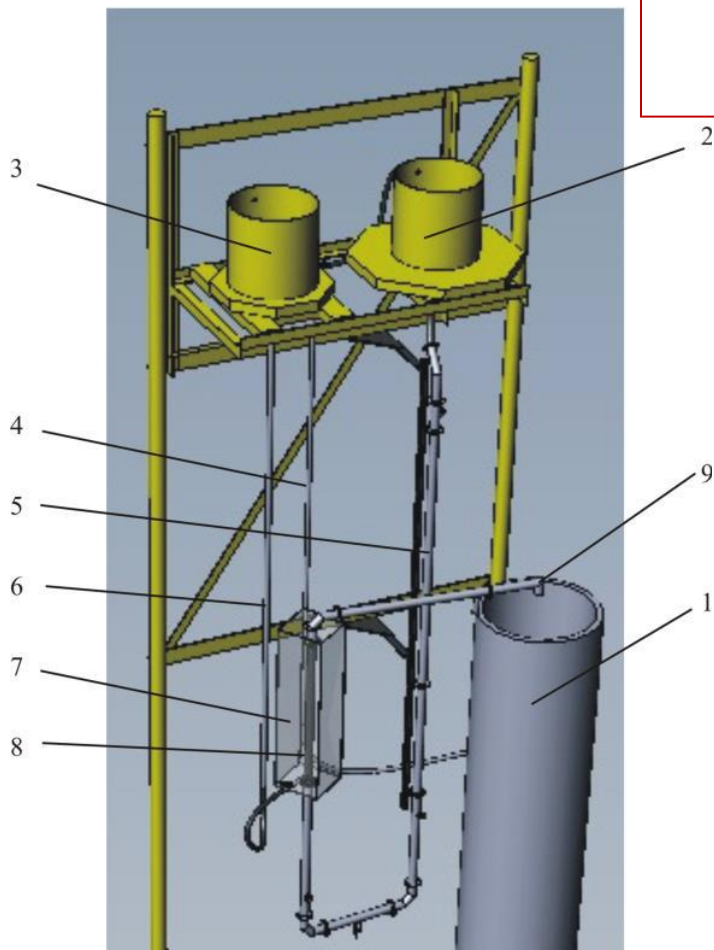
Сравнение средней температуры вдоль стенки с CFX-расчетом (модели k-eps, k-omega, RNG k-eps)



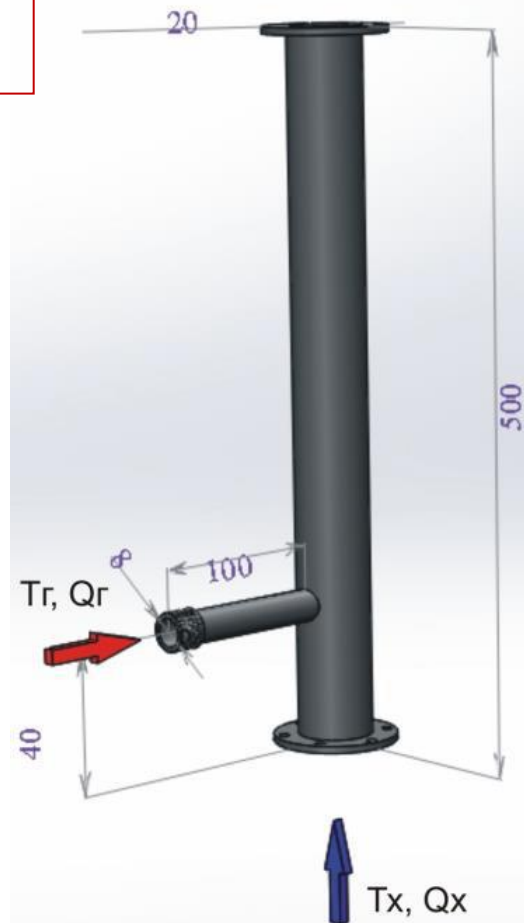


## Смешение разнотемпературных потоков сплава Розе в Т-образном смесителе

### Схема экспериментальной установки\*



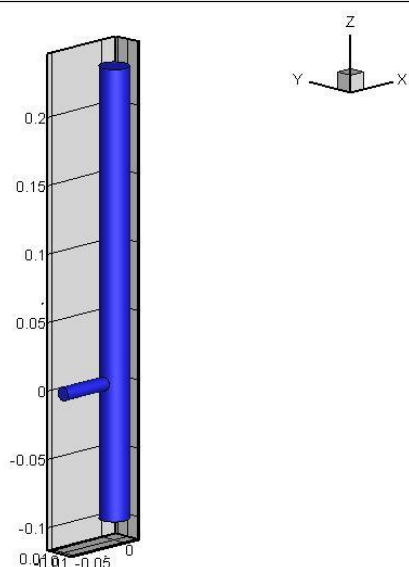
1 – основной бак; 2 – бак для «горячей» жидкости; 3 – бак для «холодной» жидкости; 4 – линия подвода жидкости к бакам; 5 – линия подвода «холодной» жидкости; 6 – линия подвода «горячей» жидкости; 7 – бокс с подводом горячего воздуха; 8 – смеситель; 9 – точка слива



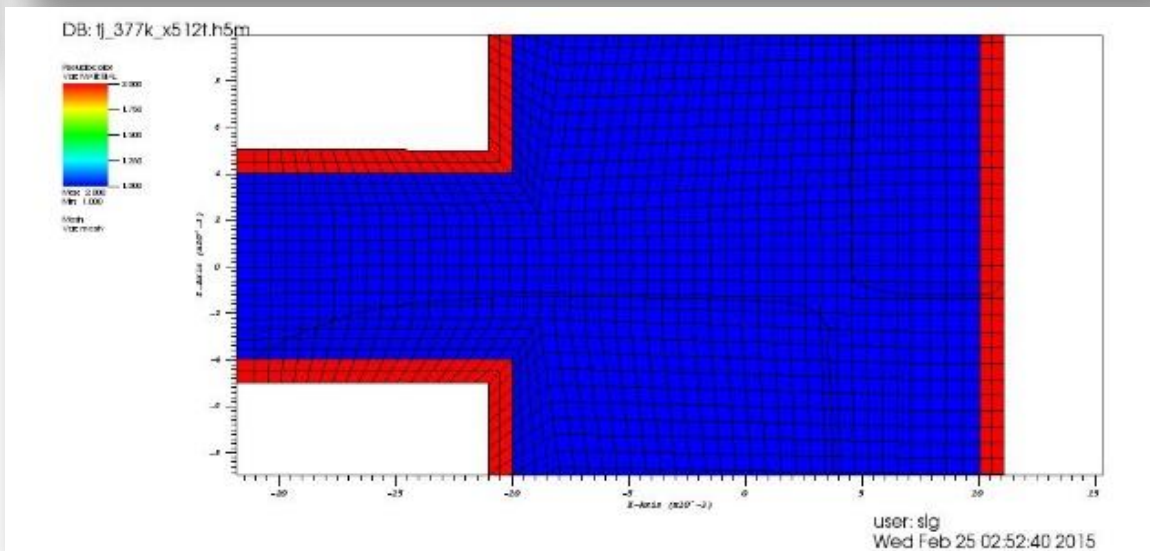
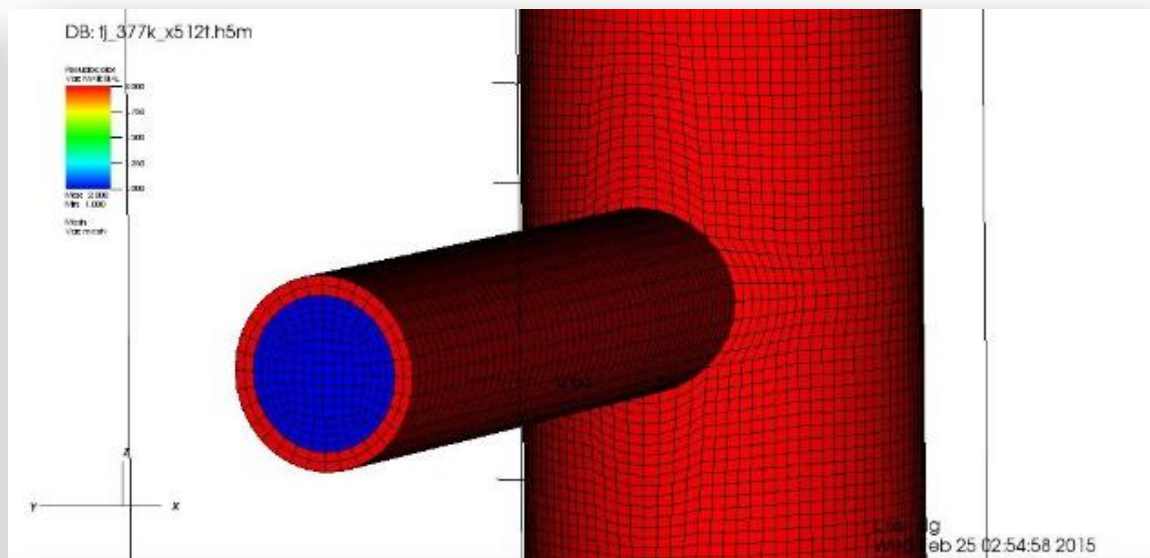
\* Экспериментальный стенд в институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск



## Сеточная модель (377000 гексаэдральных ячеек)



Геометрия





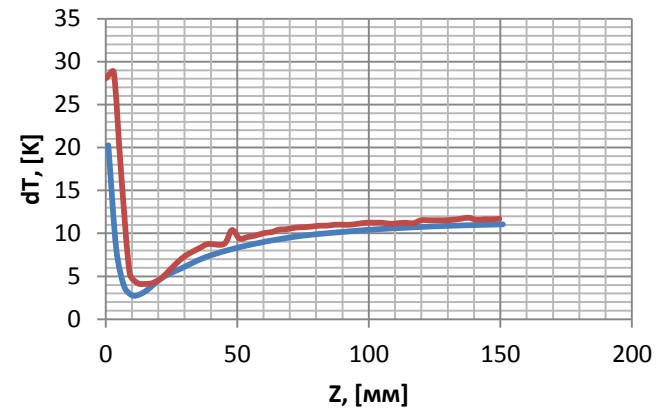
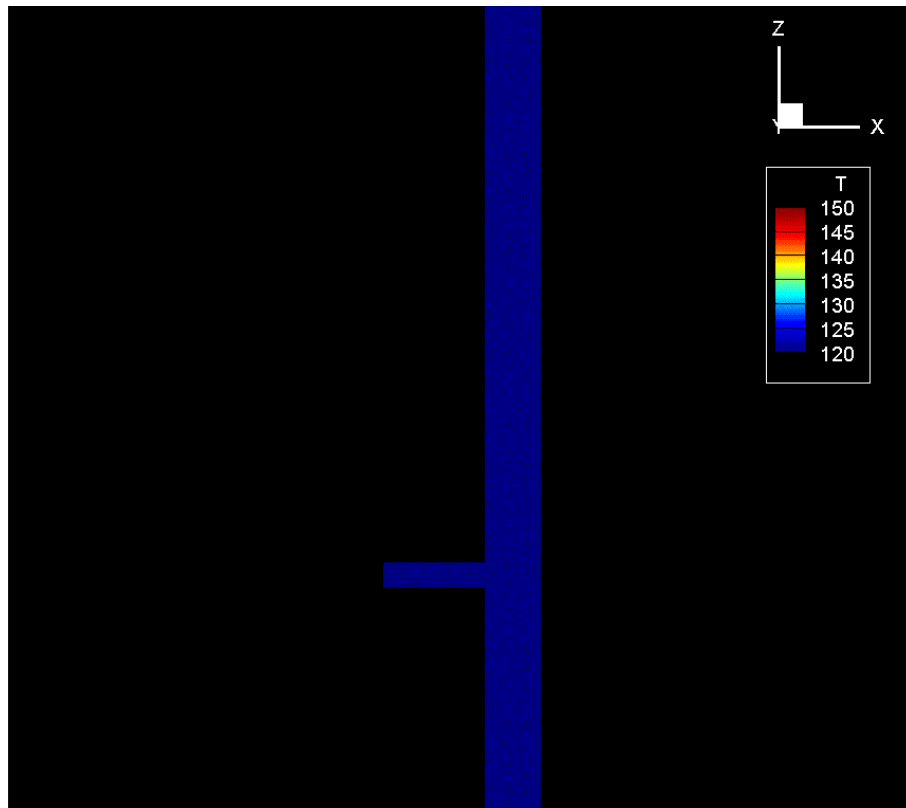


РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

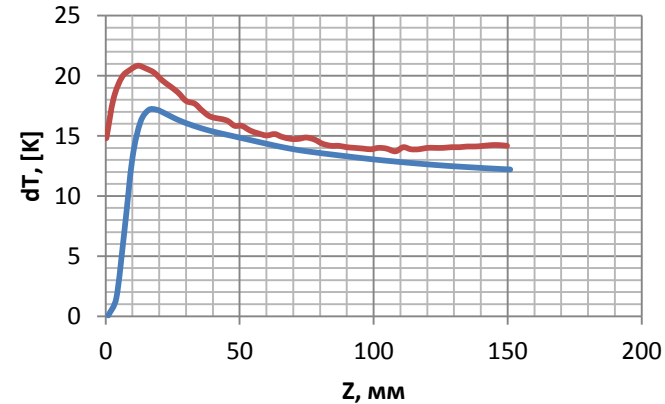
ИБРАЭ

# Сравнение с экспериментом



Ближняя  
стенка

— CABARET  
— Experiment



Дальняя  
стенка

— CABARET  
— Experiment



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

---

# **МНОГО-КОМПОНЕНТНАЯ НЕСЖИМАЕМАЯ ЖИДКОСТЬ**

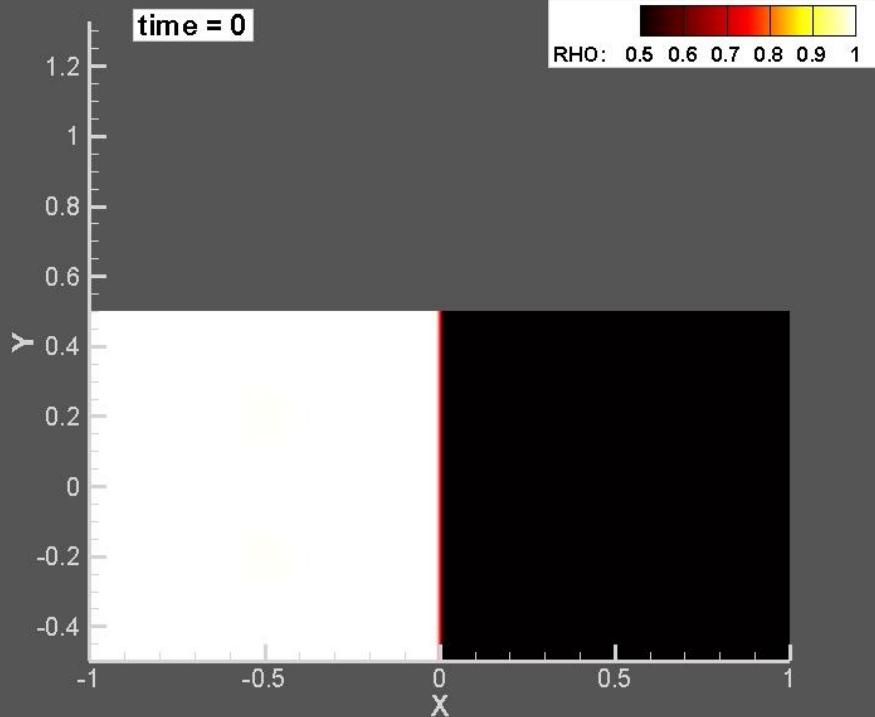


РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

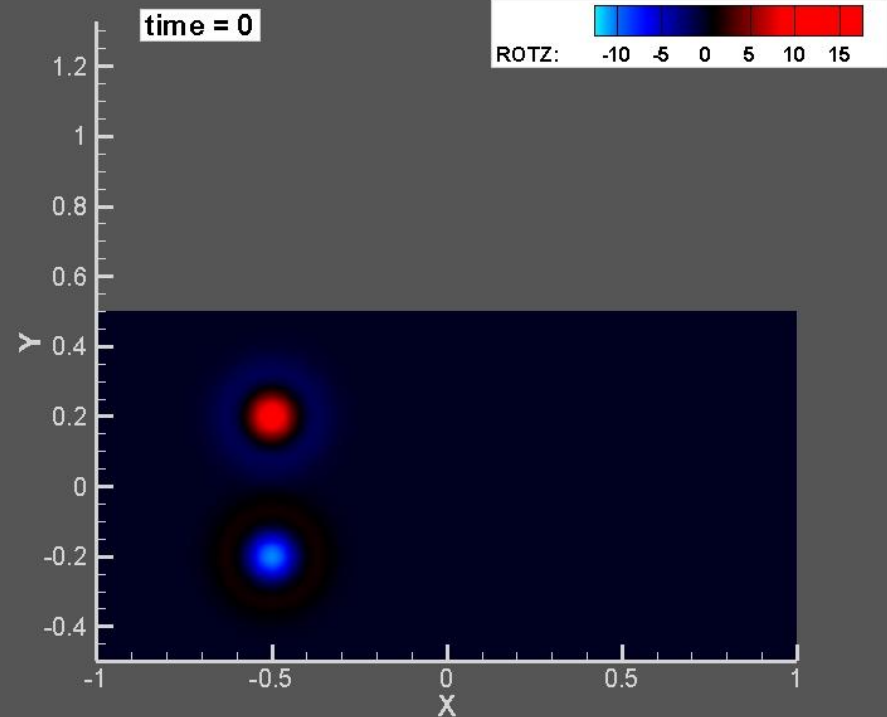
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

# Прохождение вихрей по границе двух компонент

***Плотность***



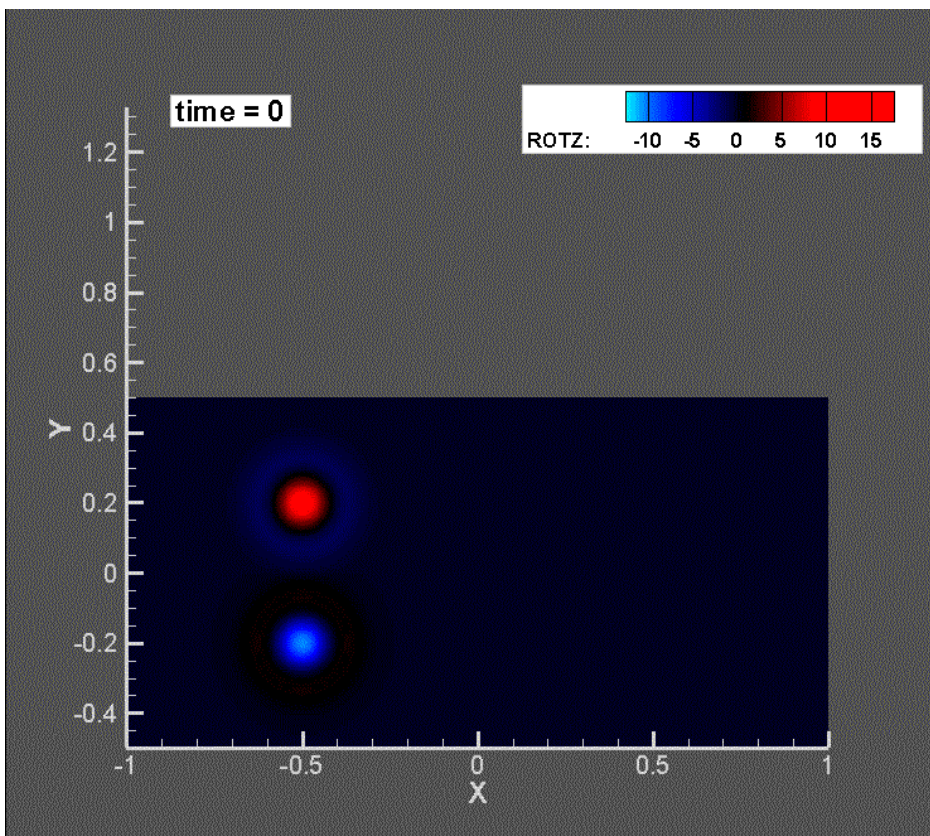
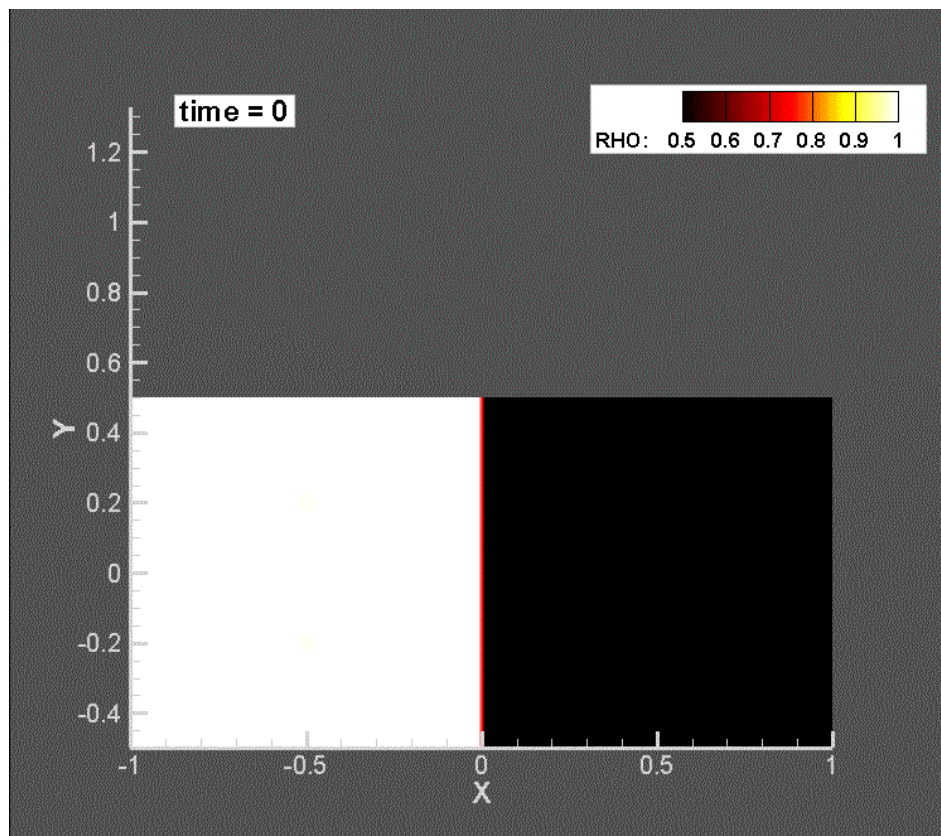
***Завихренность***



$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = 2$$

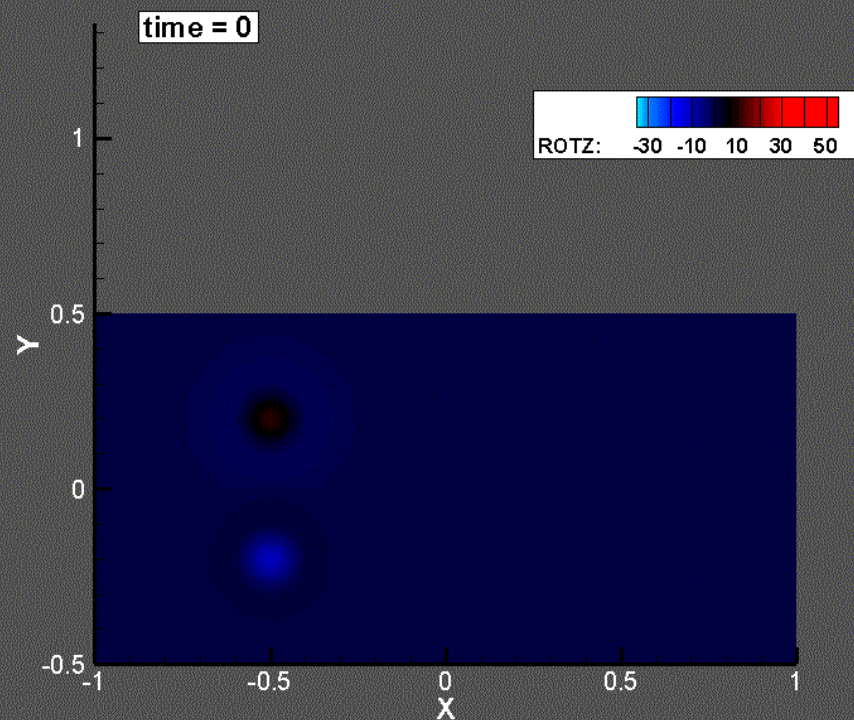
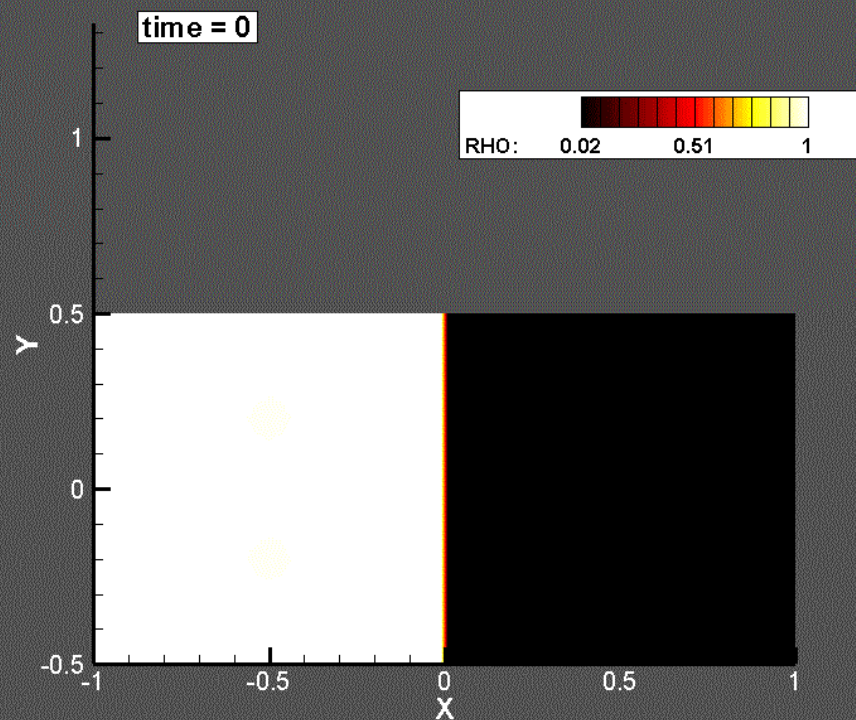
СКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

проблем безопасного развития атомной энергетики





$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = 50$$

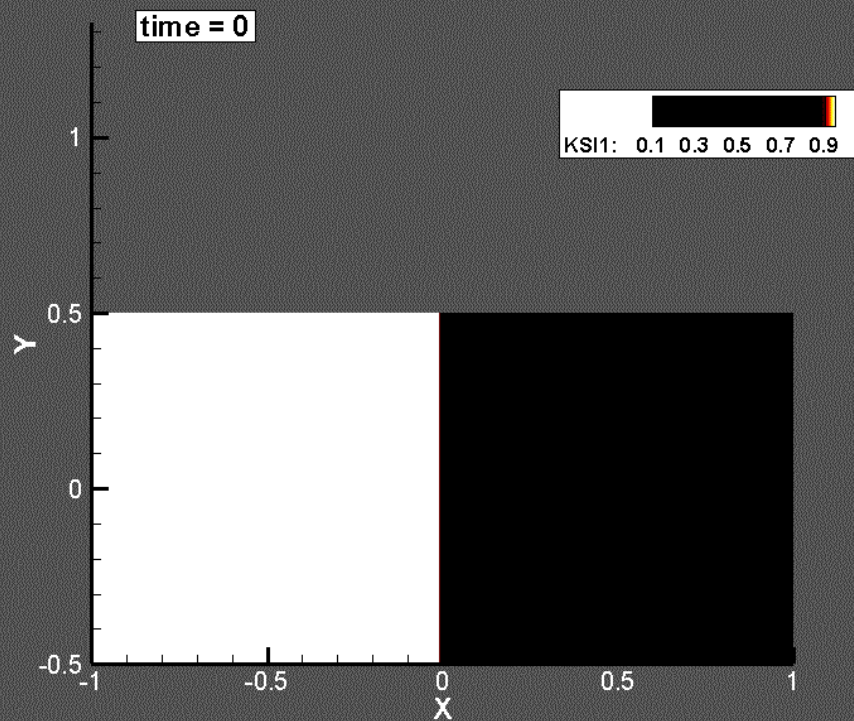




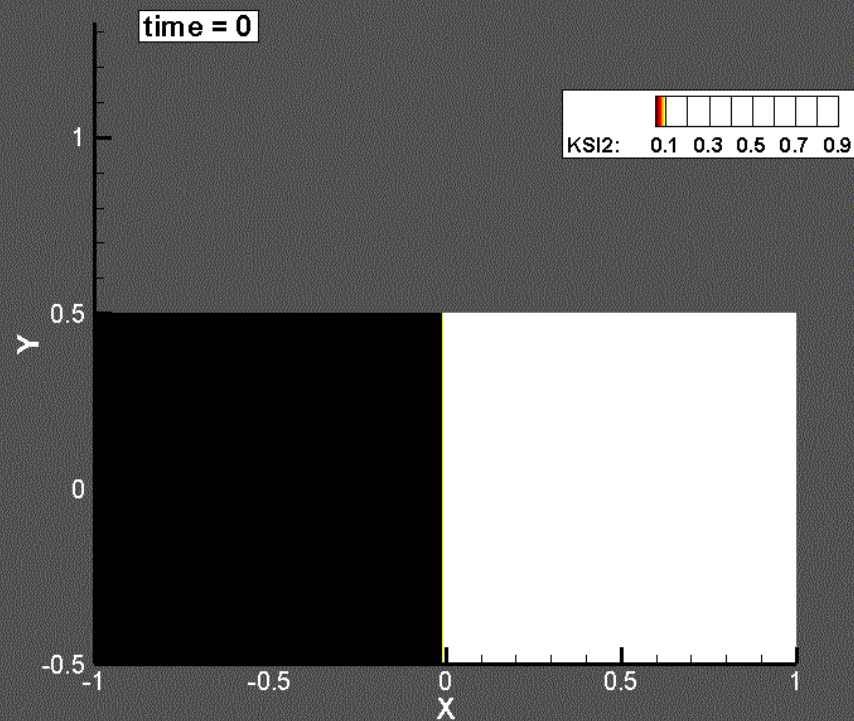
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

## Концентрация 1



## Концентрация 2



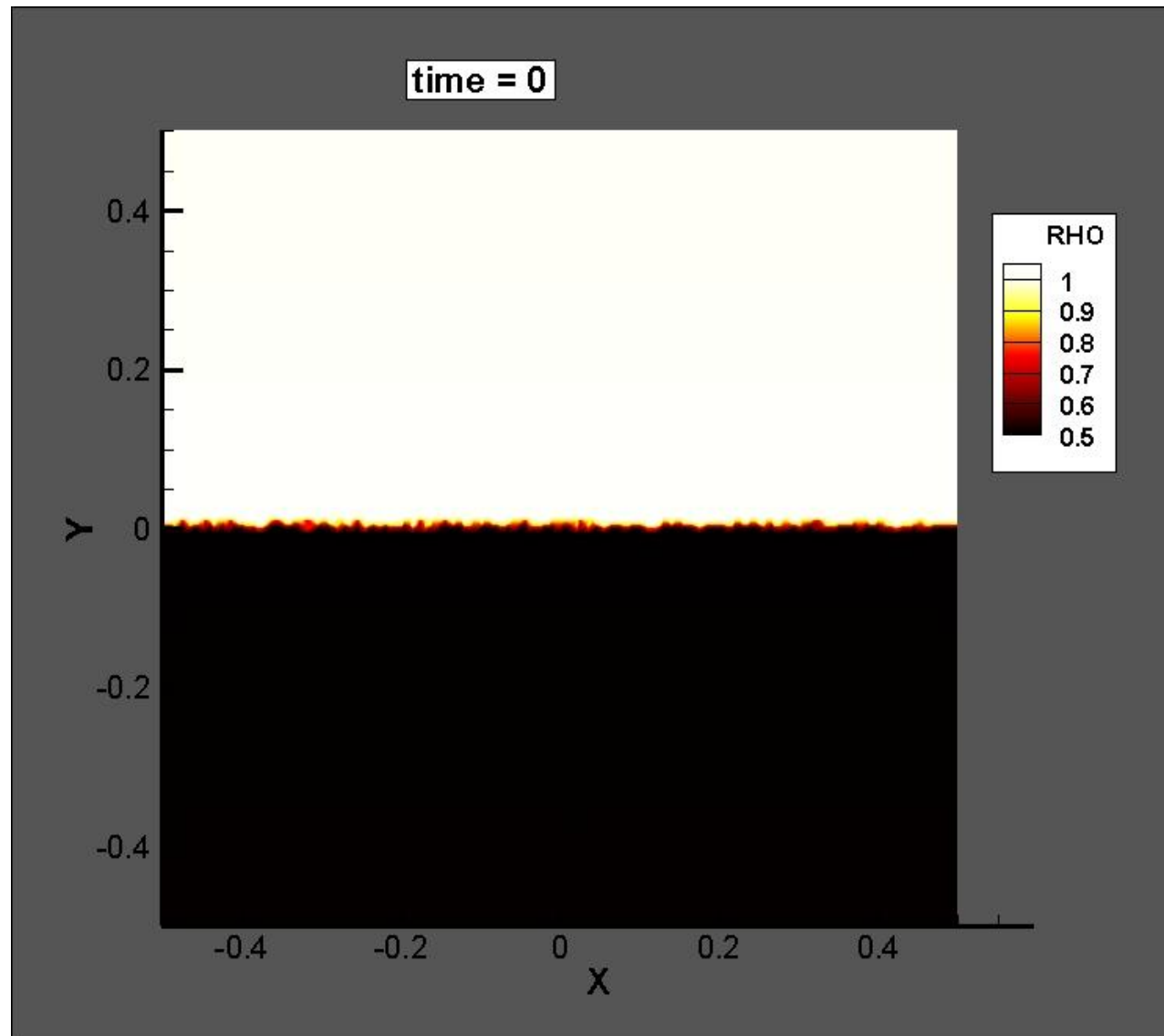


РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

ИБРАЭ

# Неустойчивость Рэля-Тейлора

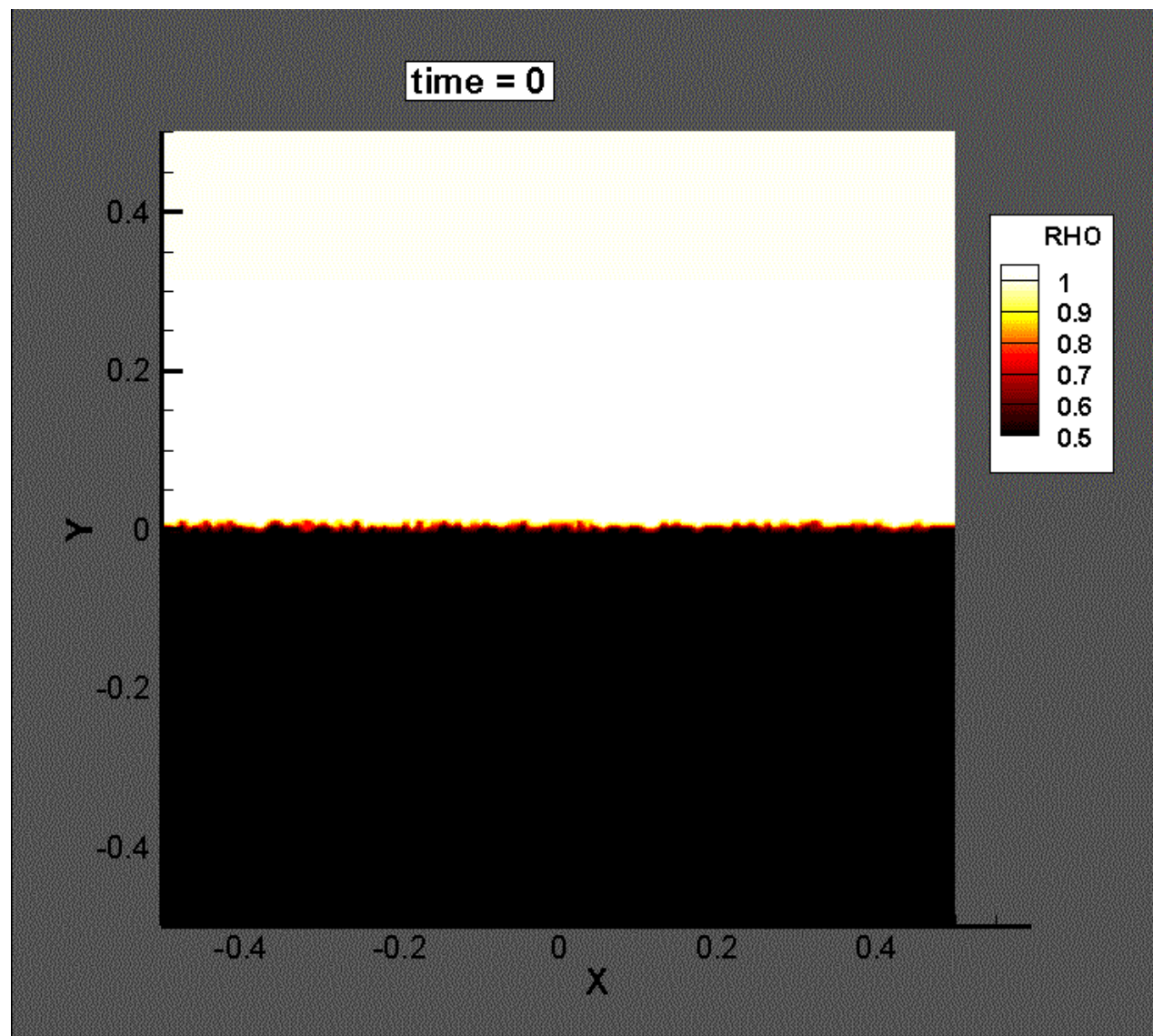




$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = 2$$

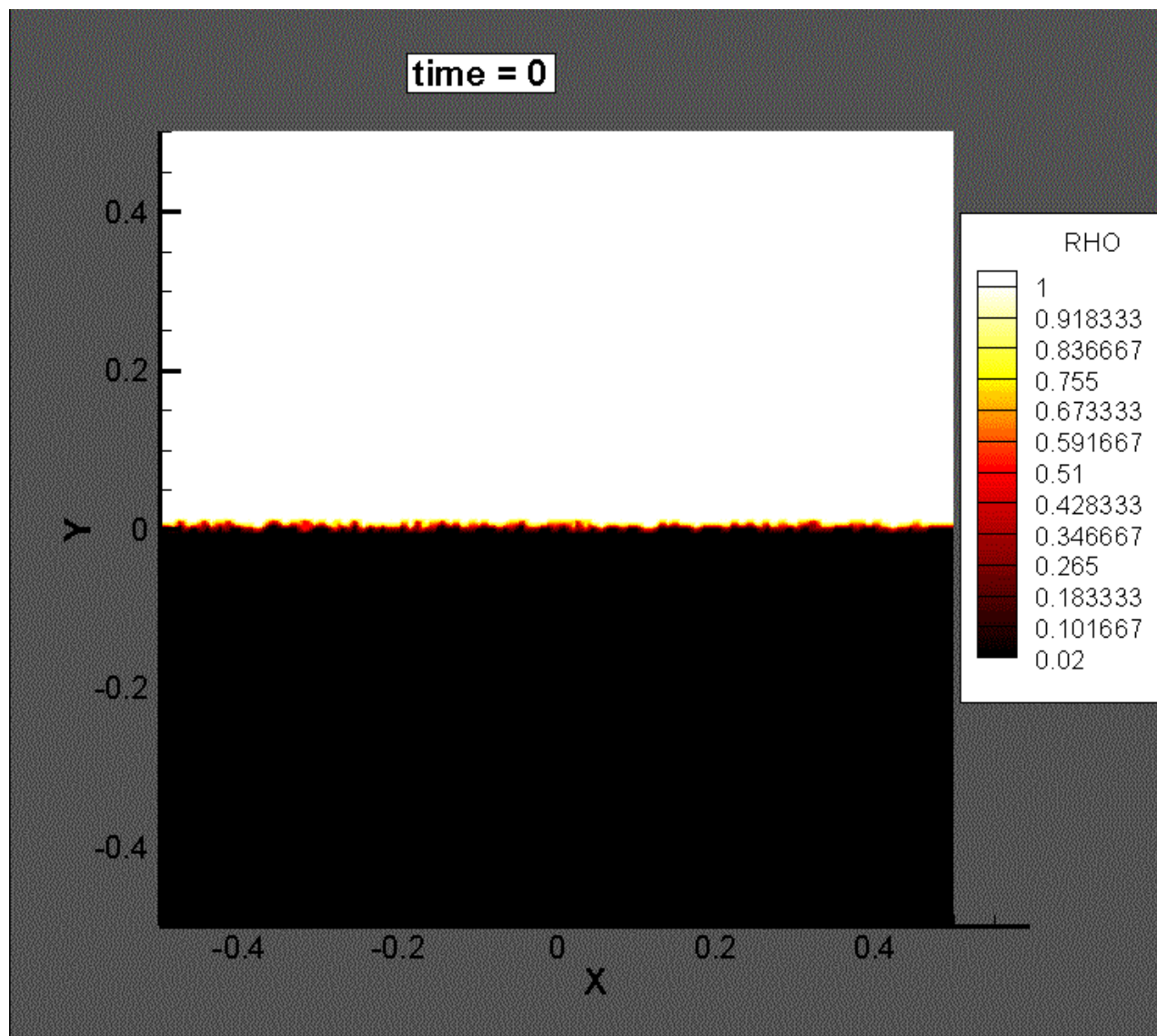
СКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

проблем безопасного развития атомной энергетики





$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = 50$$



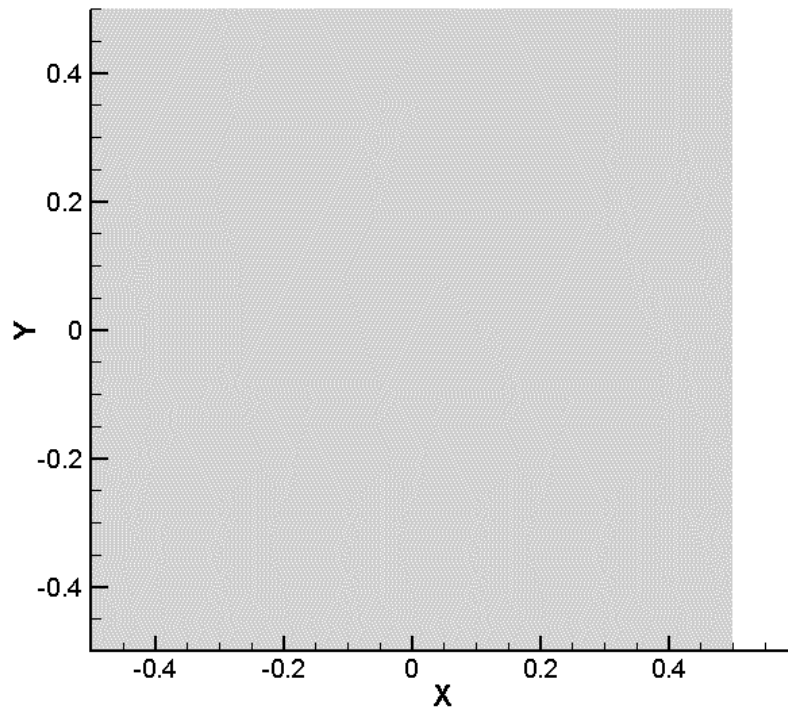


РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

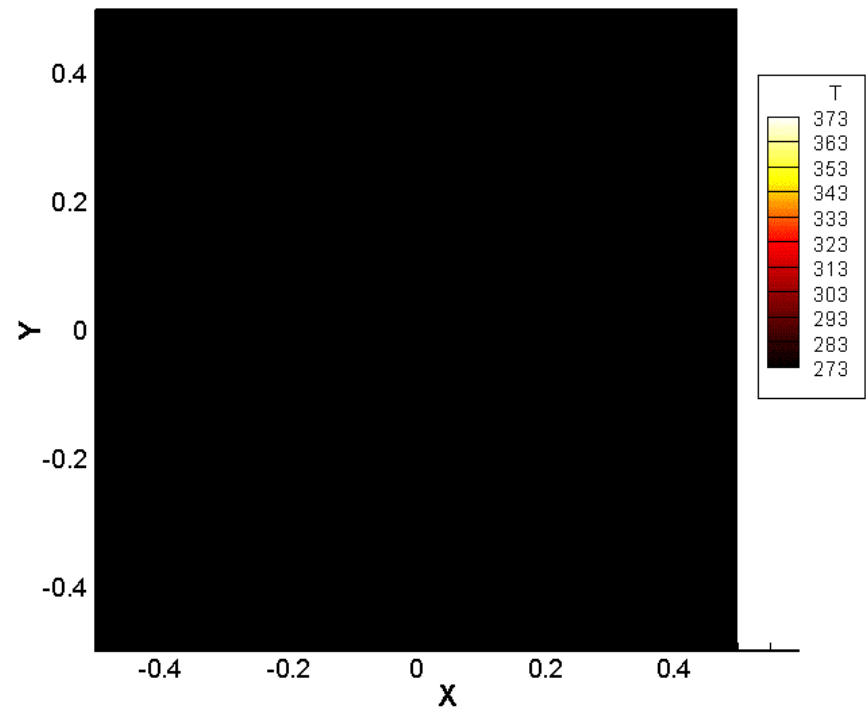
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

# Инжектирование струи горячего водорода в закрытую полость с воздухом

***Плотность***



***Температура***



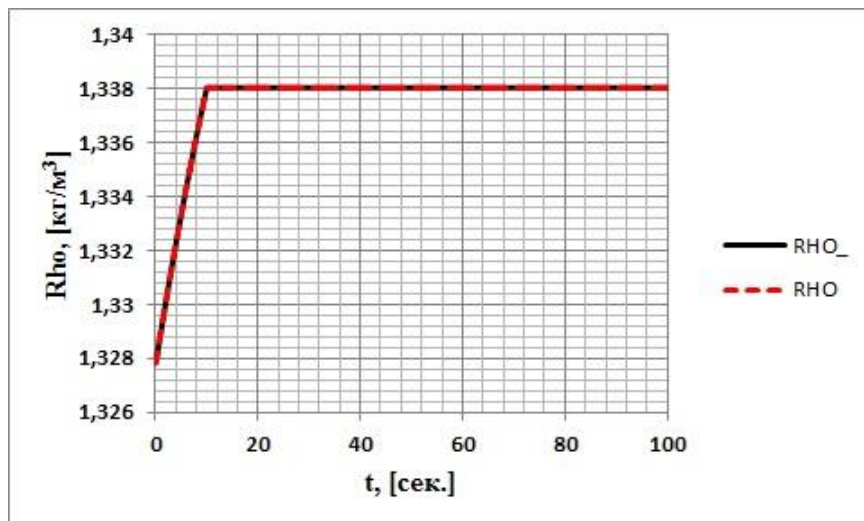
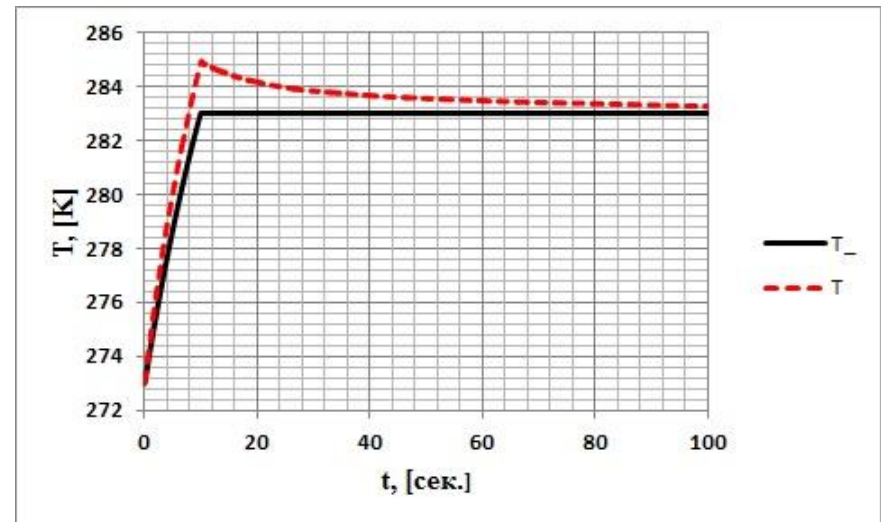
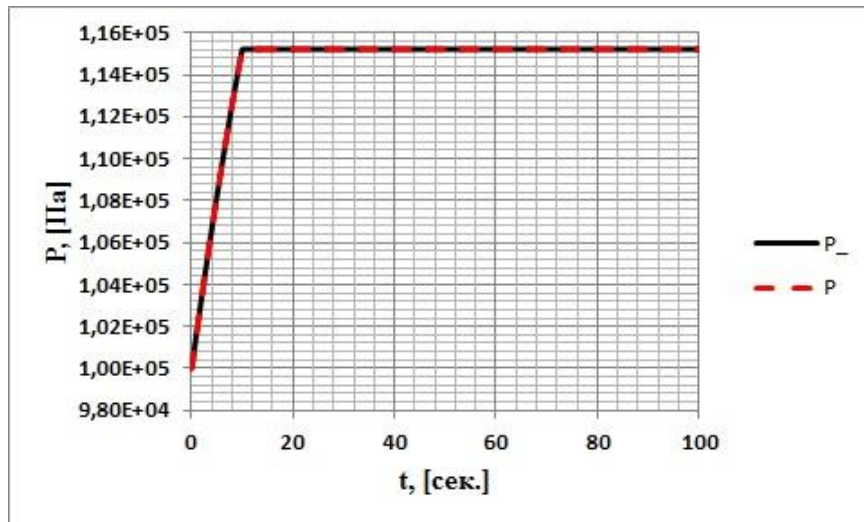


РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

ИБРАЭ

# Сравнение с аналитическим решением





РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

---

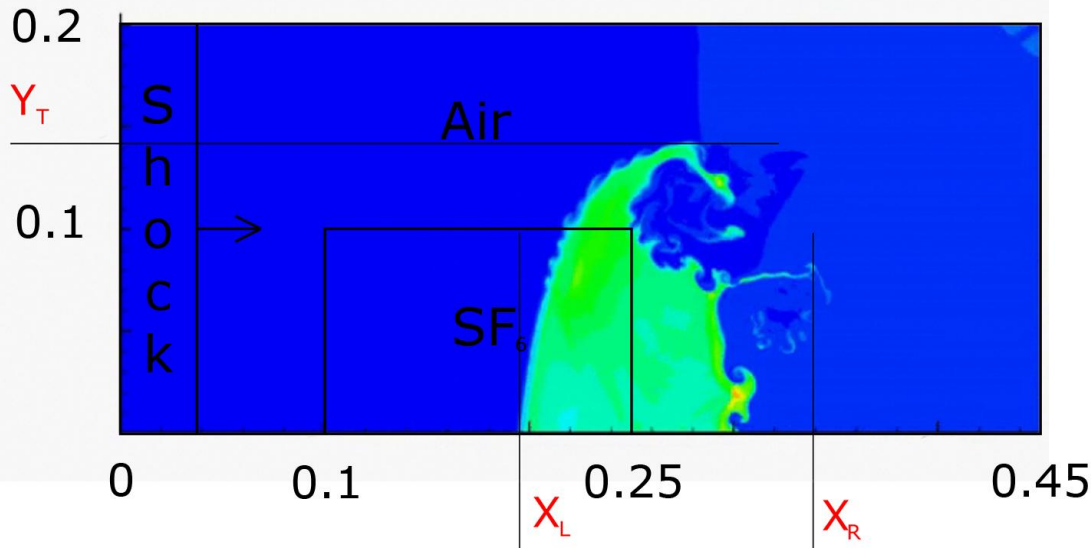
# **МНОГО-КОМПОНЕНТНЫЙ ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ**



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

# Прохождение ударной волны $M=1.21$ через тяжелый газ



## Отслеживаемые параметры:

$X_R$ ,  $X_L$ ,  $Y_T$  - крайняя правая, левая и верхняя точки, в которых молярная доля  $SF_6$  составляет 99%.

	gamma	rho
Air	1.4	1.153
SF-6	1.648	1.076

Расчетная область -  $0.45 \times 0.2$

Область с  $SF_6$  -  $0.15 \times 0.1$

Сетка -  $720 \times 320$

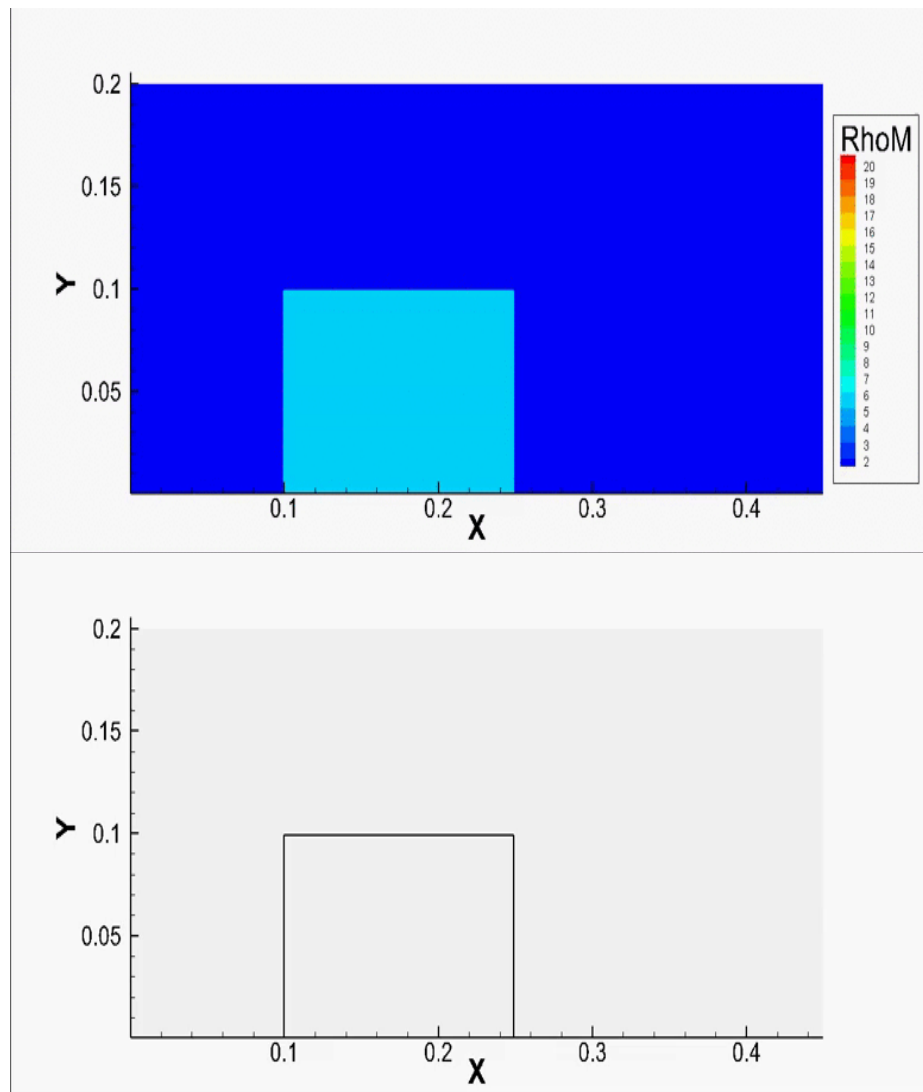
Число Куранта - 0.45

Постановка эксперимента взята из [“Bates K. R., Nikiforakis N., Holder D. Richtmyer–Meshkov instability induced by the interaction of a shock wave with a rectangular block of  \$SF\_6\$  // Physics of Fluids. 2007.”](#)



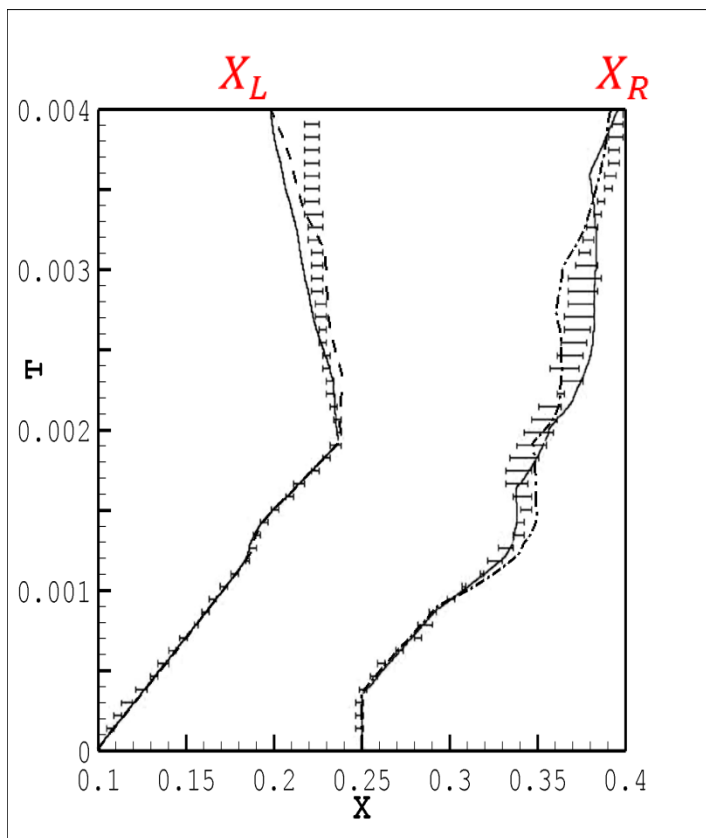
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

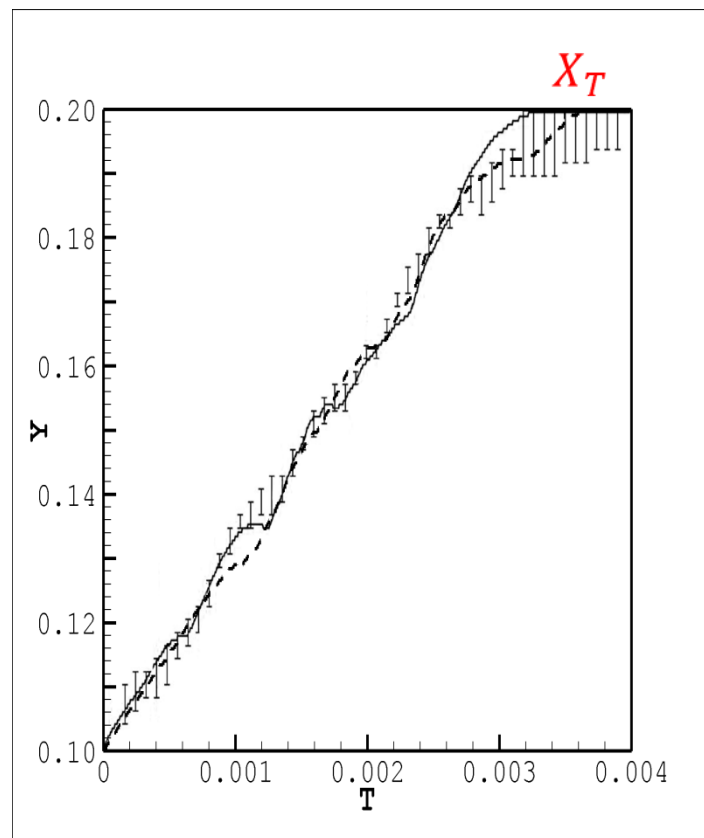


плотность

градиенты плотности и  
давления



Положение крайней левой и крайней правой точек с SF6. Штриховая линия - КАБАРЕ, сплошная - WENO, отрезки - экспериментальные данные с погрешностью.



Положение крайней верхней точки с SF6. Штриховая линия - КАБАРЕ, сплошная - WENO, отрезки - экспериментальные данные с погрешностью.



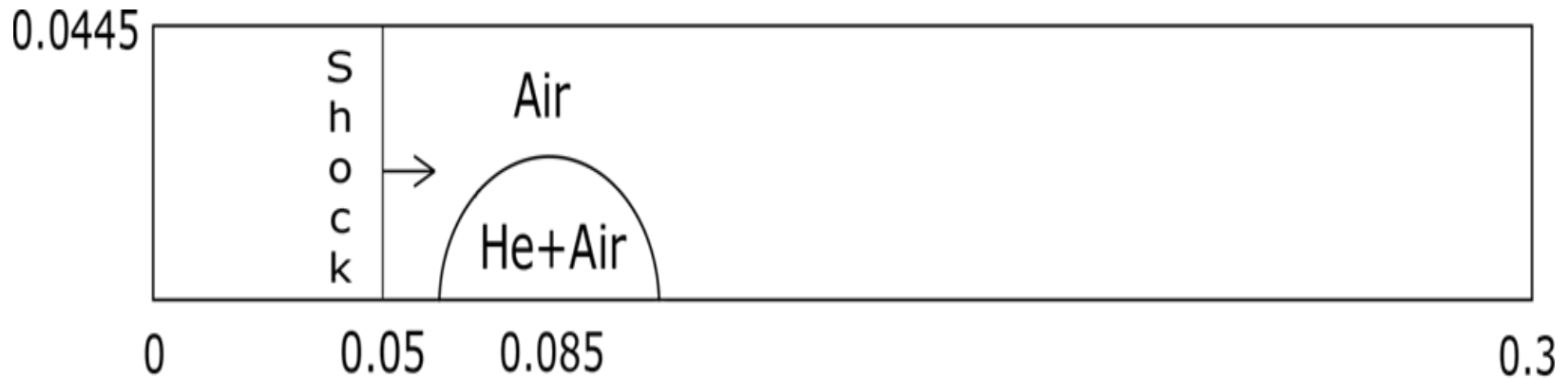


РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

ИБРАЭ

# Прохождение УВ $M=1.21$ через пузырь легкого газа



	<b>gamma</b>	<b>rho</b>
Air	1.4	1
He+Air	1.648	0.182

Расчетная область -  $0.3 \times 0.445$

Радиус пузыря - 0.025

Сетка -  $1450 \times 215$

Число Куранта - 0.45

Постановка эксперимента взята из работы [“Lagumbay R. S., Vasilyev O. V., Haselbacher A. Homogeneous Equilibrium Mixture Model for Simulation of Multiphase/Multicomponent Flows // International journal for numerical methods in fluids. 2007.”](#)



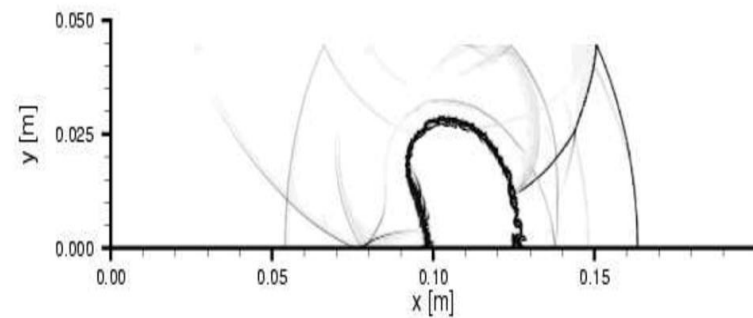
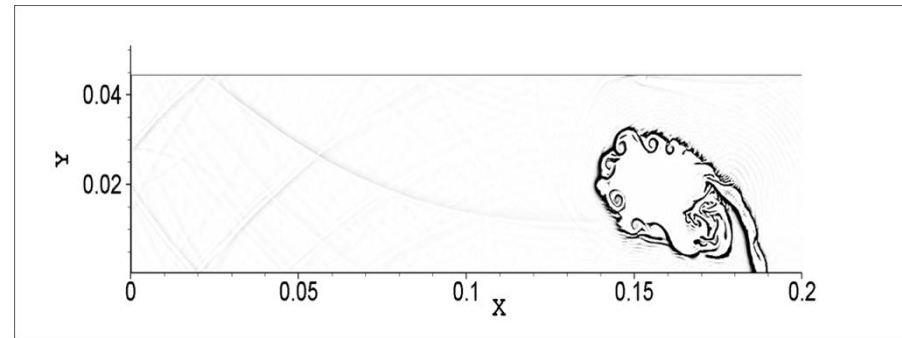
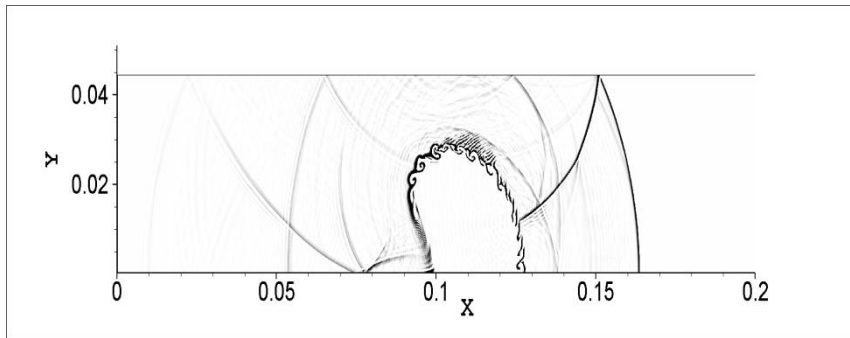


РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

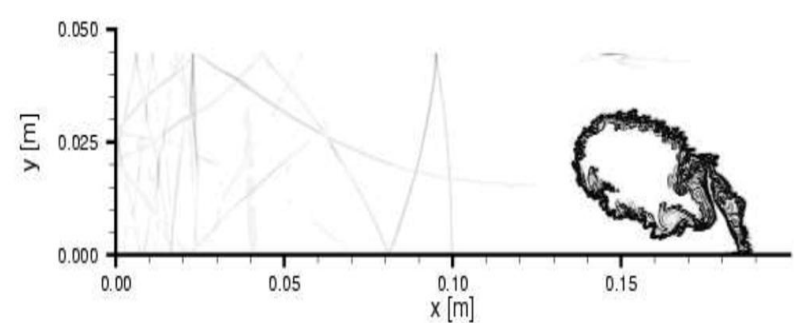
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

ИБРАЭ

# Сравнение



(с) 201  $\mu\text{s}$ .



(с) 674  $\mu\text{s}$ .

Рис 3. Сопоставление результатов по кабаре (сверху) с результатами по WENO (снизу) на моменты времени 201 мс (слева) и 674 мс (справа)



В.М. Головизнин



В. Кондаков



А. Зайцев



В. Глотов



А. Канаев



А.В. Соловьев



М.А. Зайцев



Д. Асфандияров



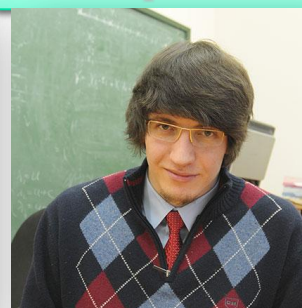
С. Карабасов



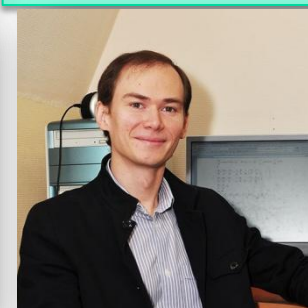
А. Данилин



С.А. Финогенов



А. Рязанов



И. Короткин