

# Моделирование задач гидродинамической устойчивости с помощью библиотек OpenFOAM

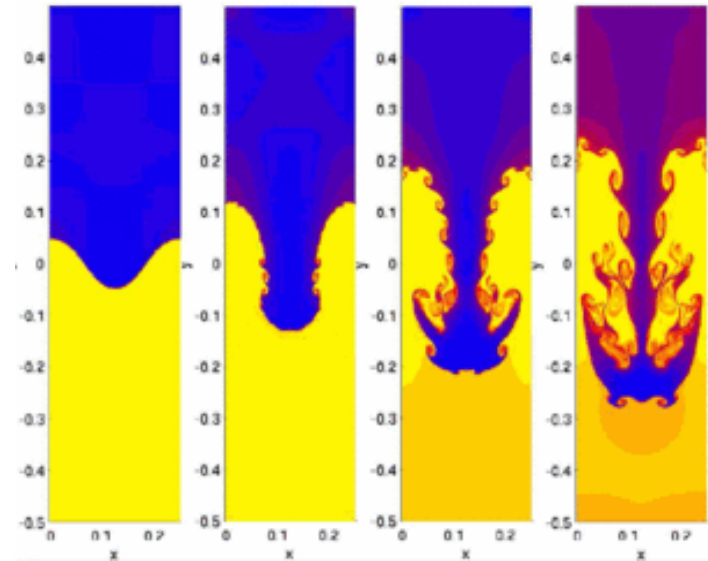
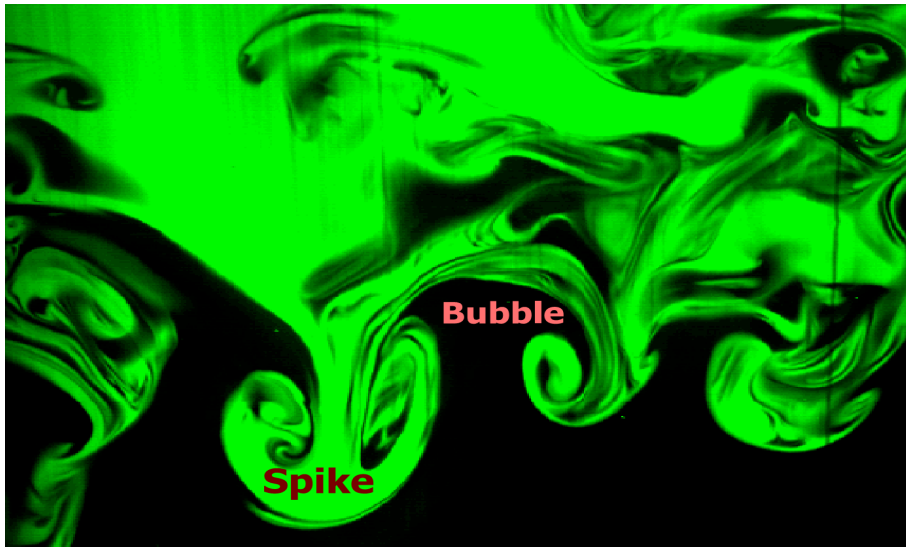
Ильяс Сибгатуллин<sup>1</sup> и Сергей Стрижак<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup> МГТУ им. Баумана, Москва, Россия

III Международная конференция  
ОБЛАЧНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ: ОБРАЗОВАНИЕ,  
ВЫЧИСЛЕНИЯ, РАЗРАБОТКИ  
2012

# Неустойчивость Релея-Тейлора



- Неустойчивость поверхности раздела между двумя средами различной плотности при ускоренном движении одной из них в другую
- Астрофизика: межзвездный газ, вспышки сверхновых
- Инерциальный управляемый термоядерный синтез
- Геофизика, океанология ...

Актуальные задачи:

- Турбулентное перемешивание, взаимодействие пузырей, доминирующие пузыри
- Понимание механизмов развития одномодовых возмущений важно для понимания турбулентных режимов неустойчивости Релея-Тейлора

## Актуальные задачи:

- Турбулентное перемешивание, взаимодействие пузырей, доминирующие пузыри
- Понимание механизмов развития одномодовых возмущений важно для понимания турбулентных режимов неустойчивости Релея-Тейлора

*Иногамов Н.А., Демьянов А.Ю., Сон Э.Е.*  
Гидродинамика перемешивания. 1999

## Сотрудничество в рамках Alpha-Group

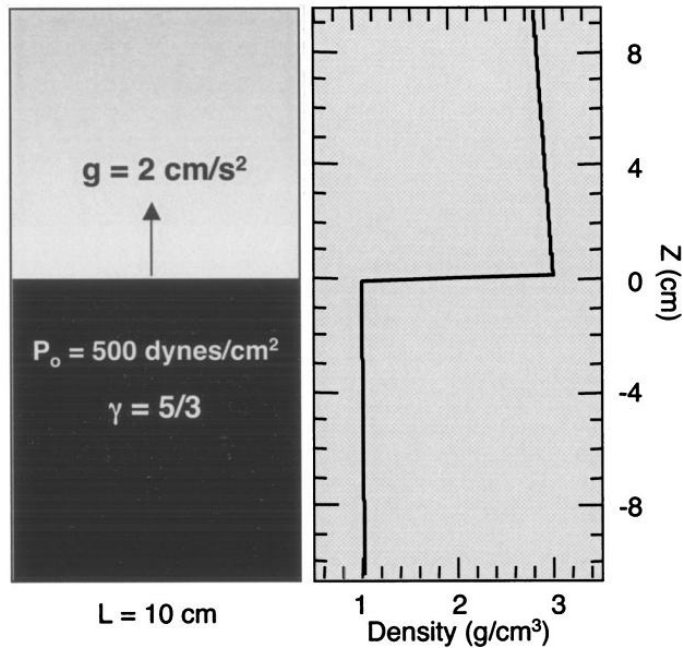


TABLE I. Code types and names.

Institution	Code	Method	Zoning	IR
AWE	TURMOIL3D	Eulerian	$256 \times 256 \times 512$	No
			$128 \times 128 \times 256$	No
U. Chicago	FLASH	P-P-M	$256 \times 256 \times 512$	No
LLNL	WP/PPM	P-P-M	$256 \times 256 \times 512$	No
LLNL	NAV/STK	N-S	$256 \times 256 \times 512$	No
Texas A & M	RTI-3D	Eulerian	$128 \times 128 \times 256$	No
LLNL	HYDRA	ALE	$256 \times 256 \times 512$	No
			$128 \times 128 \times 256$	Yes and No
Sandia NL	ALEGRA	ALE	$128 \times 128 \times 256$	Yes and No

G. Dimonte et al. A comparative study of the turbulent Rayleigh–Taylor instability using high-resolution three-dimensional numerical simulations: The Alpha-Group collaboration, *Physics of Fluids*. 2004. volume 16. N5. 1668-1693.

P. Ramaprabhu et al. Limits of the potential flow approach to the single-mode Rayleigh-Taylor problem, *PHYSICAL REVIEW E* 74, 066308. 2006.

# Развитие неустойчивости Релея-Тейлора

Малые возмущения на разделе фаз растут экспоненциально

$$k = 2\pi / L$$

$$h(t) = h_0 \cosh(\Gamma t),$$

$\Gamma$  Инкремент роста

$$\Gamma = \sqrt{Agk}$$

Число Атвуда

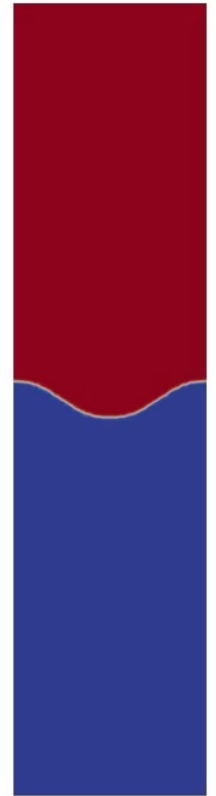
$$A = \frac{\rho_{\text{heavy}} - \rho_{\text{light}}}{\rho_{\text{heavy}} + \rho_{\text{light}}}$$

Постоянная (конечная) скорость

Число Фруда

$$v_b = Fr \sqrt{\frac{AgL}{1 + A}}$$

$$v_b ? A$$



**Ускорение гриба и пузыря ?**

# OpenFOAM для исследования задач гидродинамической устойчивости, динамических свойств, бифуркаций и аттракторов

- Изучение и настройка решателей OpenFOAM для «ламинарных» задач гидродинамической устойчивости
- interFoam для RT
- buoyantBoussinesqPimpleFoam для RB
- swak4Foam для построения начальных и граничных распределений
- большие сетки ( $100 * 10^6$ )

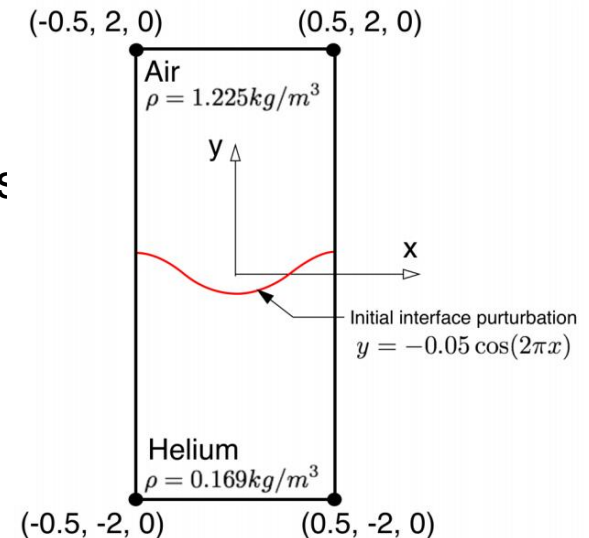
# Методы моделирования нейустойчивости РТ

- методы, при использовании которых поверхность раздела аппроксимируется кусочно-заданным полиномом (метод «Front Tracking», метод граничных элементов);
- методы, основанные на отслеживании объема каждой фазы в расчетных ячейках, близких к границе сред (метод «Volume of Fluid» – VOF);
- методы сквозного счета (метод «Level Sset»)

## interFOAM

**Rusche H.** Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions. Ph. D. Thesis Imperial College (UK), 2002.

**Eric Paterson** Multiphase Navier-Stokes simulation of the Rayleigh–Taylor Instability. A Basic Training Tutorial 5th OpenFOAM Workshop 21 - 24 June 2010  
Chalmers University of Technology  
Göteborg, Sweden



# InterFOAM

для чтения:

<http://www.h.jasak.dial.pipex.com/index.html>

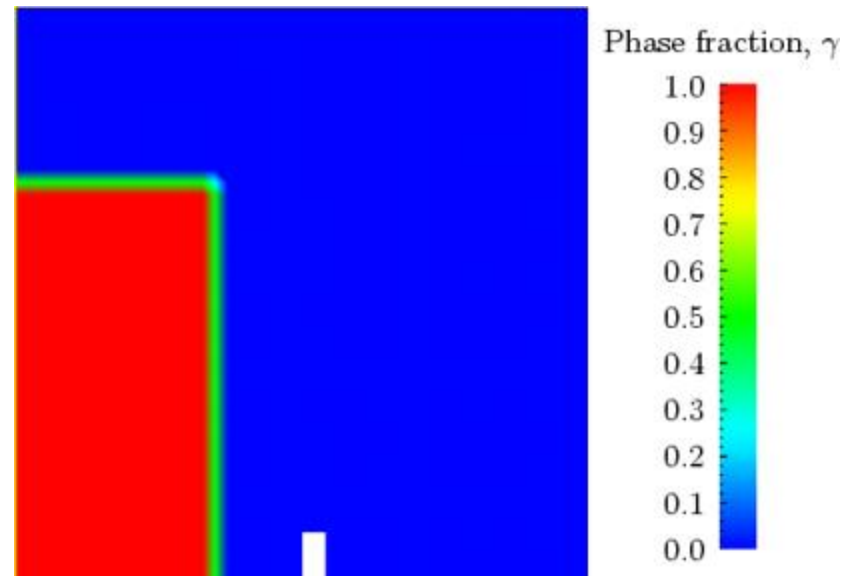
## VOF Volume of Fluid

$$F_{vol} = \gamma V_{cell}$$

вода  $\gamma = 1$

воздух  $\gamma = 0$

в промежутке  
поверхности раздела  
«интерфейс»  $\gamma(1 - \gamma)$





## Уравнение сохранения количества движения

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) - \nabla \cdot \mu \nabla U - \rho g = -\nabla p - F_s$$

$$\nabla \cdot U = 0$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma U) = 0.$$

на интерфейсе (и только на нём)

появляется член с искусственной сжимаемостью

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma U) + \nabla \cdot (\gamma(1 - \gamma)U_r) = 0$$

выражение для плотности

$$\rho = \gamma\rho + (1 - \gamma)\rho$$

сила поверхностного натяжения

$$F_s = \sigma\kappa(x)n$$

нормаль к поверхности

$$n = \frac{\nabla\gamma}{|\nabla\gamma|}$$

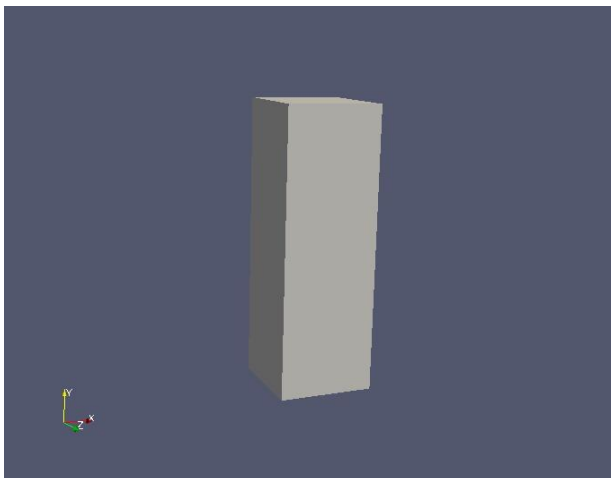
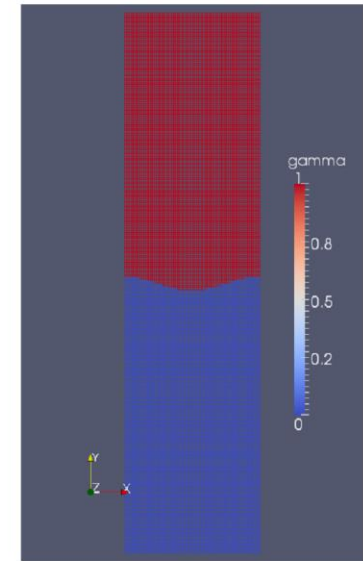
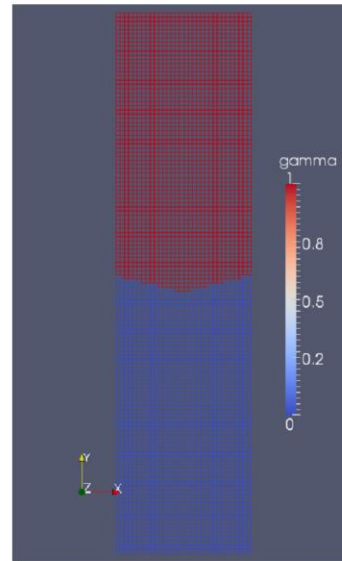
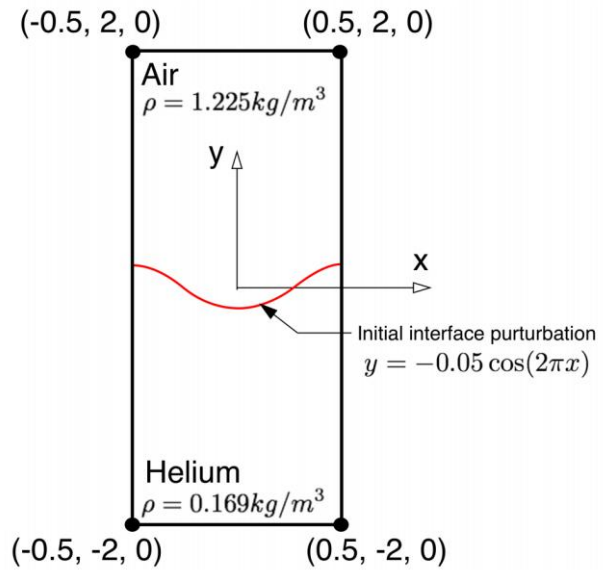
средняя кривизна

$$\kappa(x) = \nabla \cdot n$$

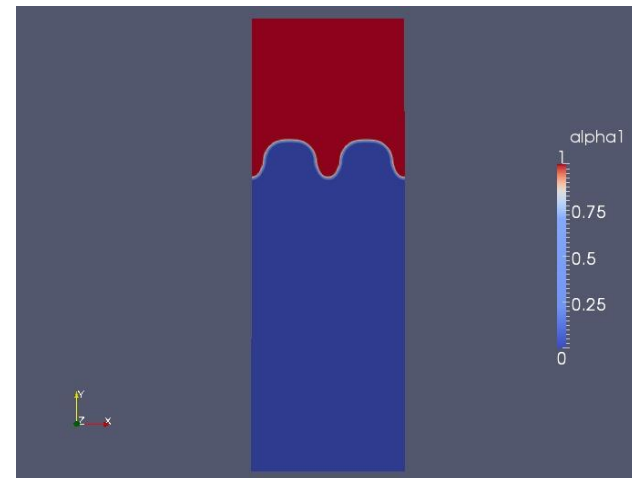
$$\frac{\partial\rho\mathbf{U}}{\partial t} + \rho\mathbf{a}_F + \nabla \cdot (\rho\mathbf{U}\mathbf{U})$$

$$= -\nabla p^* + \nabla \cdot (\mu\nabla\mathbf{U}) + (\nabla\mathbf{U}) \cdot \nabla\mu - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}\nabla\rho + \sigma\kappa\nabla\gamma$$

# Test case. 2D & 3D



$(-0.5 -4 -0.5) (1.5 2 1.5)$



128x384x128

- Моделирование и тестовые расчёты проводились на платформе [unihub.ru](http://unihub.ru)
- Расчеты на больших сетках до 100000000 ячеек проводились на суперкомпьютере Ломоносов.

# наборы полезных утилит

- **swak4Foam**
- **pyFoam**

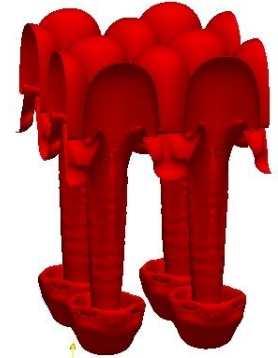
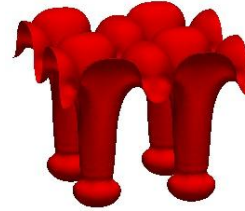
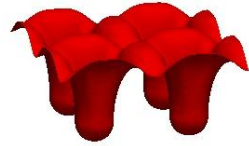
<http://www.openfoamwiki.net/index.php/Contrib/swak4Foam>

[http://www.openfoamwiki.net/index.php/Contrib\\_PyFoam](http://www.openfoamwiki.net/index.php/Contrib_PyFoam)

**funkySetFieldsDict**

```
Alpha1
{
    field alpha1;
    expression "1";
    condition "pos().y>=-
0.03*cos(2*3.141593*pos().x)*cos(2*3.141
593*pos().z)";
}
```

# Результаты 3D

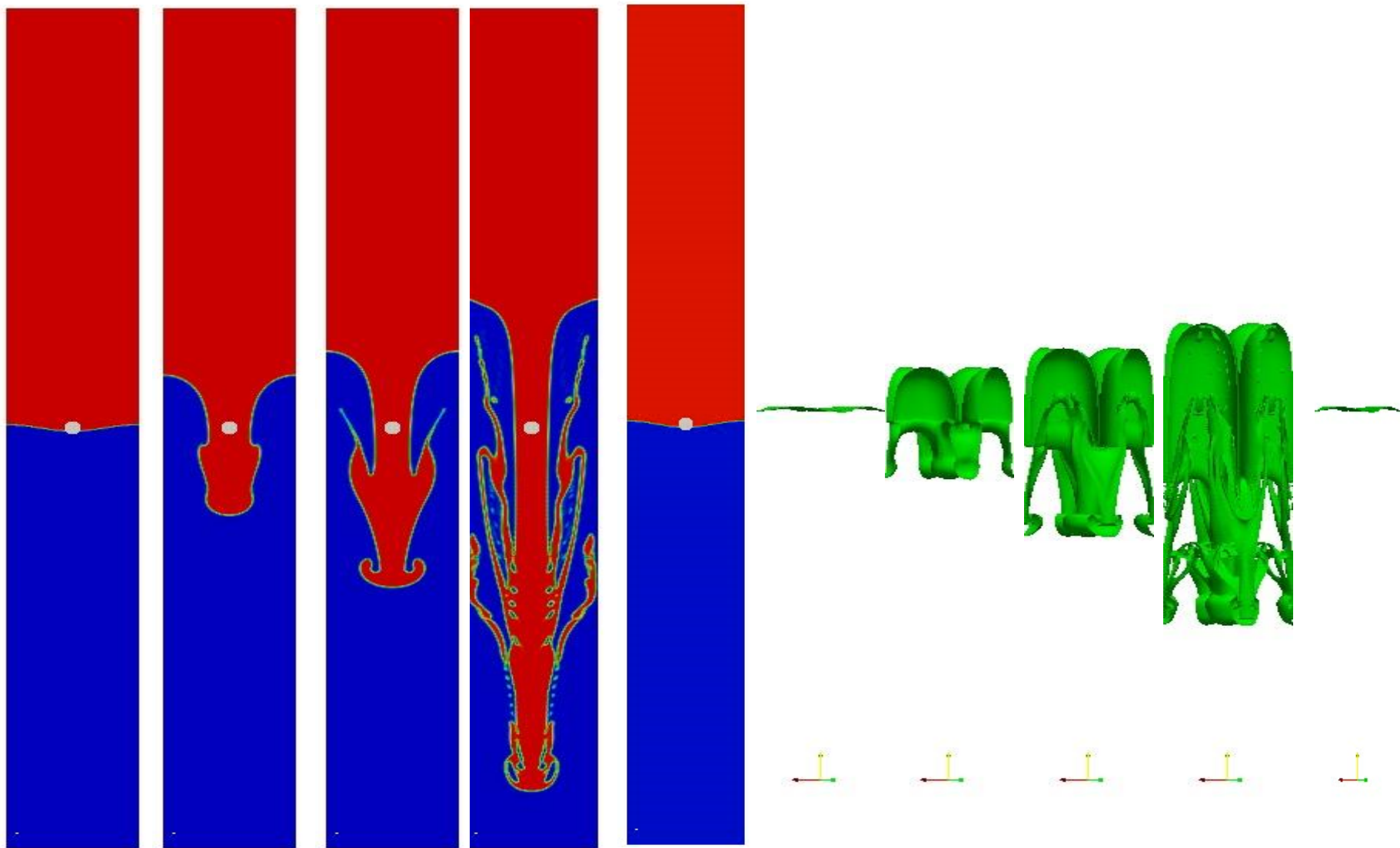


$$y = -0.03 * (1 + \cos(2 * 3.14 * x)) * (1 + \cos(2 * 3.14 * z))$$



$$y = -0.01 * \cos(2 * 3.14 * x) * \cos(2 * 3.14 * z)$$

# Динамика неустойчивости RT на сетке 128x128x1024



# HPC results. 3D case.



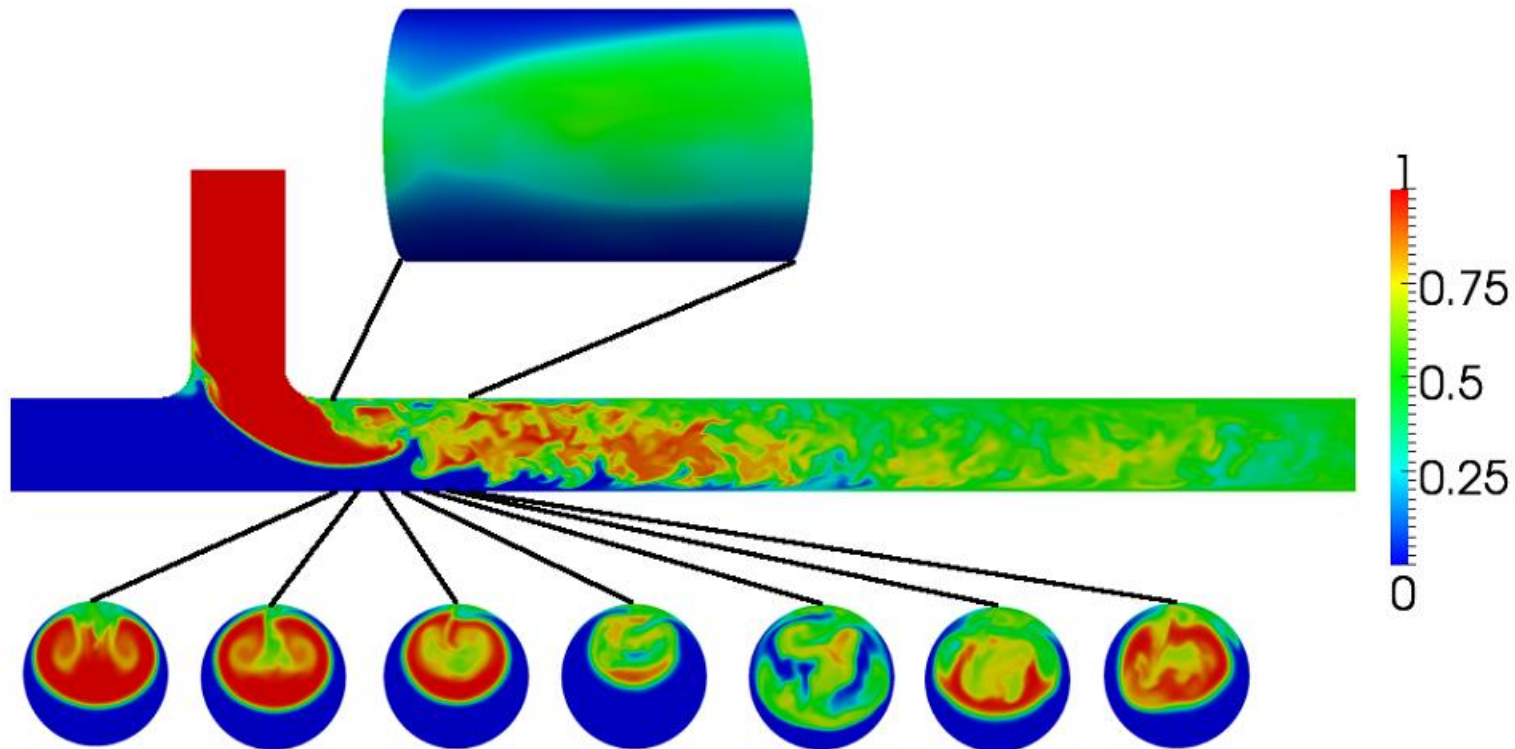
2 head nodes DL380 G7 + IB switches + 80 BL2x220 G7 compute nodes + 15 SL390G7 nodes with 45 GPU's + storage with 112 TB. More than 2000 computer cores

Number of elements	6291456
Atwood number	0.76
Time-Step	0.001
Number of time steps	1000
Cores (nodes*processor/nodes*cores/processor)	384 (32*2*6)
Overall CPU time	2610

128x384x128 cells	2x6x2	A=0.76	dt=0.001
Cores	Cells per core	ClockTime, s	Tend, s
36	173431	43057	1
48	131072	39144	1
96	65536	20962	1
144	44376	11551	1
192	32768	7192	1
240	26624	5237	1
288	21845	4218	1
300	20971	4020	1
336	18144	2936	1
360	17556	2812	1
<b>384</b>	<b>16128</b>	<b>2610</b>	<b>1</b>
396	15680	2624	1

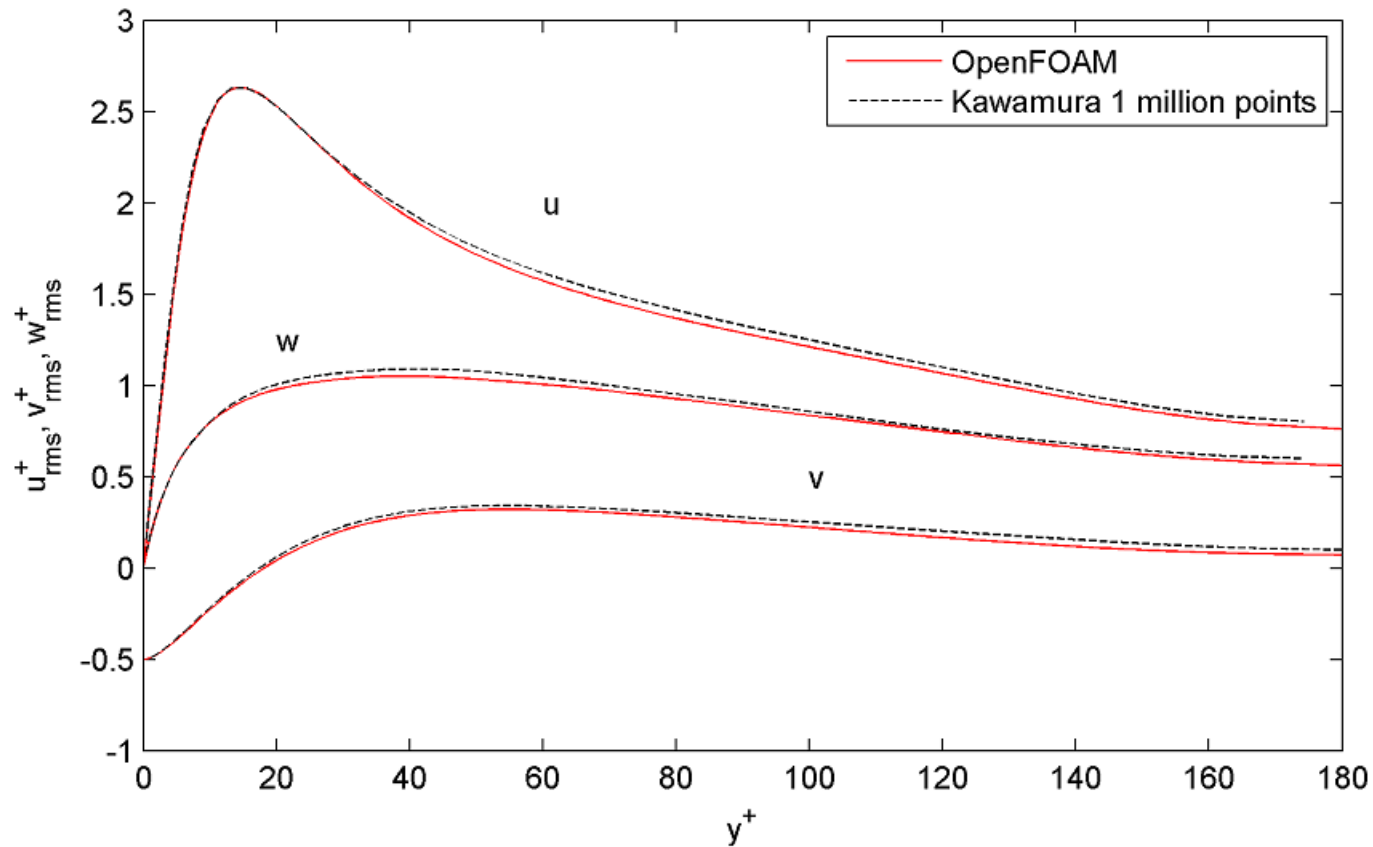


# Течение и теплообмен в месте соединения труб



Testing DNS capability of OpenFOAM  
and STAR-CCM+, S.W. VAN HAREN, 2011

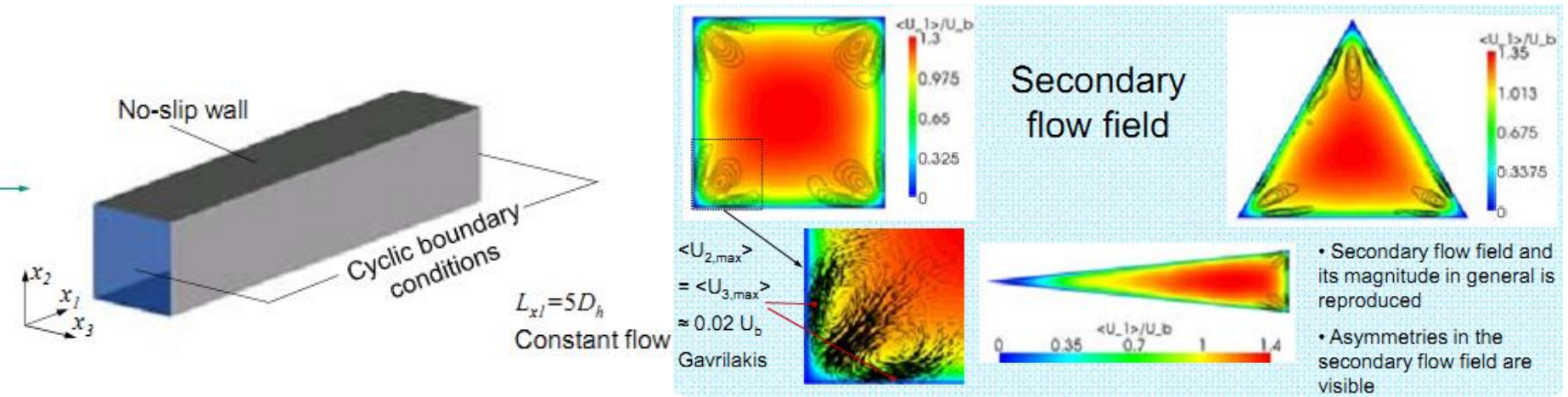
# Сравнение для течения в трубе



Re\_tau = 180

# Течения в каналах квадратного сечения

решатель: модифицированный channelFoam



Хорошее соответствие средних скоростей, флуктуаций скорости, сопротивления и вторичных течений

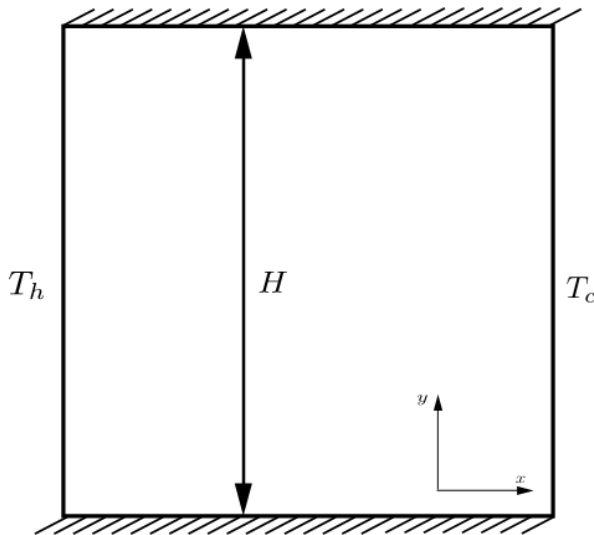
## Direct numerical simulation of turbulent flow through noncircular ducts: a validation

Gerti Daschiel and Bettina Frohnepfel

7th OpenFOAM® Workshop, Darmstadt, 2012

<http://www.extend-project.de/7th-openfoam-workshop>

# Свободная конвекция



$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + F_b;$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

Mecánica Computacional Vol XXX, págs. 277-296 (artículo completo)

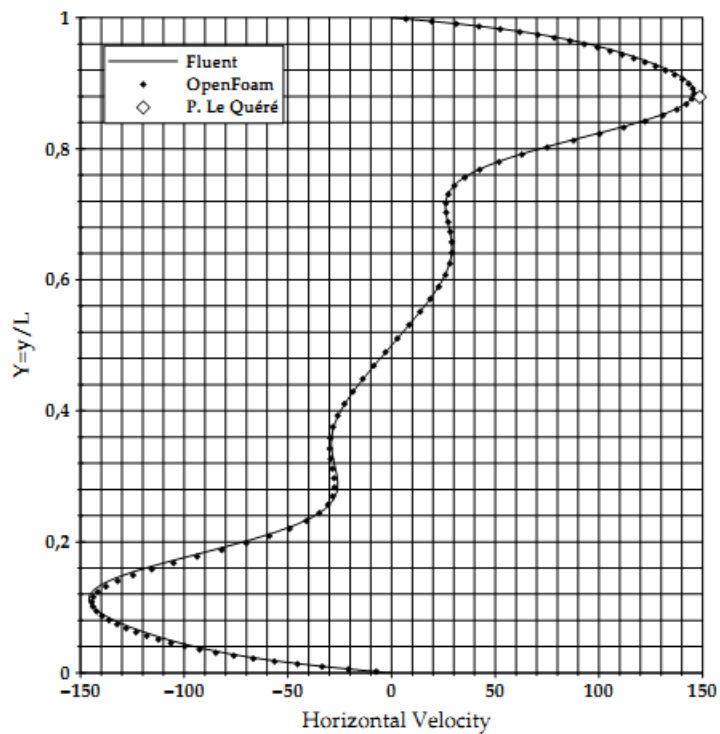
Oscar Möller, Javier W. Signorelli, Mario A. Storti (Eds.)

Rosario, Argentina, 1-4 Noviembre 2011

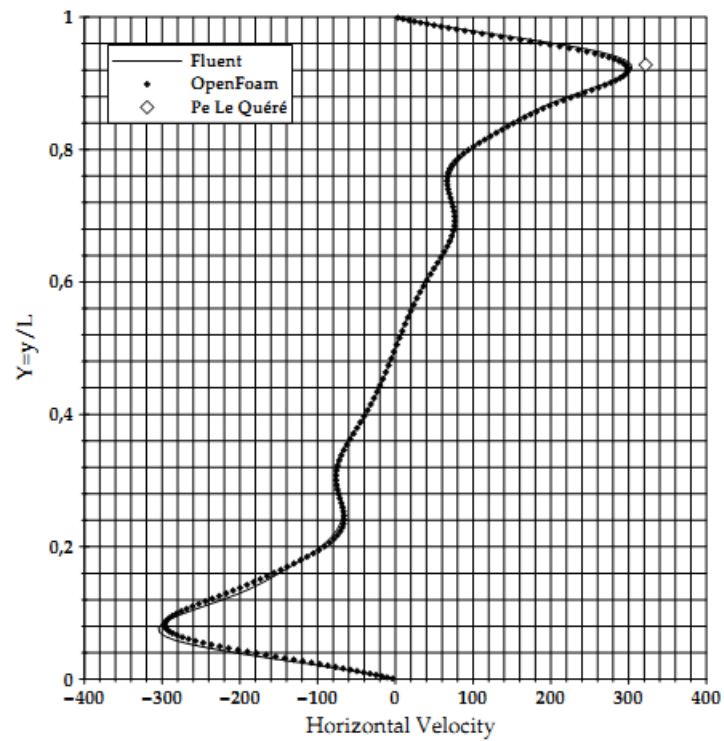
Ampofo F. and Karayiannis T. Experimental benchmark data for turbulent natural convection in an air filled square cavity. International Journal of Heat and Mass Transfer, 46(19):3551– 3572, 2003.

Le Quéré P. Accurate solutions to the square thermally driven cavity at high rayleigh number. Computers & Fluids, 20(1):29–41, 1991.

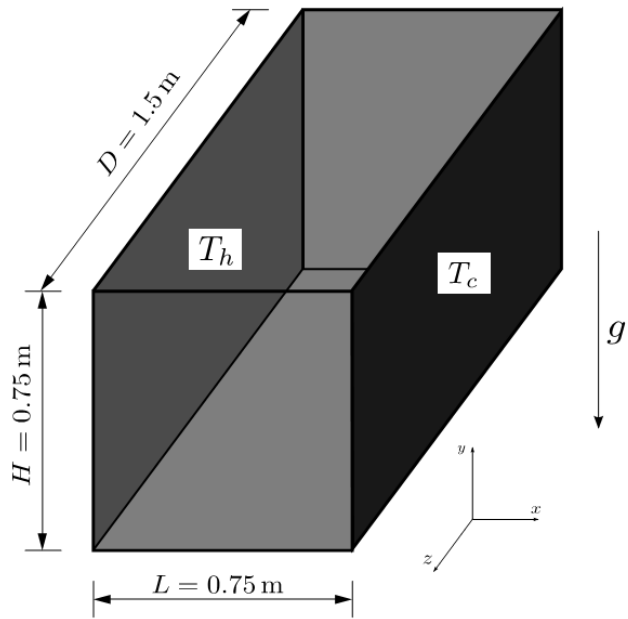
# buoyantBoussinesq-SimpleFoam



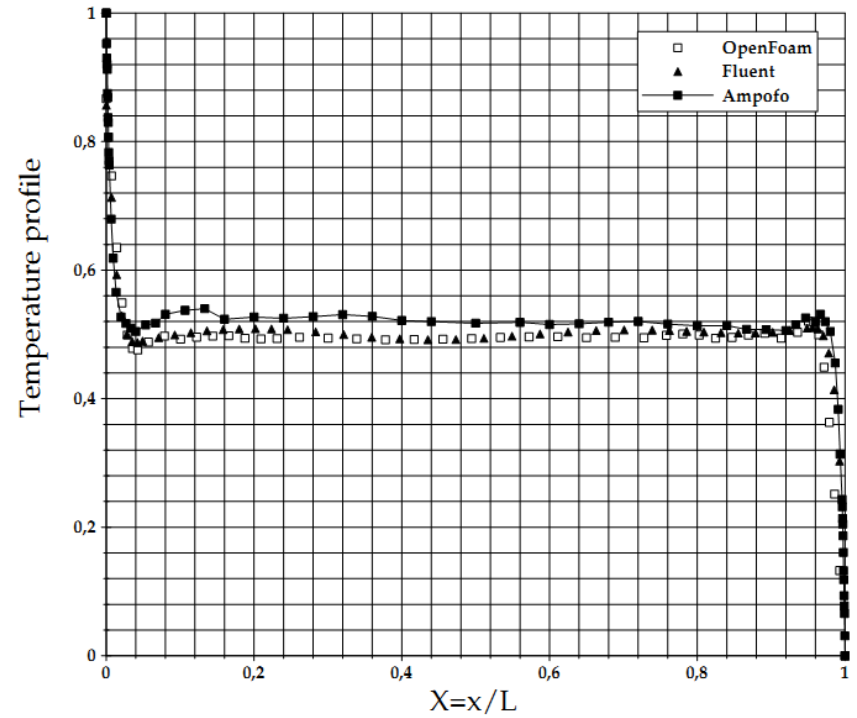
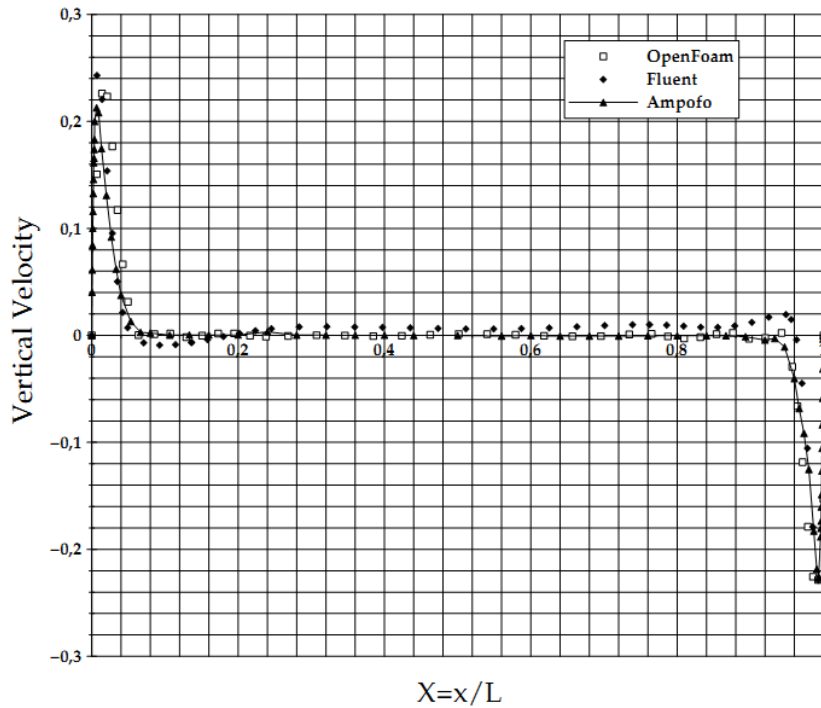
a)



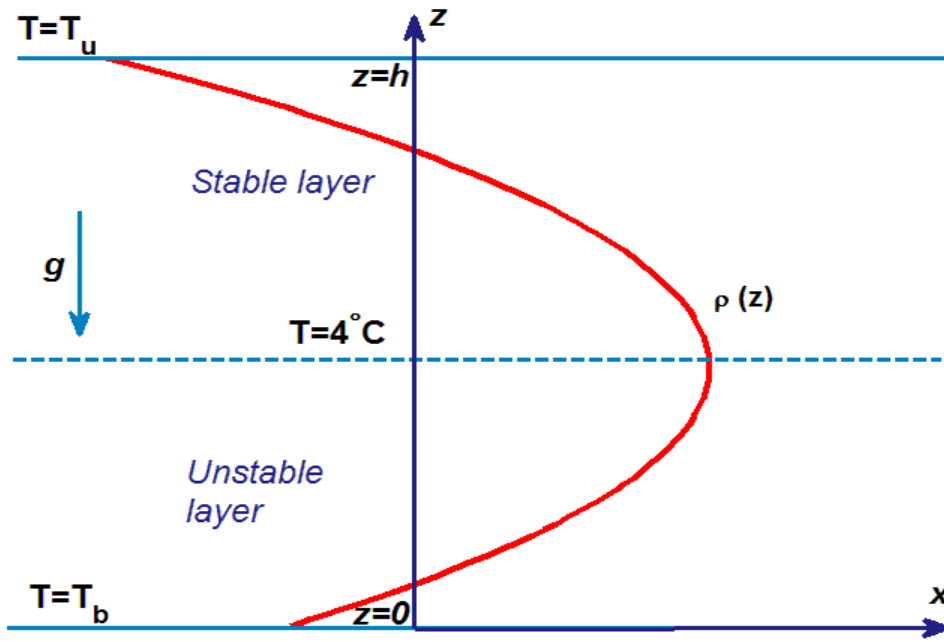
b)



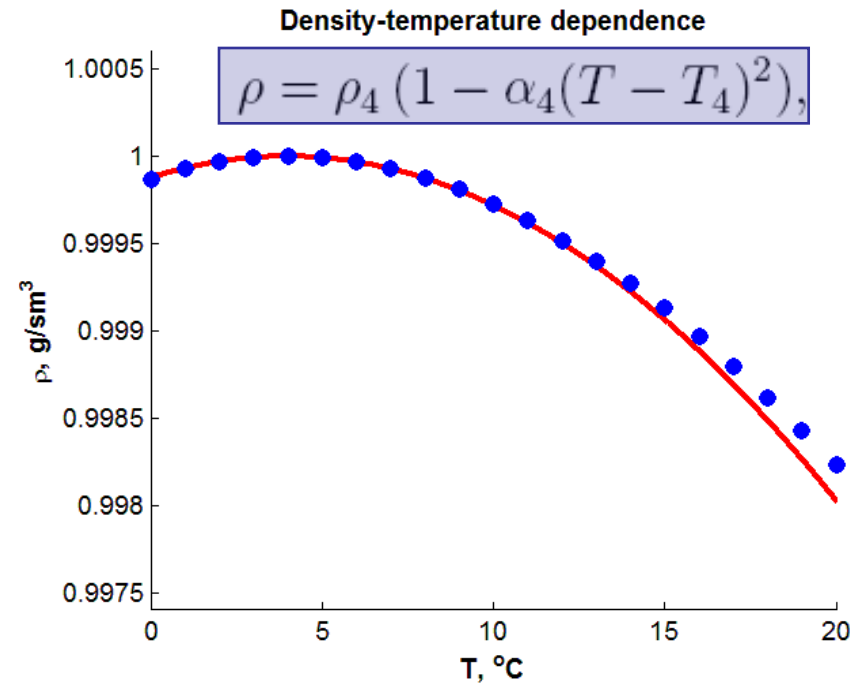
buoyant-BoussinesqPisoFoam  
+LES



# Неустойчивость Релея-Бенара, проникающая конвекция



$$\min(T_b, T_u) < 4^\circ < \max(T_b, T_u)$$



Boundary conditions:

$$z = 0 : \quad w = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \quad T = T_b$$

$$z = h : \quad w = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \quad T = T_u$$

$$\rho_4 = \rho|_{T=4^\circ}, \quad T_4 = 4^\circ, \quad \alpha_4 = 7.68 \cdot 10^{-6} (\text{°C})^{-2}$$

## Nondimensional system of equations for disturbances:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} - \zeta = -\nabla q + \sigma \Delta \mathbf{v} + \sigma \frac{R}{\lambda^5} T(T + 2\lambda - 2z) \mathbf{e}_z$$

$$q = \sigma p + \frac{1}{2} |\mathbf{v}|^2, \quad \zeta = \mathbf{v} \times \text{rot } \mathbf{v}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) T = w + \Delta T$$

$$\text{div } \mathbf{v} = 0$$

Parameters:

$$\sigma = \frac{\nu}{\kappa}$$

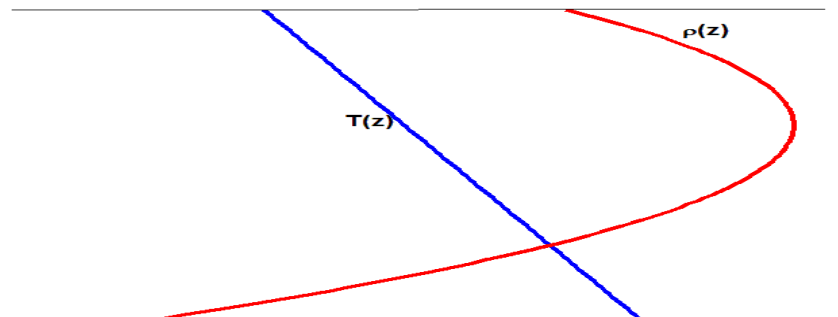
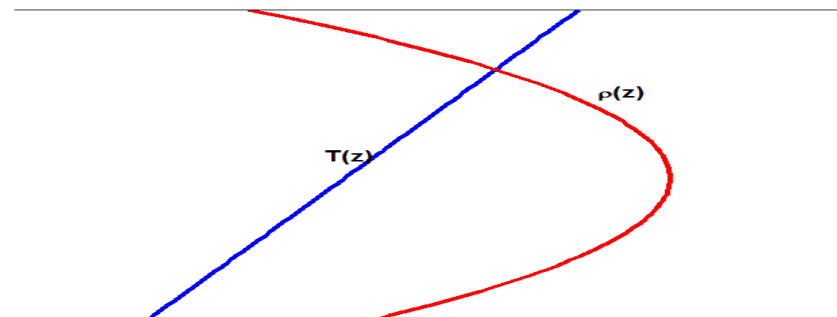
Prandtl number (for water at 4°C  
σ=11.5968)

$$\lambda = \frac{T_b - T_4}{T_b - T_u}$$

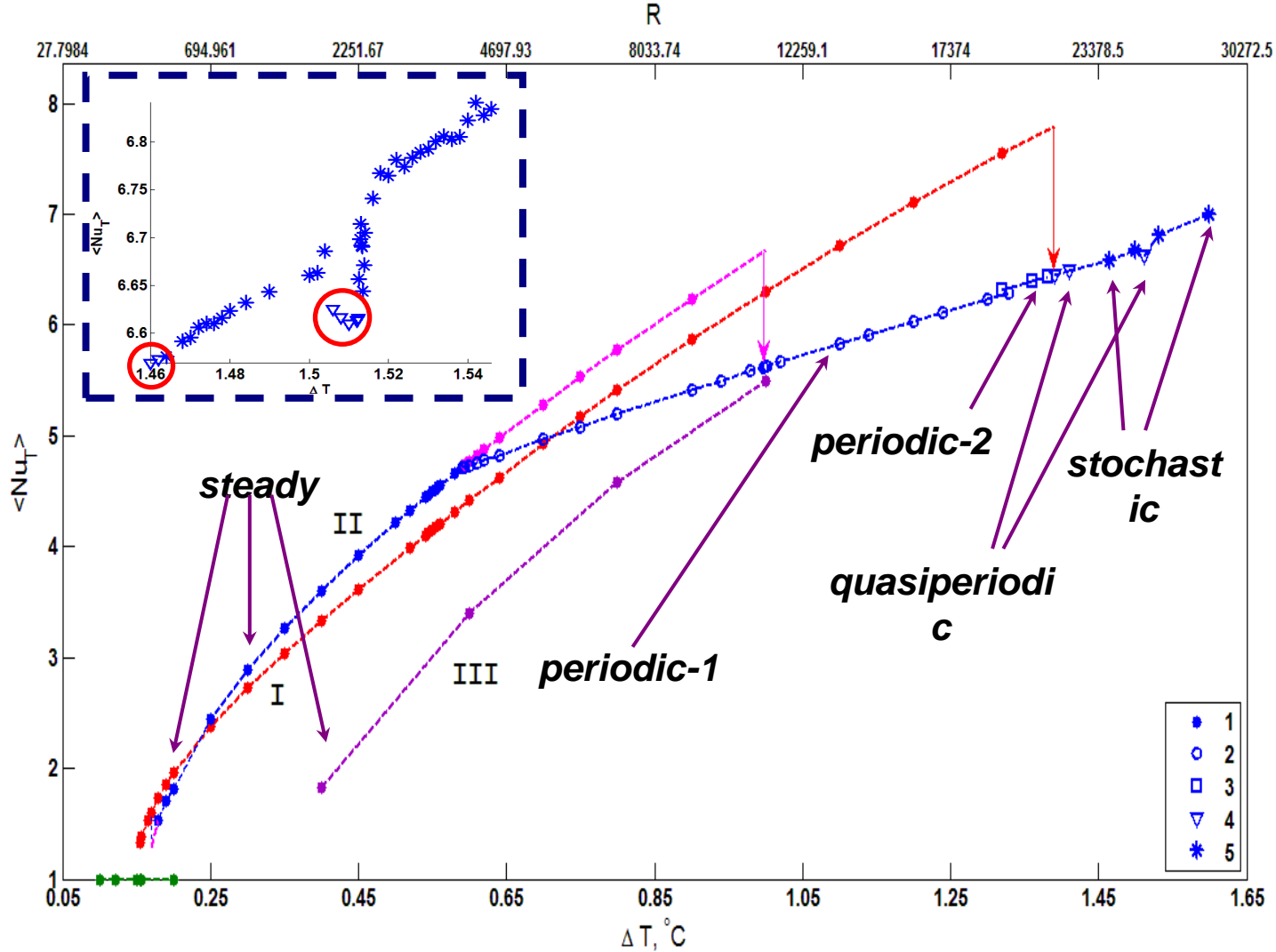
parameter which characterizes the  
location of density maximum in  
conductive state

$$R = \frac{g\alpha_4}{\nu\kappa} \frac{h^3}{\lambda^3} (T_b - T_4)^2$$

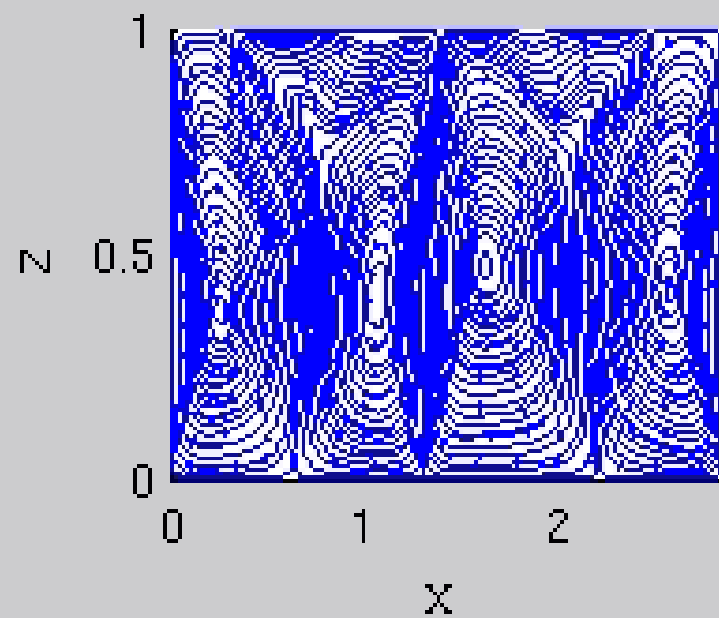
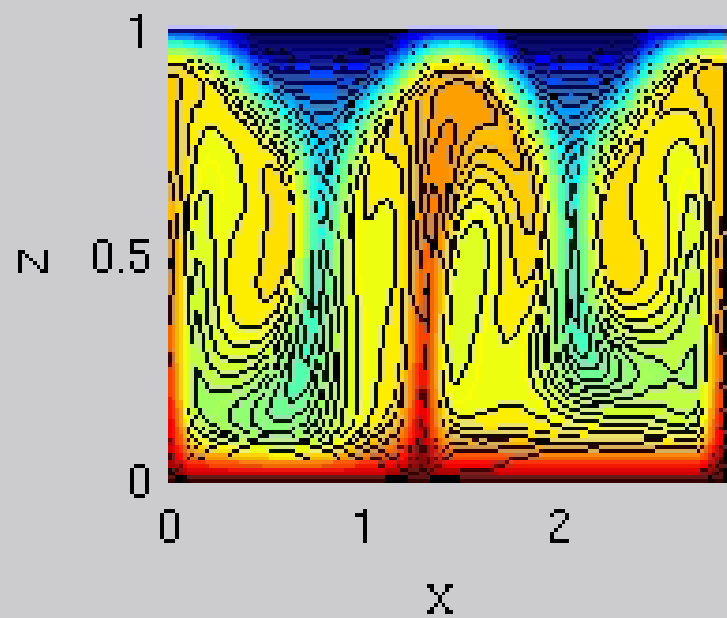
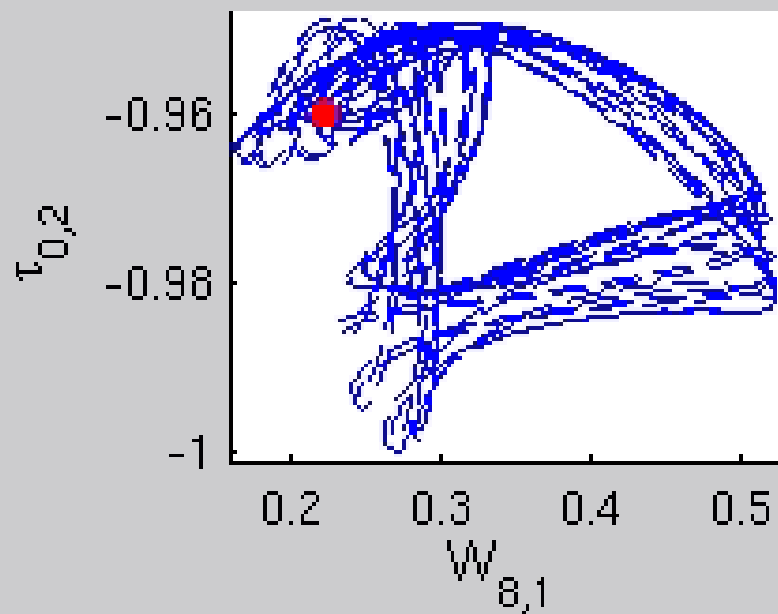
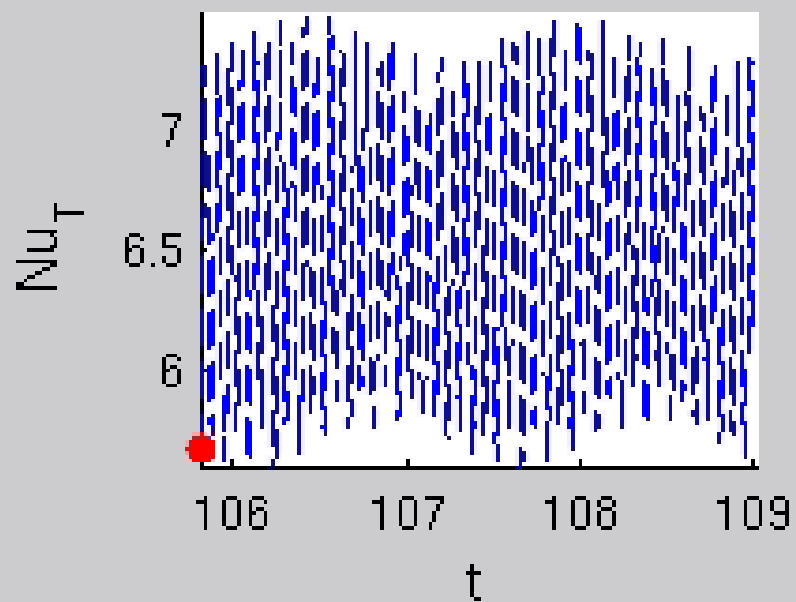
Rayleigh number



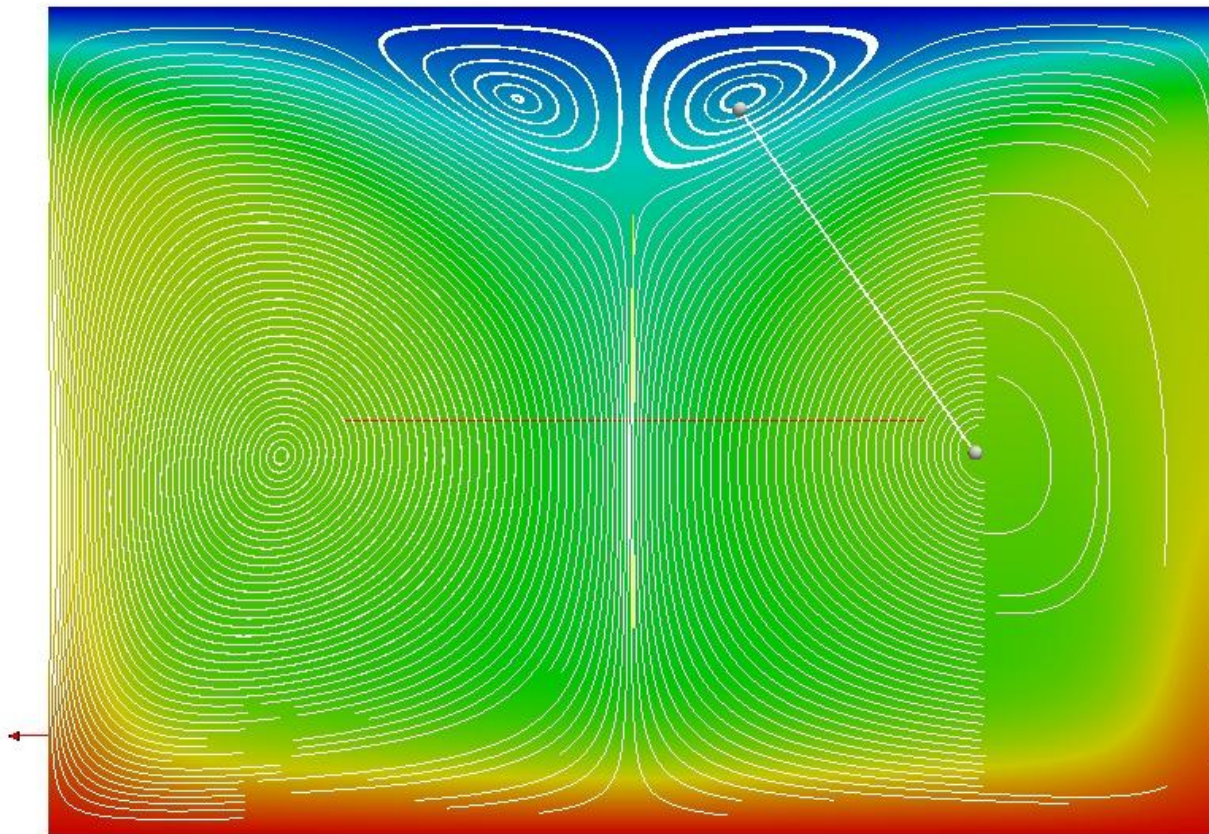




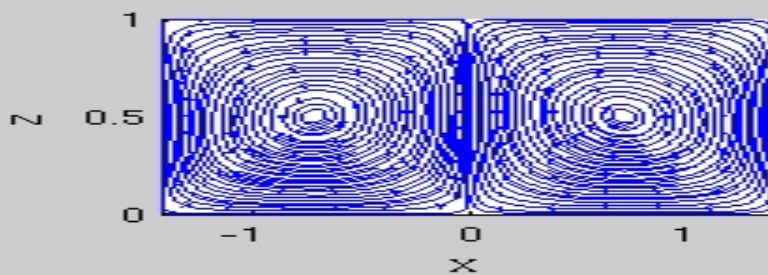
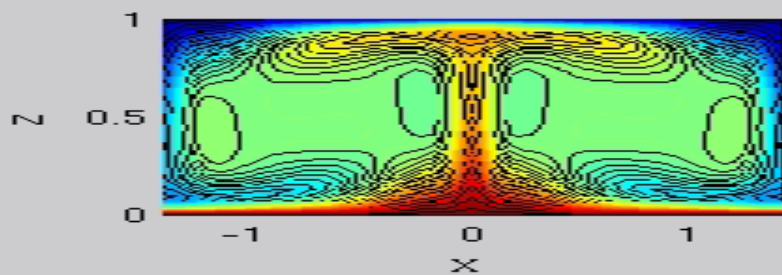
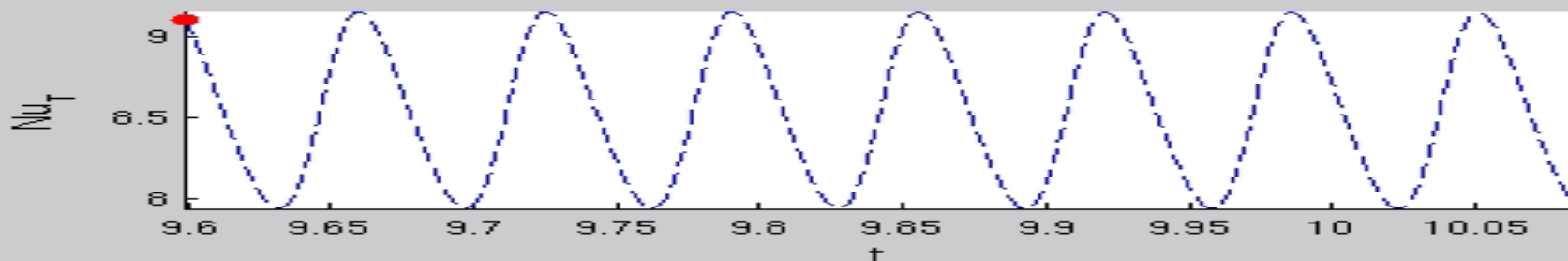
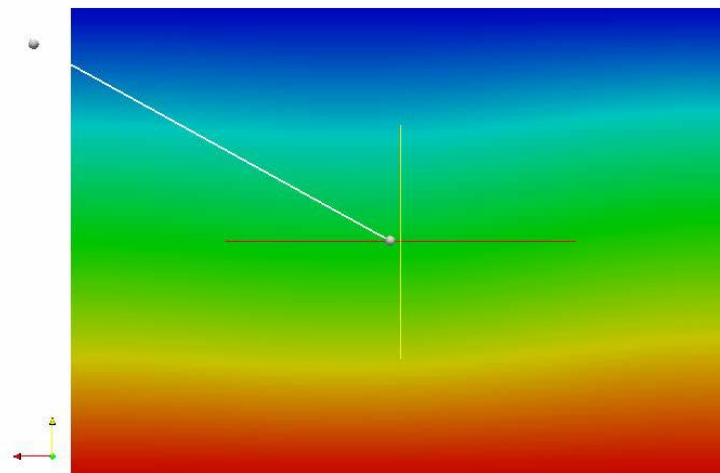
*D.V. Kuznetsova, I.N. Sibgatullin. Transitional Modes of Penetrative Convection in Plane Layer. 2012. Fluid Dynamics Research, IOP Publishing*



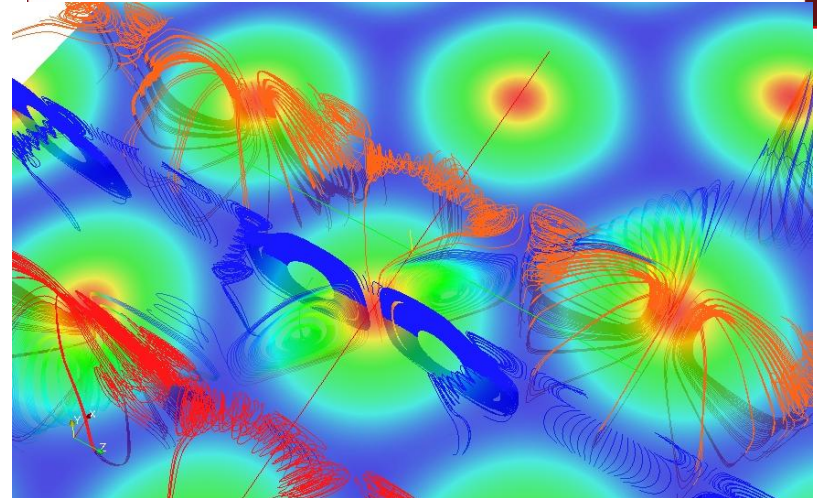
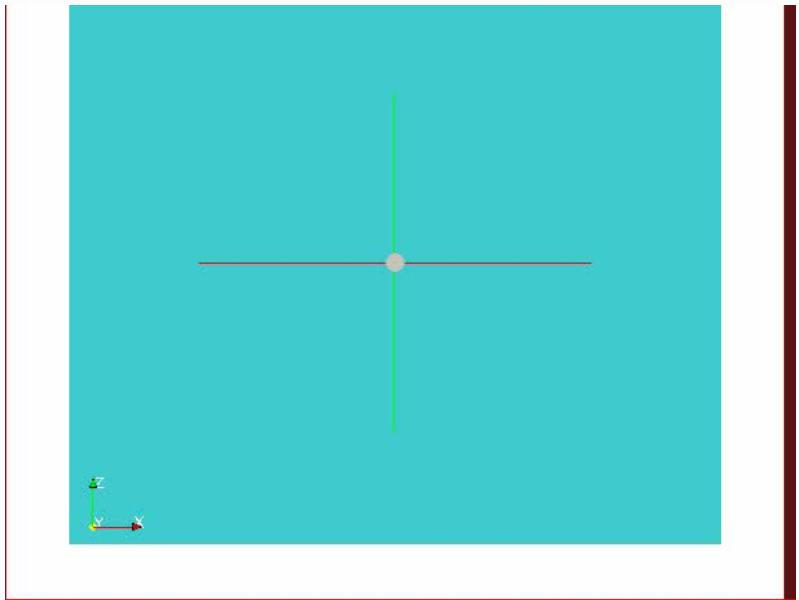
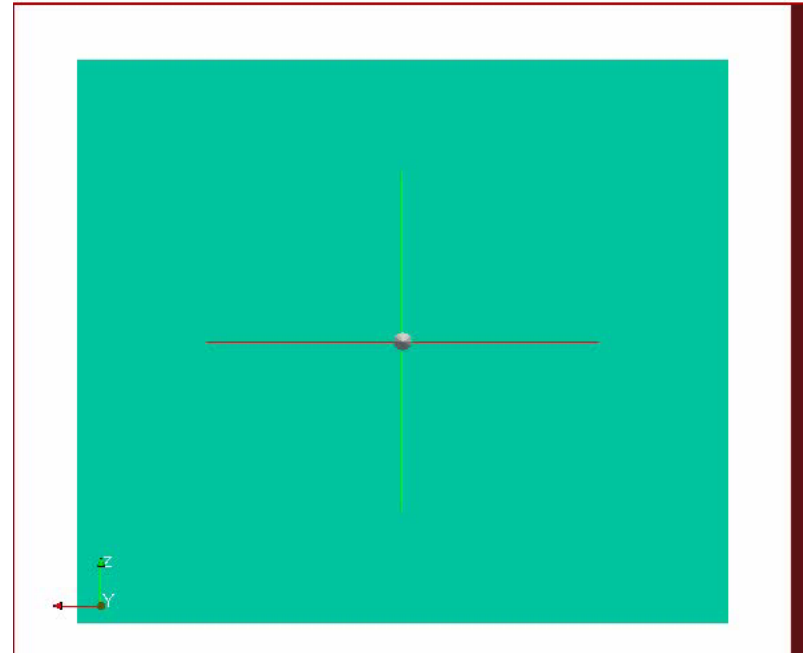
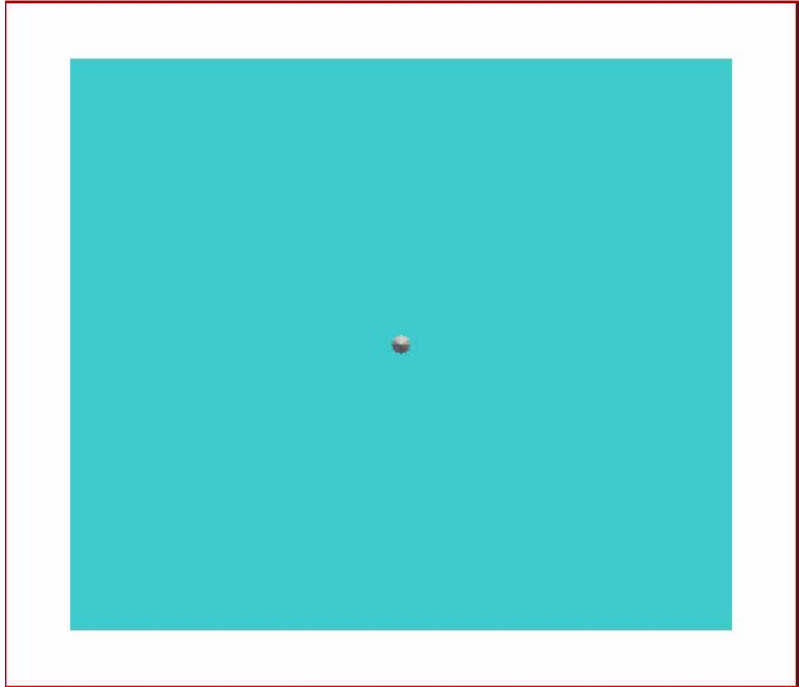
# Стационарные режимы, OpenFOAM



# Сравнение периодических режимов классической конвекции

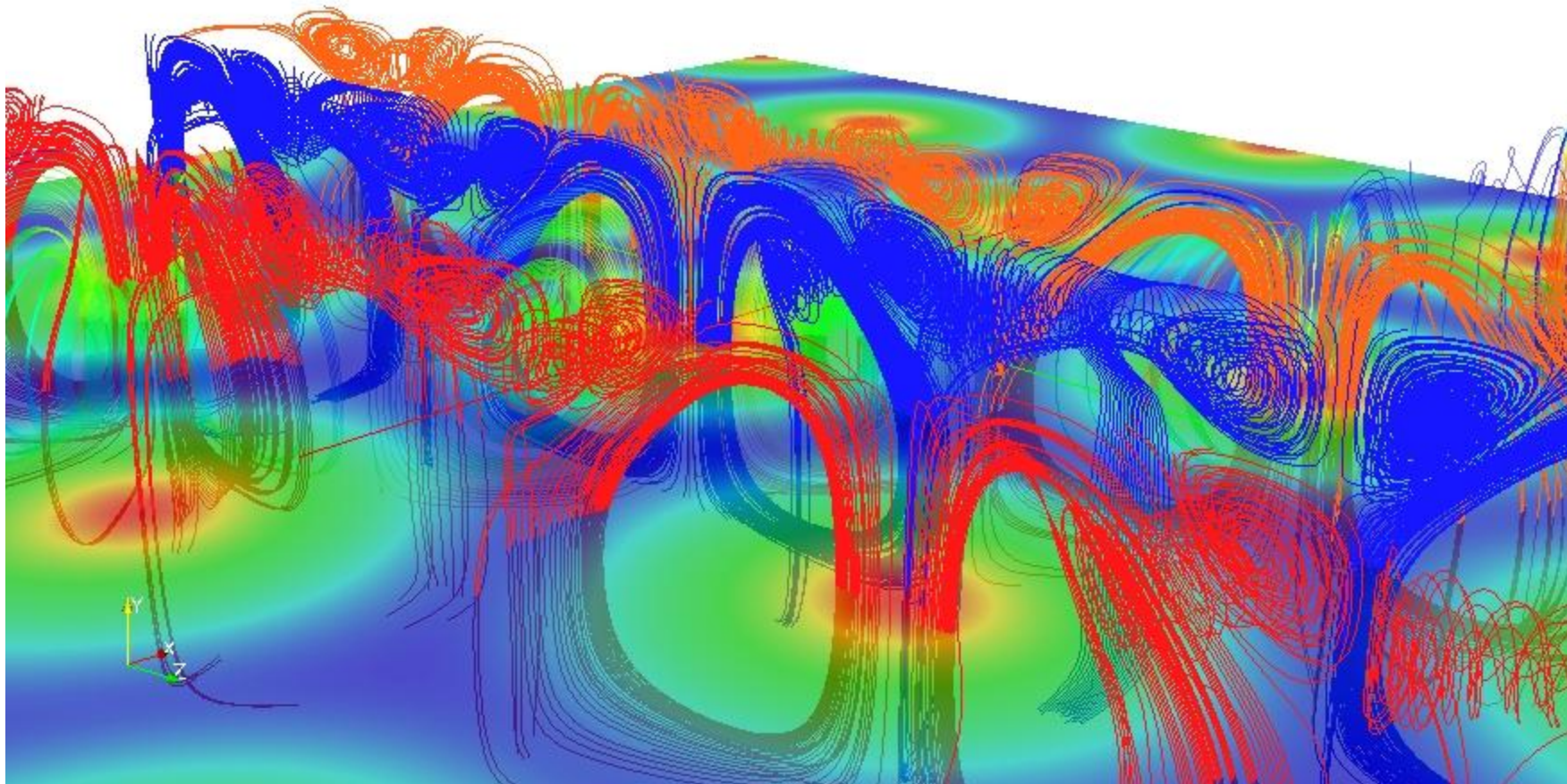


# Анимация различных режимов трёхмерной проникающей конвекции, полученных модификацией решателя buoyantBoussinesqPimpleFoam





## Гексагональные ячейки в проникающей конвекции



# Заключение

- Задачи, связанные с моделированием неустойчивости Релея-Тейлора и Релея-Бенара могут исследоваться при помощи открытых библиотек OpenFOAM
- Для того чтобы описывать тонкие эффекты связанные с развитием гидродинамической неустойчивости требуется настраивать и проверять решатели
- Проведенные расчёты показывают хорошую масштабируемость решателей, в частности interFoam на параллельных кластерах.