

# Моделирование турбулентных МГД течений и теплообмена в обогреваемых каналах с электропроводящими стенками

Я.И.Листратов<sup>1,2</sup>

Г.Г.Яньков<sup>2</sup>

М.В.Макаров<sup>2</sup>

Н.Г.Разуванов<sup>1,2</sup>



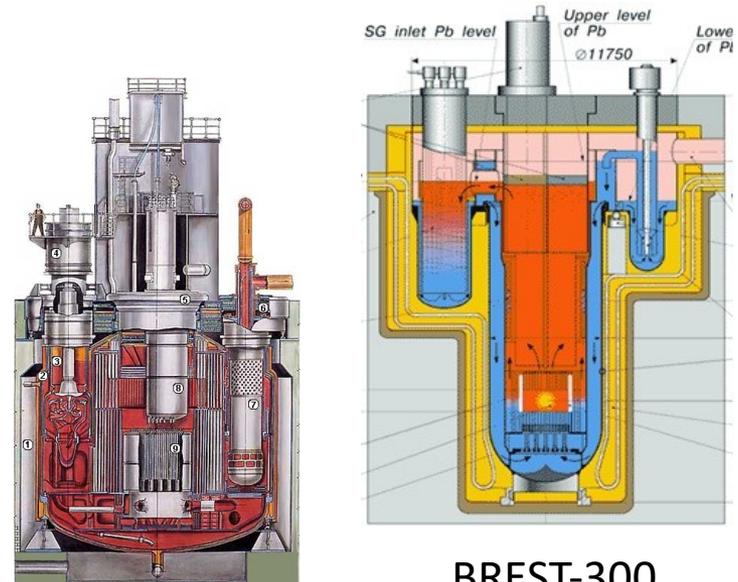
# Введение

## Жидкие металлы

- reactors (fast breeding, nuclear fusion (tokamak))
- metallurgy
- chemical technology
- crystal growth
- LM batteries

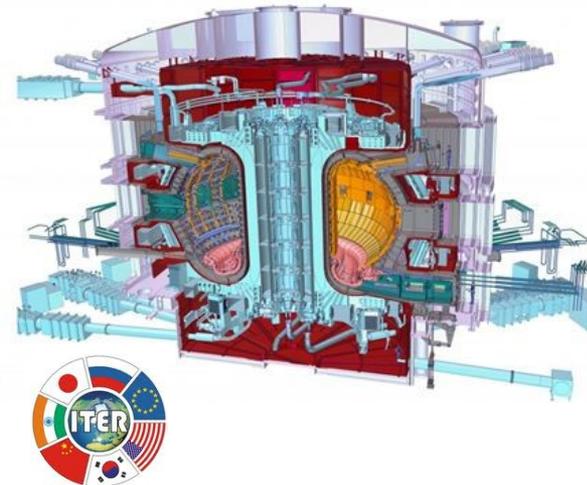
## Жидкие металлы в токамаке:

- cooling (Li, Pb, Na, Pb-Li, Na-K)  
[first wall, blanket, divertor]
- power conversion
- tritium breeding



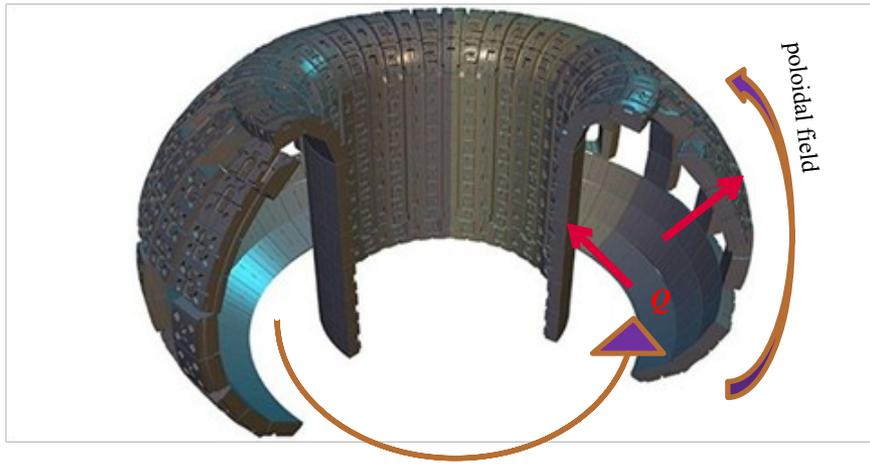
BN

BREST-300



# Введение

## Мотивация: жидкометаллические модули blankets для токамака



A shield/heat exchanger operating with PbLi(or) under unique conditions

*Strong magnetic field*

$B \sim 4$  to 12T

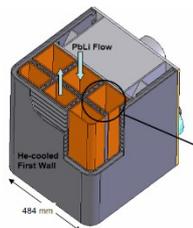
$Ha \sim 10^4$

*Strong nonuniform heating*

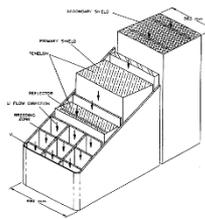
$q \sim 1$  to 3 MW/m<sup>2</sup>

$Gr \sim 10^{12}$

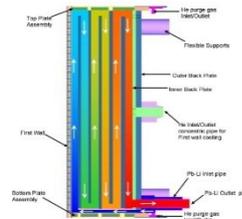
toroidal field  $\sim 95\%B$



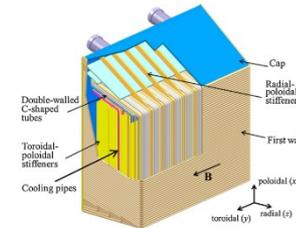
**DCLL**



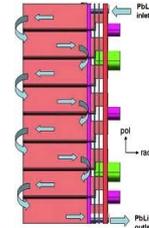
**SCLL**



**LLCB**

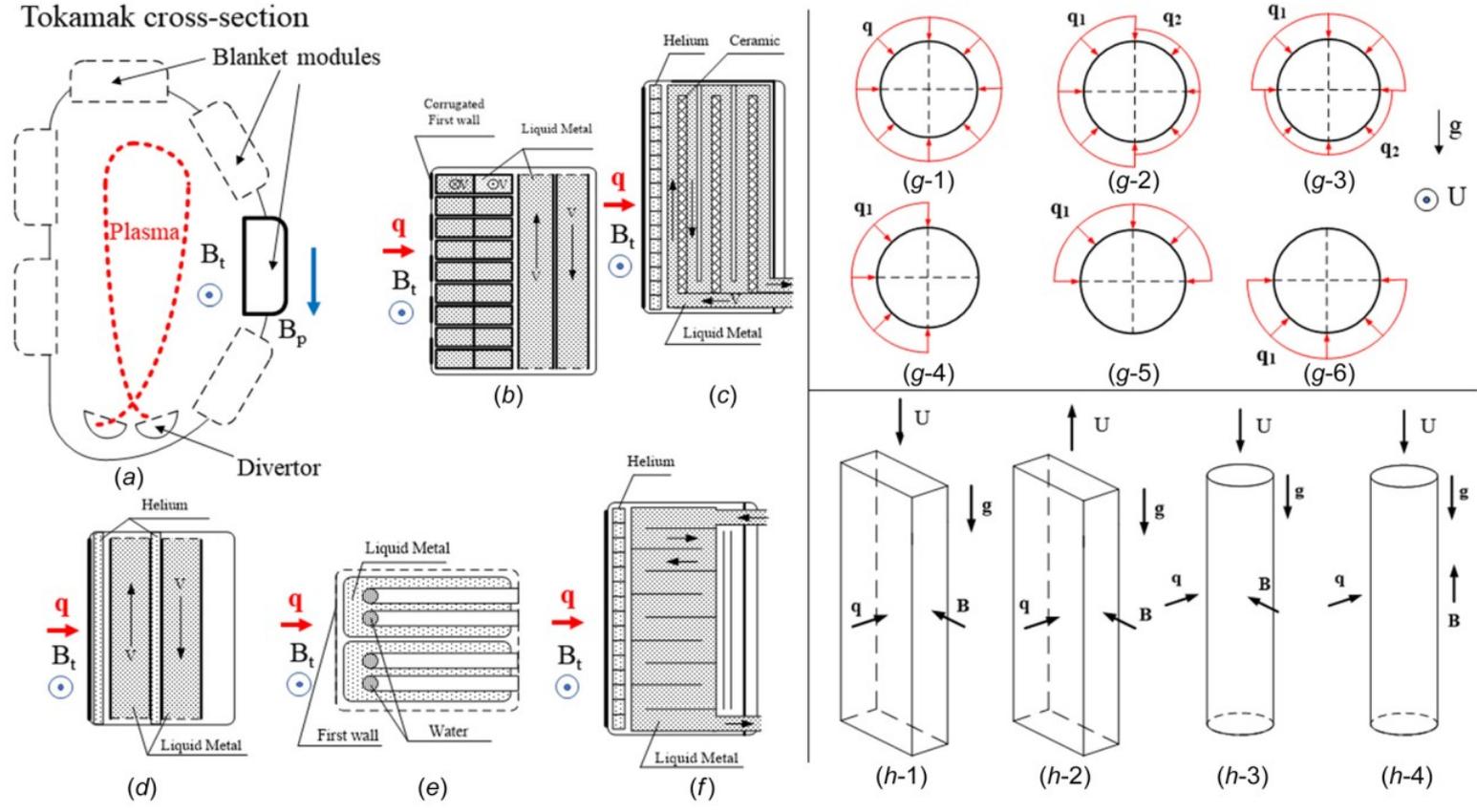


**WCLL**



**HCLL**

# Мотивация



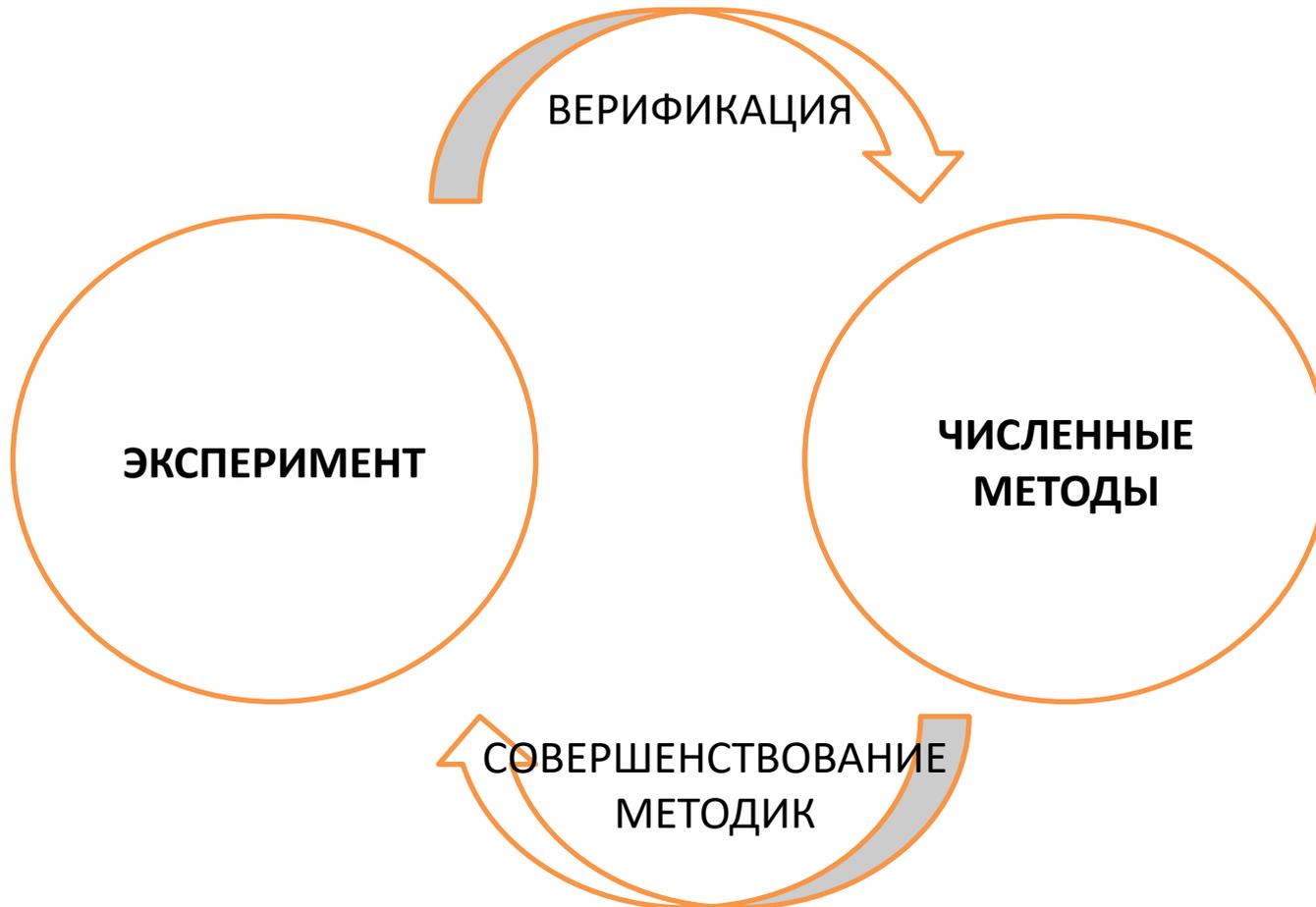
Канальные течения в бланкете:

- Каналы, трубы и сложная геометрия
- Подъемные и опускные течения
- Вертикальные, наклонные и горизонтальные
- 3D магнитное поле
- Неоднородный нагрев ( $q_w$ ,  $q_v$ )

Течения жидких металлов с сильным влиянием магнитного поля и термогравитационной конвекции

Zikanov, O., Belyaev, I.A., Listratov, Y., Frick, P., Razuvanov, N., & Sviridov, V. (2021). Mixed Convection in Pipe and Duct Flows With Strong Magnetic Fields. *Applied Mechanics Reviews*, 72.

# Методы



# Эксперимент

## Экспериментальный МГД-комплекс МЭИ-ОИВТ РАН



**PK-1. каф. ИТФ МЭИ**



**PK-2.  
ОИВТ РАН**



**PK-3.  
ОИВТ РАН (лаб №5)**

Критерий	PK-1 (МЭИ)	PK-2 (ОИВТ РАН)	PK-3 (ОИВТ РАН)
$Re = \frac{w_0 d}{\nu}$	$5 \cdot 10^3 \div 7 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^3 \div 1,2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^3 \div 3 \cdot 10^4$
$Ha = Bd \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}}$	продольное МП $0 \div 500$	поперечное МП $0 \div 500$	поперечное МП $0 \div 1300$
$C_{\mu} = \frac{g \theta_0^4}{\lambda \nu}$	$0 \div 10^8$		

# Численное моделирование

## DNS (LES)

Модель:

- Несжимаемая сплошная среда с постоянными свойствами
- Квазистатическое МГД-приближение ( $Re_m \ll 1, Pr_m \ll 1$ )
- Диссипация не учитывается
- Приближение Буссинеска для силы плавучести



Система уравнений

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) + \frac{1}{\rho} \sum F_i$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_k \frac{\partial T}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \chi \frac{\partial T}{\partial x_k} \right)$$

ЭМ сила:  $F_i^L = \varepsilon_{ikl} j_k B_l$

Сила плавучести:  $F_i^g = \rho g_i \beta (T - T_0)$

Закон Ома  $j_i = \sigma \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} + \varepsilon_{ikl} u_k B_l \right)$   $\frac{\partial j_i}{\partial x_i} = 0 \Rightarrow \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\varepsilon_{ikl} u_k B_l)$

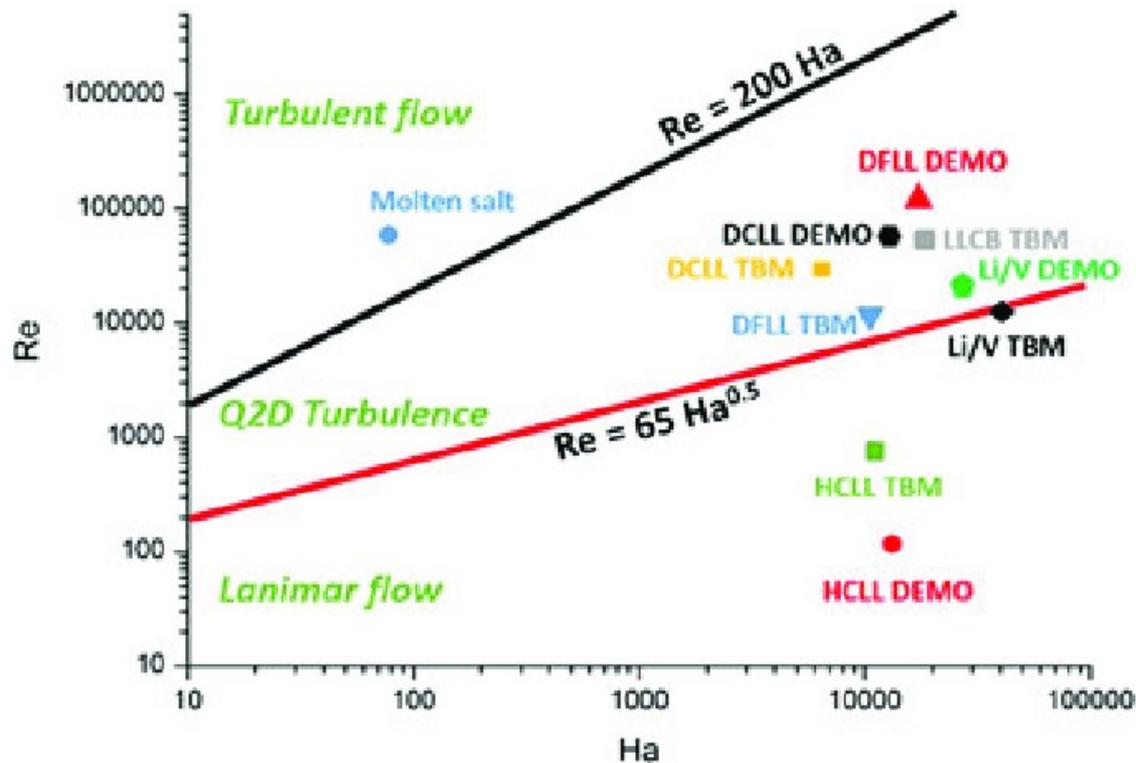
Безразмерные критерии

$$Re \equiv \frac{Ud}{\nu} \quad Pe \equiv \frac{Ud}{\chi} \quad Gr \equiv \frac{g\beta qd^4}{\nu^2 \kappa} \quad Ha \equiv Bd \left( \frac{\sigma}{\rho \nu} \right)^{1/2} \quad N \equiv \frac{Ha^2}{Re} = \frac{\sigma B^2 d}{\rho U}$$

# Особенности задач

## Влияние магнитного поля на изотермическое течение

- Подавление (вырождение) турбулентности
- Очень «тонкие» МГД-пограничные слои
- Квазидвумеризация (Q2D) течения с формированием однородных структур вдоль поля за пределами погранслоя

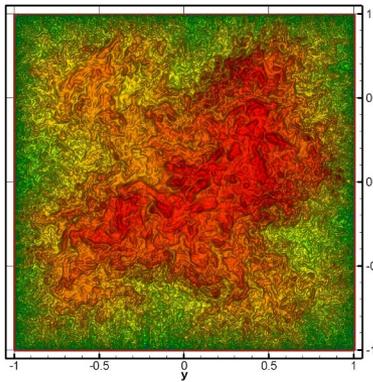


# Особенности задач

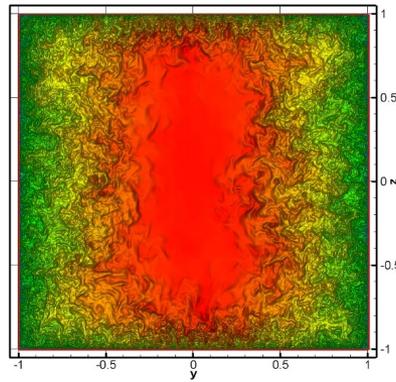
## Подавление (вырождение) турбулентности

Турбулентное течение в канале

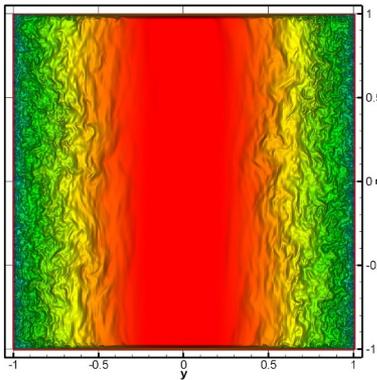
Ha=0



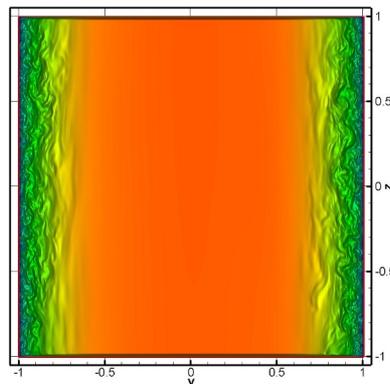
Ha=100



Ha=200



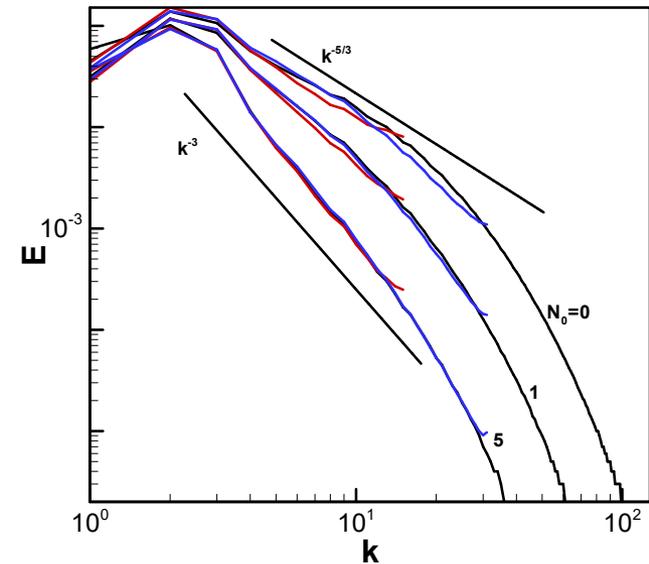
Ha=300



B



DNS, test LES, LES1



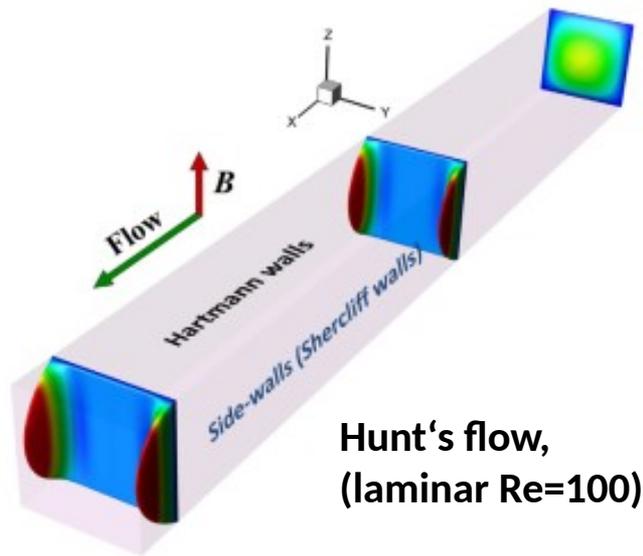
Vorobei, Zikanov, Theor. Comp. Fluid.  
Dyn. 2008

**Higher  $N$  means:**

- **Reduced energy at small length scales**
- **Reduced viscous dissipation**<sup>9</sup>

# Особенности задач

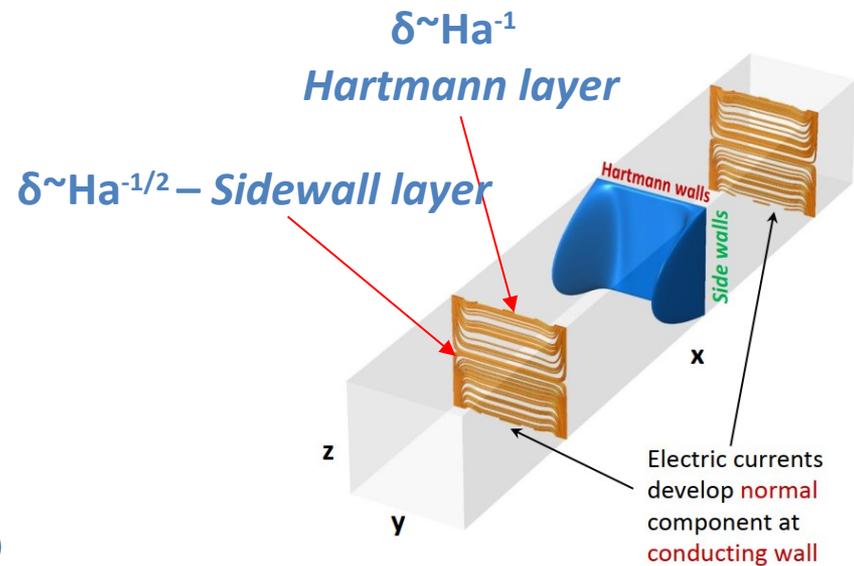
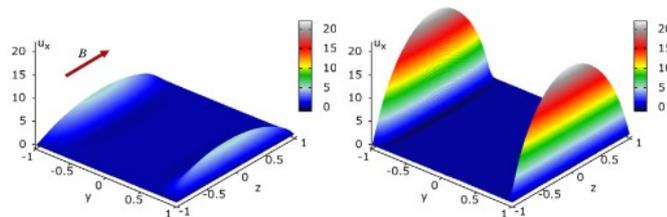
## Очень «тонкие» МГД-пограничные слои



Hunt's flow,  
(laminar  $Re=100$ )

$Ha=100$

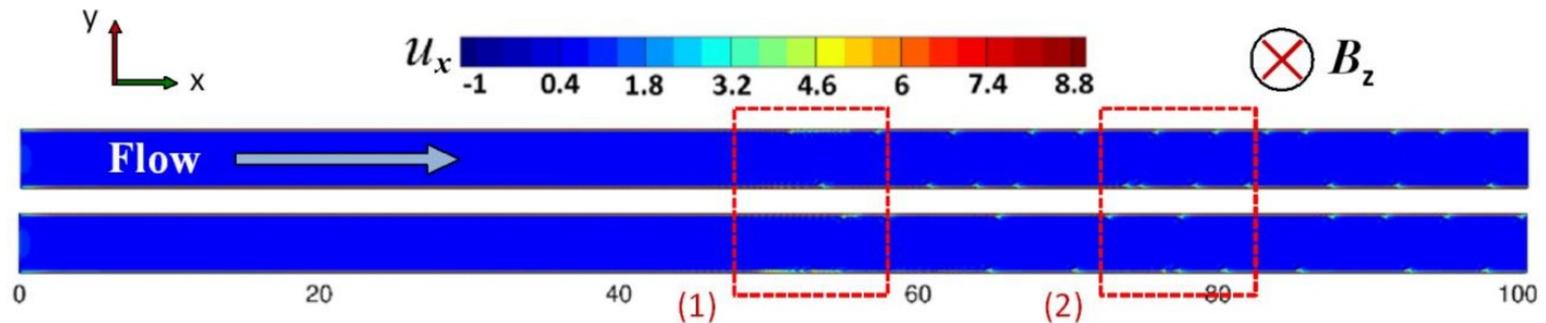
$Ha=1000$



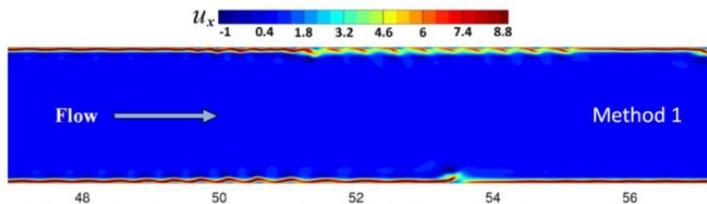
# Особенности задач

## Квазидвумеризация (Q2D) течения с формированием однородных структур вдоль поля за пределами погранслоя

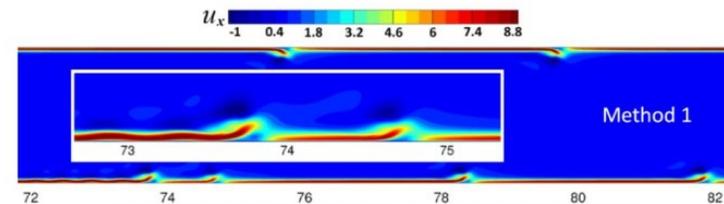
MHD flows in **ducts** with conducting walls – typical configuration for liquid-metal **fusion blankets**  
Spatial evolution of **Hunt's flow** at  $Re = 2000$ ,  $Ha = 2000$  and  $C_w = 0.03$



Region (1): Onset of sidewall **jet instabilities**



Region (2): Fully developed **jet detachments**

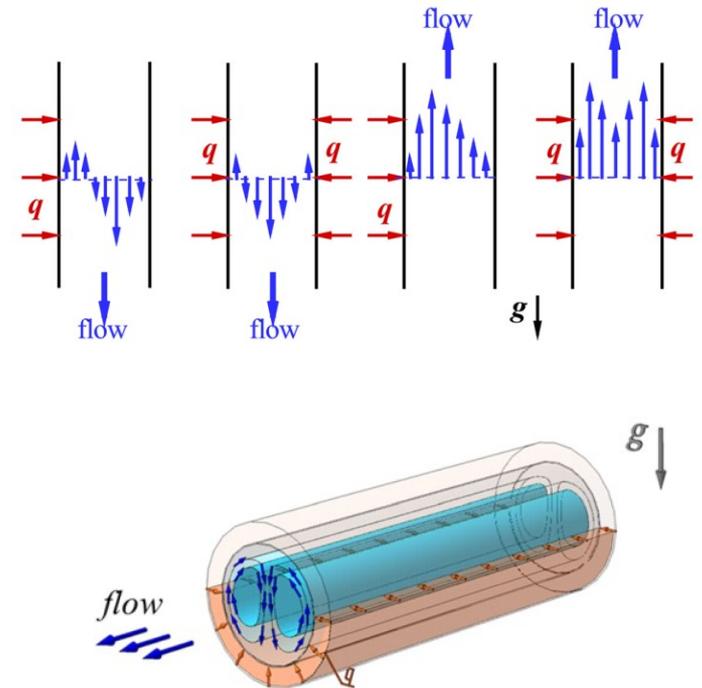
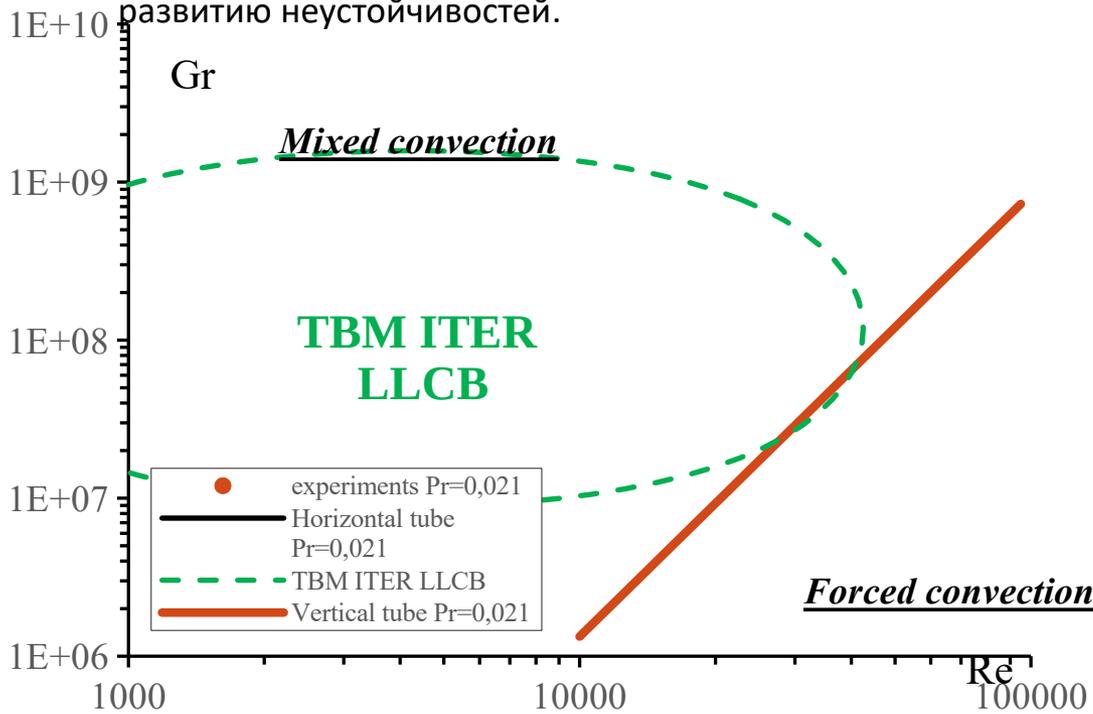


Krasnov et.al. J. Comp. Phys. (2023)

# Особенности задач

## Влияние термогравитации

- Режимы смешанной конвекции
- Протяженные участки (~100 калибров), где происходит трансформация поля скорости – нет установившихся течений.
- Формирование струй вблизи нагретой стенки, точки перегиба на профиле скорости, что приводит к развитию неустойчивостей.



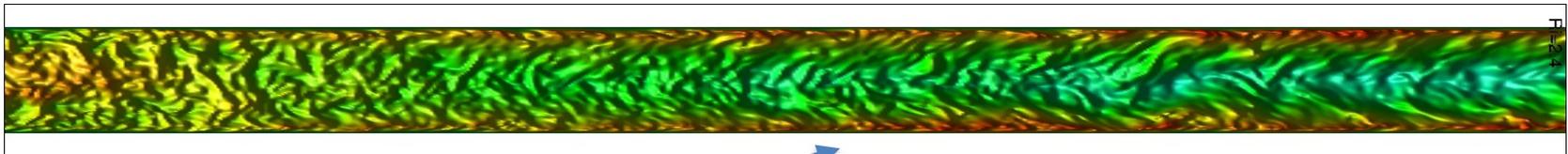
# Особенности задач

## Влияние термогравитации

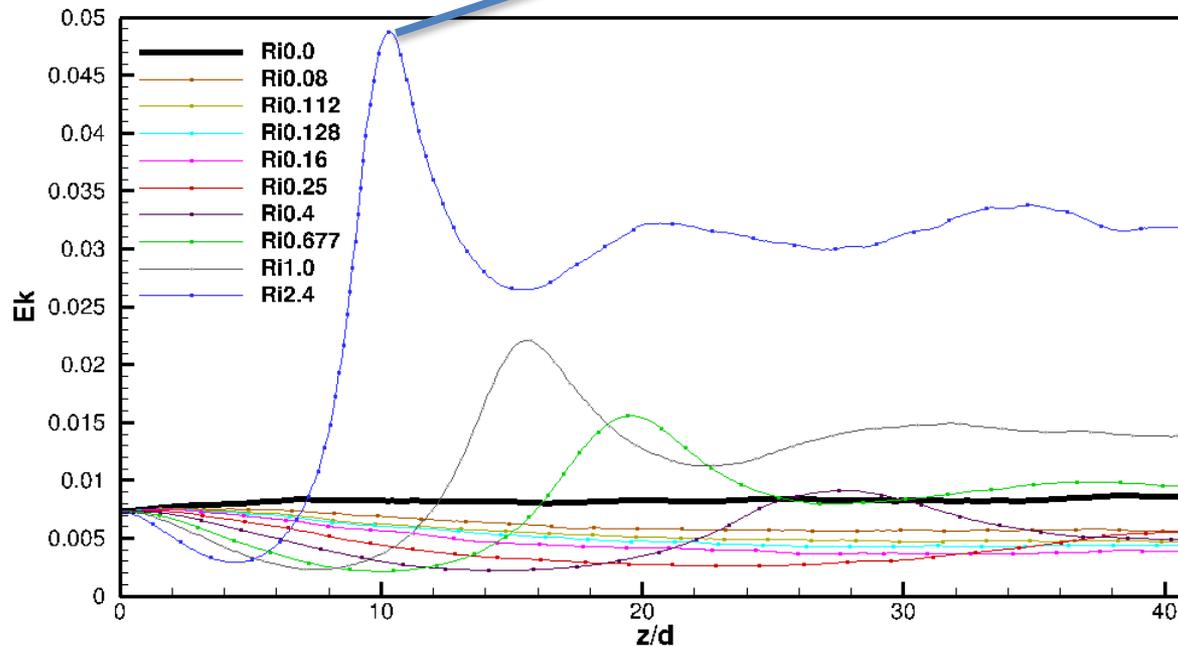
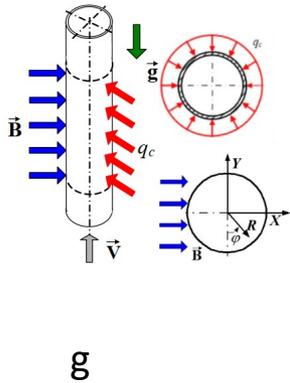
flow →

streamwise velocity surface

← g



Re=10000, Ri=2,4



$$= \int \frac{\overline{u'^2}}{2}$$

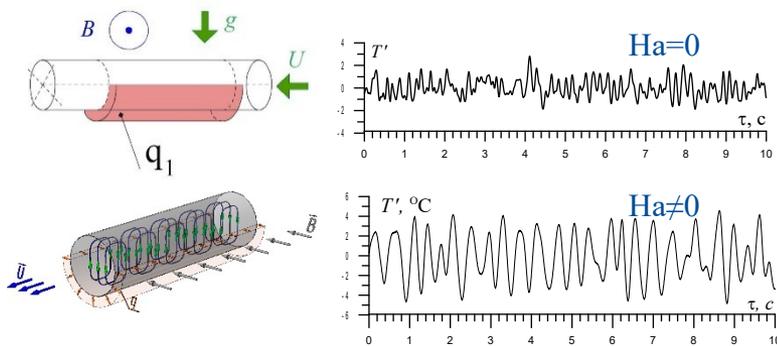
$$= \sum \frac{\overline{u'^2}}{2}$$

Kinetic energy of fluctuations

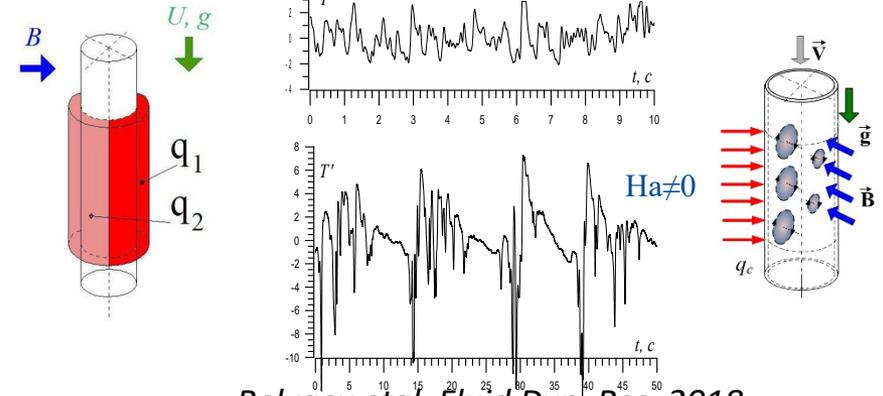
# Магнетоконвекция

$Gr \gg 1$  и  $Ha \gg 1$  ( $N > 1$ )

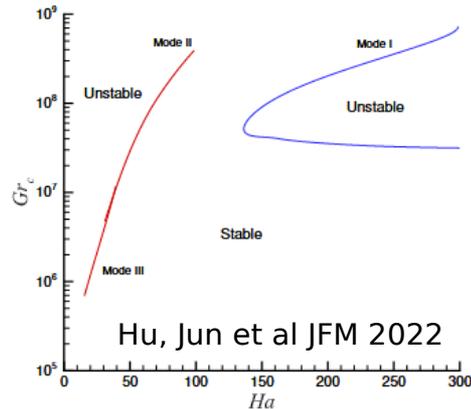
- Конвективные структуры с низкими градиентами вдоль магнитного поля не подавляются
- Магнетоконвективные флуктуации температуры большой амплитуды: результат квазипериодических процессов в движущей среде
- Анализ процессов возможен только в 3D нестационарной постановке с помощью вихреразрешающих методов типа DNS или LES



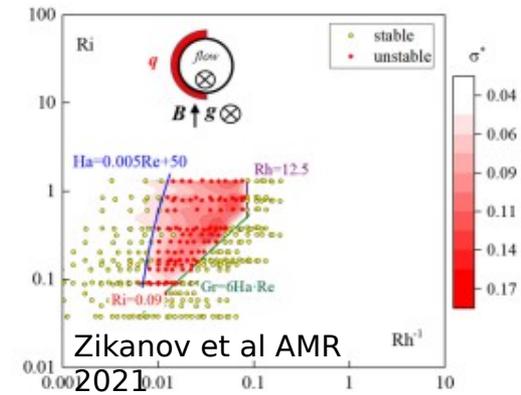
Genin et al PAMIR 2011



Belyaev et al Fluid Dyn. Res. 2018



Hu, Jun et al JFM 2022



Zikanov et al AMR 2021

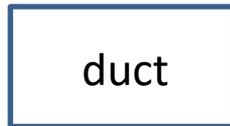
# Коды

1

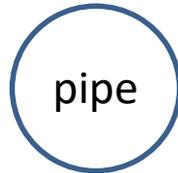
DNS

Солвер для несжимаемых течений с обогревом и магнитным полем

TU Ilmenau,  
UMICH Dearborn



duct



pipe

TU Ilmenau,  
UMICH Dearborn,  
МЭИ,  
ОИВТ РАН

- Adams-Bashforth/Backward-Differentiation метод 2-го порядка
- Консервативная конечно-разностная схема 2го порядка
- Структурные совмещенные сетки
- Прямой решатель эллиптических уравнений (FT+2D cyclic reduction fishpack)
- MPI + Open MP гибридная параллелизация

2

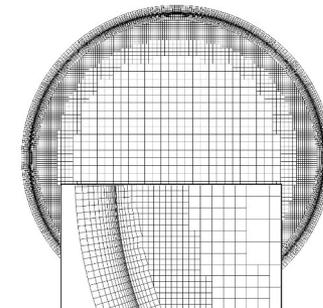
LES

ANES – исследовательская система для CFD моделирования

МЭИ



- Произвольная геометрия
- Дискретизация на основе метода контрольного объема
- Неструктурные сетки с локальным дроблением
- Multi-domain декомпозиция
- Итерационные солверы (HYPRE и др.)
- MPI параллелизация



# Standard projection method

1

DNS

$$\frac{3\theta^{n+1} - 4\theta^n + \theta^{n-1}}{2\Delta t} = -\nabla \cdot (\theta^n \mathbf{v}^n) + \frac{1}{Pe} \nabla^2 \theta^{n+1} \quad \text{Pr} \ll 1$$

неявная (Эллиптический солвер)

$$\nabla \cdot (\nabla \phi^n) = \nabla^2 \phi^n = \nabla \cdot (\mathbf{v}^n \times \mathbf{e}) \quad \text{Эллиптический солвер}$$

$$\mathbf{j}^n = -\nabla \phi^n + (\mathbf{v}^n \times \mathbf{e})$$

$$\mathbf{F}^n = -(\mathbf{v}^n \cdot \nabla) \mathbf{v}^n + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{v}^n + \mathbf{F}_L^n + \mathbf{F}_b^n$$

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_b &= -GrRe^{-2} \mathbf{e}_g \theta, \\ \mathbf{F}_L &= Ha^2 Re^{-1} \mathbf{j} \times \mathbf{e}_b. \end{aligned}$$

$$\frac{3\mathbf{v}^* - 4\mathbf{v}^n + \mathbf{v}^{n-1}}{2\Delta t} = 2\mathbf{F}^n - \mathbf{F}^{n-1} \quad \text{явная(+неявная для вязкого члена)}$$

$$\nabla \cdot (\nabla p^{n+1}) = \nabla^2 p^{n+1} = \frac{3}{2\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{v}^* \quad \text{Эллиптический солвер}$$

$$\mathbf{v}^{n+1} = \mathbf{v}^* - \frac{2}{3} \Delta t \nabla p^{n+1}$$

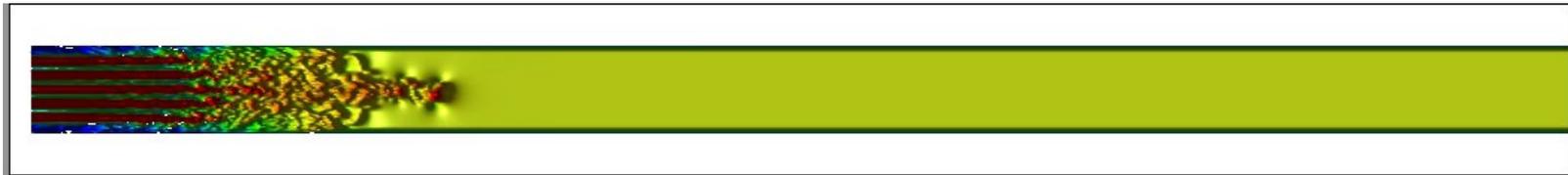
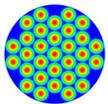
Всего: 2/3/6 решателей на каждом шаге по времени

# Граничные условия

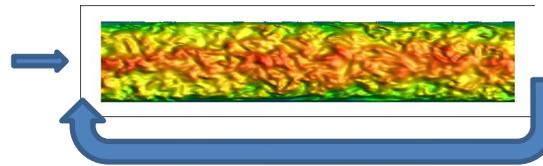
1 DNS

а) Входная турбулентность  $L \approx 25-30d$ :

«Хoneyкомб» на входе



б) Входная турбулентность  $L \approx 5-7d$ :



«Стенка»

1. (изолированная стенка)
2. (идеально проводящая стенка)

3. Более реалистичное условие – «тонкая» стенка (thin wall) конечной проводимости

$$\nabla \cdot (\nabla \phi^n) = \nabla^2 \phi^n = \nabla \cdot (\mathbf{v}^n \times \mathbf{e})$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} \Big|_{wall} = C_w \nabla_{\perp}^2 \phi \Big|_{wall} = \frac{\sigma}{\sigma} \quad \text{Относительная проводимость стенки}$$

2D тангенциальный L-оператор

# Решатель

1 DNS

3D elliptic problem

~~FFT 3D~~

FT T-P-T

FT + 2D cyclic reduction

General T-P-T

Равномерная сетка по всем направлениям

Равномерная сетка в двух направлениях

Равномерная сетка в одном из направлений

Произвольная сетка

↓  
FFTPACK  
Fourier or Cosine Transform (2D)

↓  
1D Thomas algorithm

↓  
FFTPACK  
Fourier or Cosine transform

↓  
2D cyclic reduction  
SEPELI (single-thread) (fishpack)

↓  
Eigenvalues  
Decomposition (x,y)

↓  
1D Thomas algorithm for z

↓  
Inverse transform

«тонкая» стенка

дополнительные итерации для стенки >> замедление решения!

прямое решение!

# Tensor-product-Thomas (T-P-T)

1

DNS

$$\frac{\delta^2 \phi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \phi}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \phi}{\delta z^2} = r \quad \text{Дискретное 3D уравнение Пуассона}$$

Tridiag. matrix  $T_x$   
for x-uniform grid

$$\frac{\delta^2}{\delta x^2} = \frac{1}{h^2} \begin{bmatrix} -2 & \dots & \dots \\ 1 & -2 & 1 \\ \dots & \dots & -2 \end{bmatrix} \quad \frac{\delta^2}{\delta y^2} = \frac{1}{h^2} \begin{bmatrix} -2 & \dots & \dots \\ 1 & -2 & 1 \\ \dots & \dots & -2 \end{bmatrix} \quad \frac{\delta^2}{\delta z^2} = \frac{1}{h^2} \begin{bmatrix} -2 & \dots & \dots \\ 1 & -2 & 1 \\ \dots & \dots & -2 \end{bmatrix}$$

$$T_x \rightarrow A \text{ (direct), } \lambda_x \text{ and } A^{-1} \text{ (inverse)}$$

$$T_y \rightarrow B \text{ (direct), } \lambda_y \text{ and } B^{-1} \text{ (inverse)}$$

$$\left( \lambda_{x,i} + \lambda_{y,j} + \frac{\delta^2}{\delta z^2} \right) \hat{\phi}_{i,j}(z) = \hat{r}_{i,j}(z) \quad i = 1, \dots, N_x, \quad j = 1, \dots, N_y$$

$$[a_k, b_k, c_k] = \left[ \frac{2}{h_{k-1}(h_k + h_{k-1})}, -\frac{2}{h_{k-1}h_k} + \lambda_x + \lambda_y, \frac{2}{h_k(h_k + h_{k-1})} \right] \quad O(N_x N_y N_z) \text{ - Thomas alg.}$$

$$O(N_z N_x^2 N_y^2) + O(N_z(N_y N_x^2 + N_x N_y^2)) \text{ - direct } r \text{ + inverse } \phi$$

Возможно внедрение тонкостенных гу в расширение собственных мод!

$$[a_1, b_1, c_1] = \left[ \times, -\frac{2}{h_1^2} + \left( 1 - \frac{2C_w}{h_1} \right) (\lambda_{x,i} + \lambda_{y,j}), \frac{2}{h_1^2} \right]$$

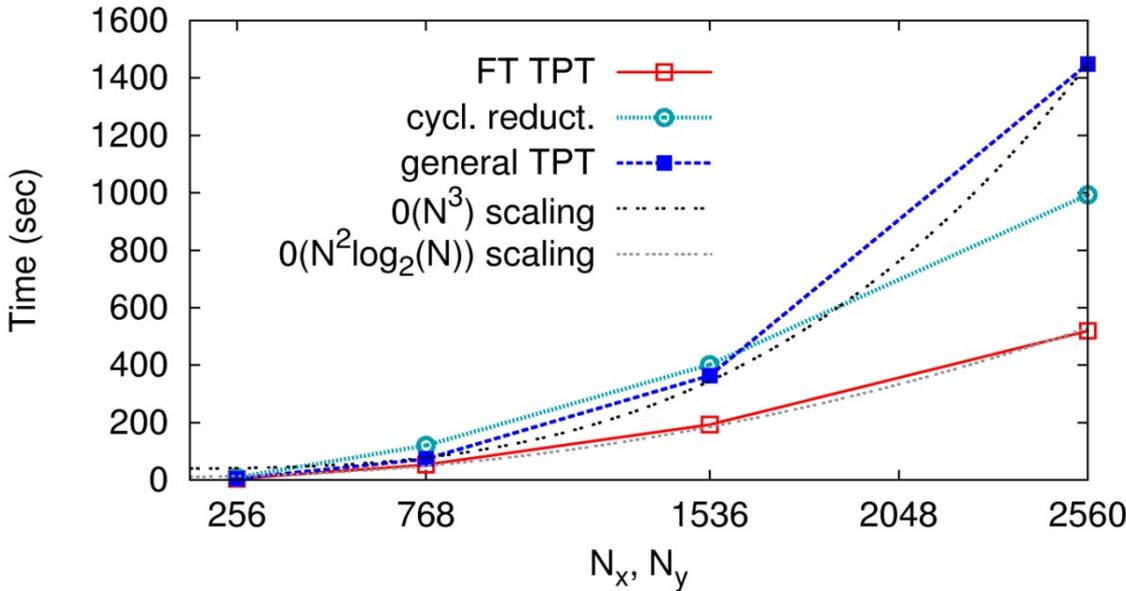
# Тестирование

1

DNS

SuperMUC-NG

Конвекция Рэля-Бенара в прямоугольном ящике: моделирование на сетках с различным  $N_x = N_y = N$  и  $N_z = 256$



Время для расчета 100 шагов на 256 ядрах как функция  $N$   
 Перемножение матриц в методе **general TPT** выполнено в **MKL multi-thread routines**

General TPT = Tensor-Product-Thomas solver, i.e. MatMul in  $x,y$  and Thomas method in  $z$   
 Cycl. Reduct. = Cosine-FT in  $x$  and 2D Cyclic reduction method (Fishpack) in  $y,z$   
 FT TPT = Fast Transform Tensor-Product-Thomas, i.e. Cosine-FT in  $x,y$  and Thomas method in  $z$



- Прямой решатель – без итераций, без проблем со сходимостью
- Произвольная кластеризация сетки во всех 3 направлениях
- Подпрограммы MKL matmul масштабируются почти линейно в зависимости от количества потоков
- Каждой стенке можно назначить свой собственный коэффициент проводимости  $C_w$
- Может применяться для конечной теплопроводности



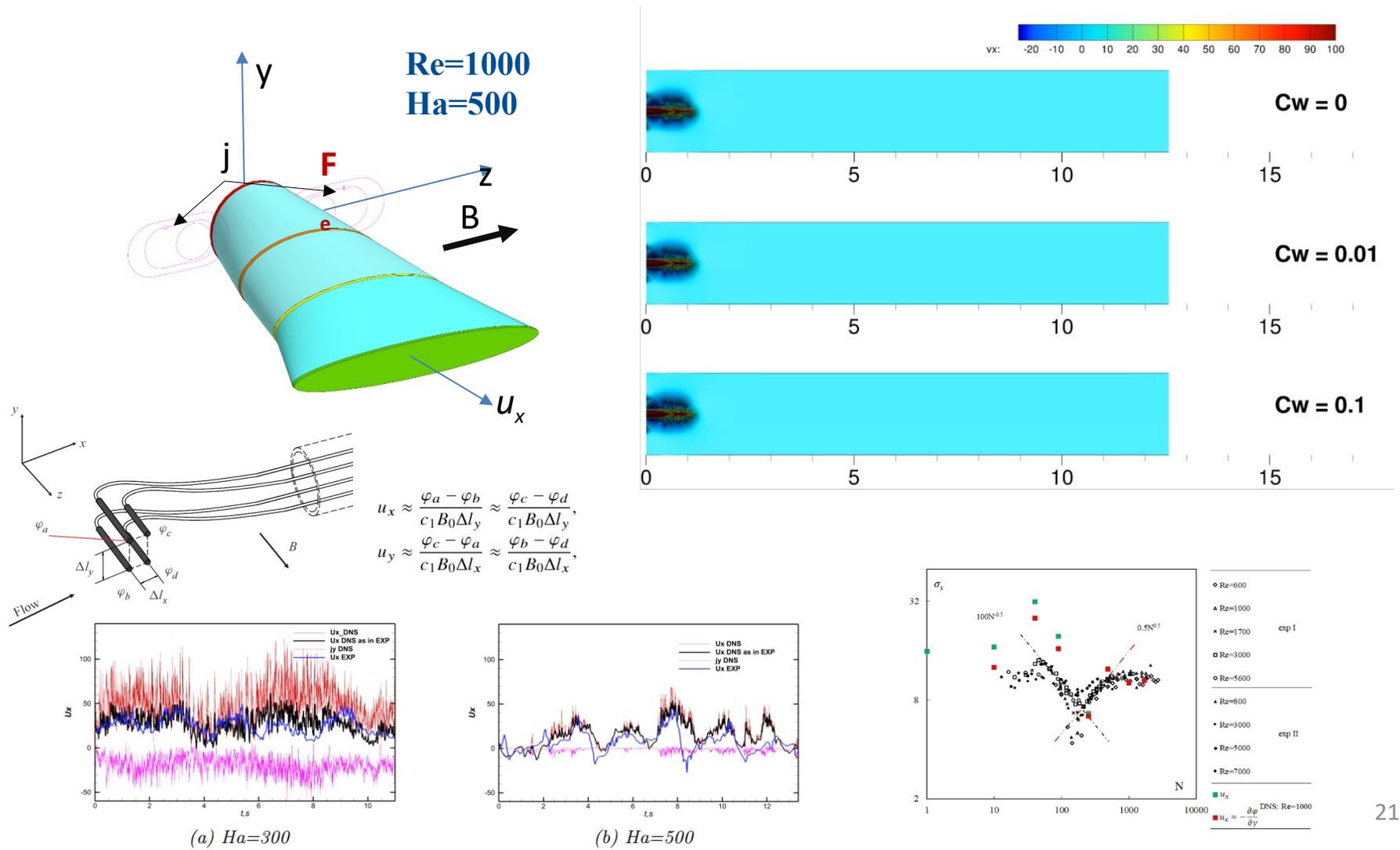
- Матрицы преобразования увеличиваются в размере как  $n^2$  – потенциальная проблема при высоком разрешении
- Умножение матриц масштабируется как  $O(n^3)$ , по сравнению с  $O(n^2 \log_2(n))$  для FFT/CosFT/SinFT



Only TPT allows for arbitrary grid-clustering in  $x,y,z$

# Затопленные струи

## Трансформация в магнитном поле и динамика течения ( $N > 1$ )



# ANES

2

Основой математических моделей кода ANES является система уравнений переноса для сплошной среды

LES

для фазы теплоносителя (G-фазы)

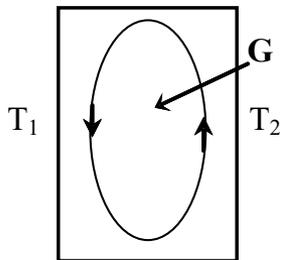
$$\frac{\partial(\varphi\rho_g\Phi)}{\partial\tau} + \text{div}(\varphi\rho_g\mathbf{U}_g\Phi - \varphi\Gamma_\Phi\nabla\Phi) = S_\Phi$$

для твердой неподвижной фазы (S-фазы)

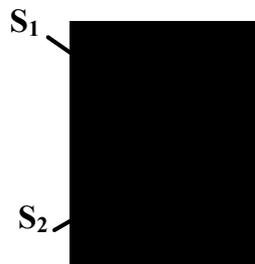
$$\frac{\partial[(1-\varphi)\rho_s\Phi]}{\partial\tau} = \text{div}[(1-\varphi)\Gamma_\Phi\nabla\Phi] + S_\Phi$$

- LES модели ANES.....
- Модель Смагоринского-Лилли .....
  - Пристеночное демпфирование .....
  - Модель WALE .....
  - Модель CSM Кобаяши .....

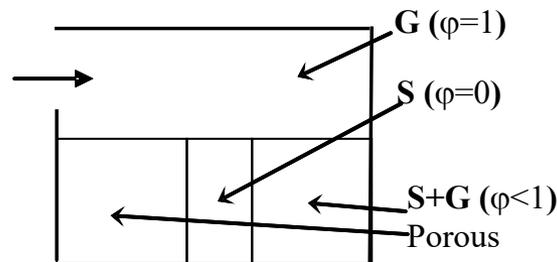
солвер HYPRE (multi-grid BoomerAMG)



Гидродинамика



Теплопроводность



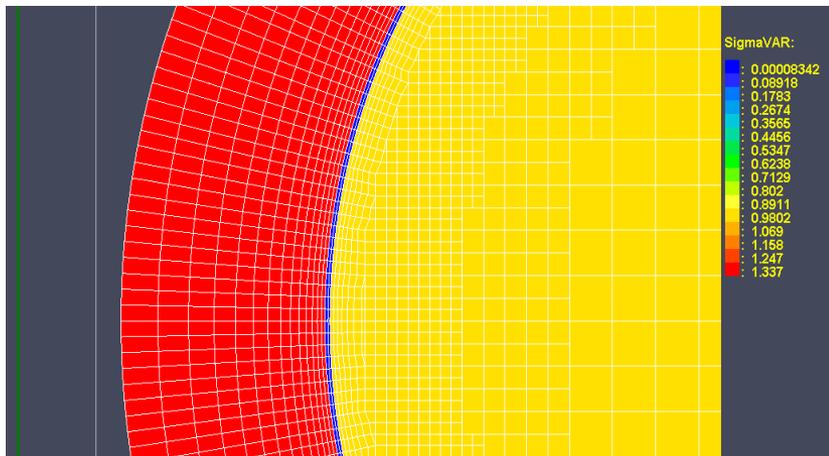
Сопряженный т/о

# ANES: мко

2

LES

Моделирование контактного сопротивления на границе «жидкость-стенка» в виде тонкой пленки загрязнений



Влияние физических свойств стенки и контактного электрического сопротивления на внутренней поверхности трубы

Повышение эффективности параллельных расчетов LES за счет модификации численных алгоритмов:

- численные схемы 2-го порядка по пространству и времени и методы борьбы с их расходимостью (отложенная коррекция),
- ускорение алгоритма SIMPLE - алгоритм PISO + SIMPLE -> PIMPLE,
- консервативная схема для расчета силы Лоренца
- минимизация MPI обменов - перенумерация ячеек (алгоритм MeTiS)

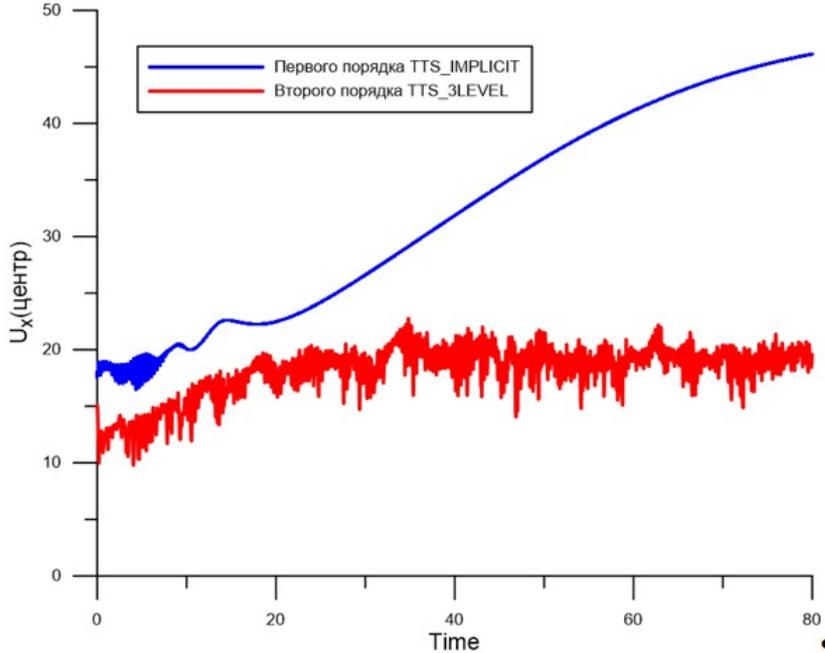
# ANES: схемы 2го порядка

2

LES

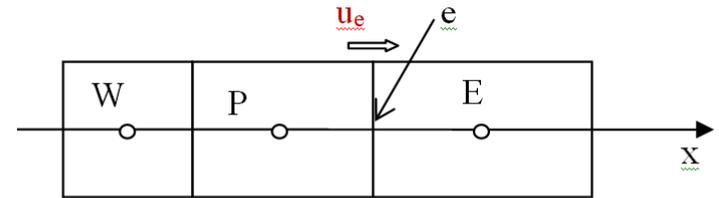
$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial \tau}\right)_P = \frac{\Phi_P - \Phi_P^0}{\Delta \tau} \quad - \text{первого порядка (TTS\_IMPLICIT)}$$

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial \tau}\right)_P = \frac{1}{\Delta \tau} \left\{ \frac{2+\xi}{1+\xi} \Phi_P - \frac{1+\xi}{\xi} \Phi_P^0 + \frac{1}{\xi(1+\xi)} \Phi_P^{00} \right\}, \quad \xi = \frac{\Delta \tau_0}{\Delta \tau} \quad - \text{второго (TTS\_3LEVEL)}$$



TVD схемы II порядка:

$$\Phi_e = \Phi_P + \frac{\psi(r_e)}{2} (\Phi_E - \Phi_P), \quad r_e = \frac{\Phi_P - \Phi_W}{\Phi_E - \Phi_P}$$



Реализованные схемы:  
QUICK, SuperBEE, MisCL, Gamma,  
TrueCD, Gamma, BoundCD, MAC

Скорость в центре плоского канала на «грубой» сетке 32x32x32 (LES)

# ANES: схемы 2го порядка

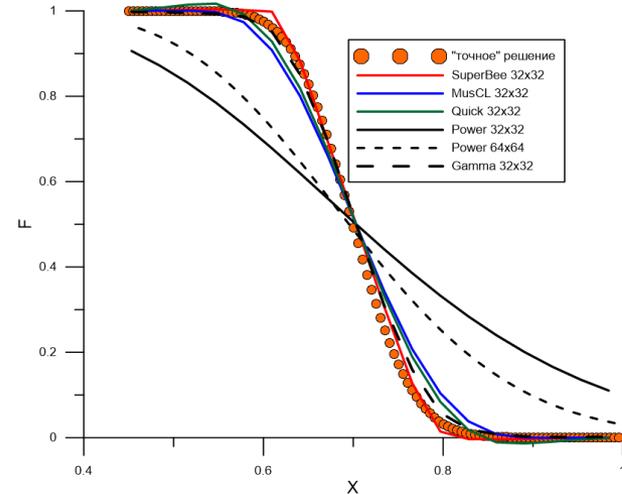
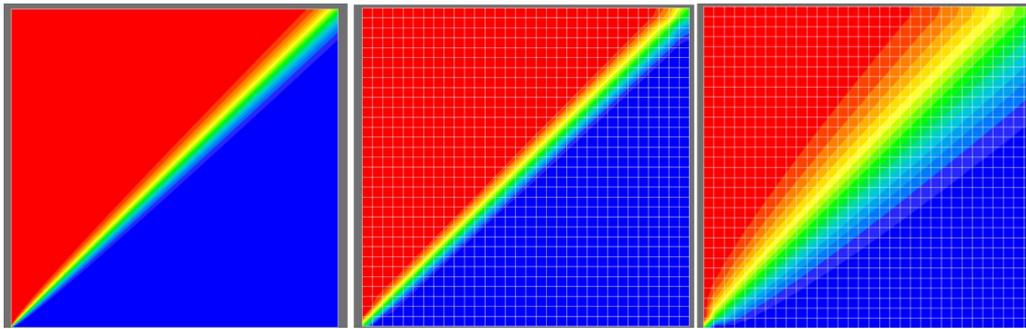
2

LES

1) Задача о распространении примеси в равномерном потоке под углом 45°

$$\operatorname{div}(\mathbf{u} \cdot \mathbf{L}_s - \frac{1}{\text{Pe}} \nabla \mathbf{L}_s) = 0, \quad \text{Pe} = 1000, \quad \mathbf{u} = (1, 1, 0)$$

Сетка NX\*NY = 32\*32

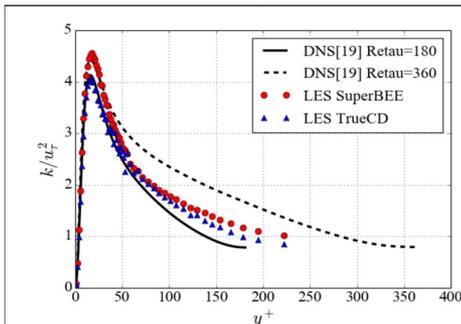


Точное решение

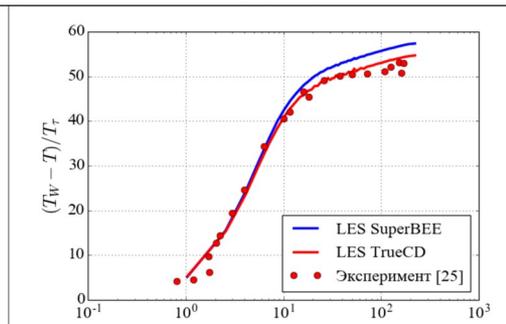
SuperBee

Степенная (Патанкар)

2) Стабилизированное турбулентное течение в трубе



(a)



(b)

Распределение безразмерной турбулентной энергии и безразмерной температуры для двух численных схем II порядка (TrueCD и SuperBEE)  $\text{Re} = 7000$ :

[19] – DNS El. Khoury, 2019; [25] – Эксперимент Л. Сукомел, 1984

# ANES: схемы 2го порядка

2

LES

$$a_P \Phi_P = \sum_{nb} a_{nb} \Phi_{nb} + b_P,$$

$$a_{nb} = \left[ \max(-m_{nb}, 0) - \frac{1}{2} |m_{nb}| \psi(r_k) + d_{nb} \right] \Delta A_{nb}$$

При определенных условиях коэффициент связи может стать отрицательным - расходимость итерационного процесса! Для подавления расходимости используется **алгоритм отложенной коррекции**, который в коде реализован через механизм поправки:

$$\Phi_P = \Phi_P^* + \Phi'_P$$

$$a_P \Phi'_P = \sum_{nb} a_{nb} \Phi'_{nb} + r_P^*, \quad r_P^* = \sum_{nb} a_{nb}^* \Phi_{nb}^* + b_P^* - a_P^* \Phi_P^*$$

Идея: «Синие» коэффициенты дискретного уравнения рассчитываются по точной схеме II порядка, «красные» – по устойчивой схеме «против потока».

# ANES: расчет объемных источников

2

LES

$$\mathbf{F}_m = \sigma B^2 \left\{ -\frac{1}{B} [\nabla \varphi \times \mathbf{e}_b] + (\mathbf{u} \cdot \mathbf{e}_b) \cdot \mathbf{e}_b - \mathbf{u} \right\},$$

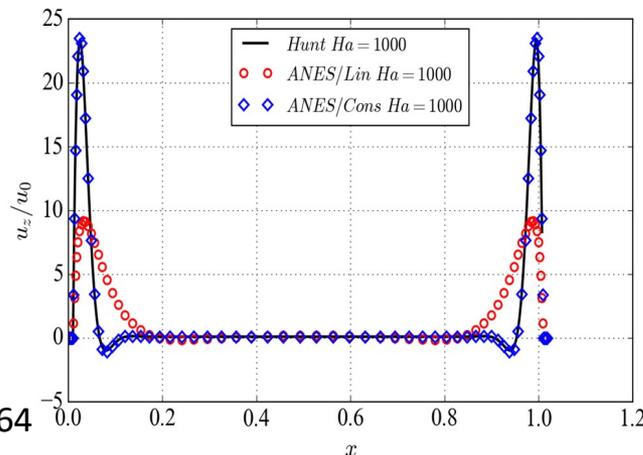
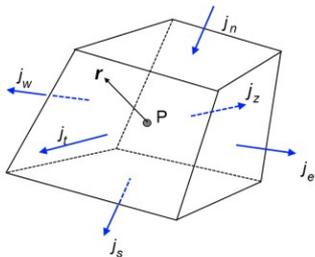
$$\mathbf{e}_b = \begin{cases} 0, & \text{если } B = 0 \\ \mathbf{B} / B, & \text{если } B \neq 0 \end{cases}$$

Такое представление дает быструю сходимость, однако при больших значениях индукции магнитного поля (числа Гартмана  $Ha > 200$ ) оно может приводить к заметным ошибкам в полях скорости [J.M. Ni et al., 2007].

Типичным примером является задача о моделировании течения в квадратном канале со стенками с разной электропроводностью и поперечным магнитным полем («струи» Ханта). При больших числах Гартмана ( $Ha > 1000$ ) для получения «точного» решения требуются сетки с числом КО по осям порядка 200-300. Более точной является консервативная схема, в которой сила Лоренца рассчитывается сразу через плотность тока. А плотность тока рассчитывается через ее значения на гранях КО:

$$\mathbf{j}_P \times \mathbf{B}_P$$

$$\mathbf{j}_P = \frac{1}{\Delta V_P} \sum_{i=1}^{nb} j_{mi} \mathbf{r}_i \Delta S_i, \quad j_{ni} = (\mathbf{j}_{mi} \cdot \mathbf{n}_i)$$



Профиль скорости струй Ханта для сетки 64x64

# ANES: минимизация MPI обменов

2

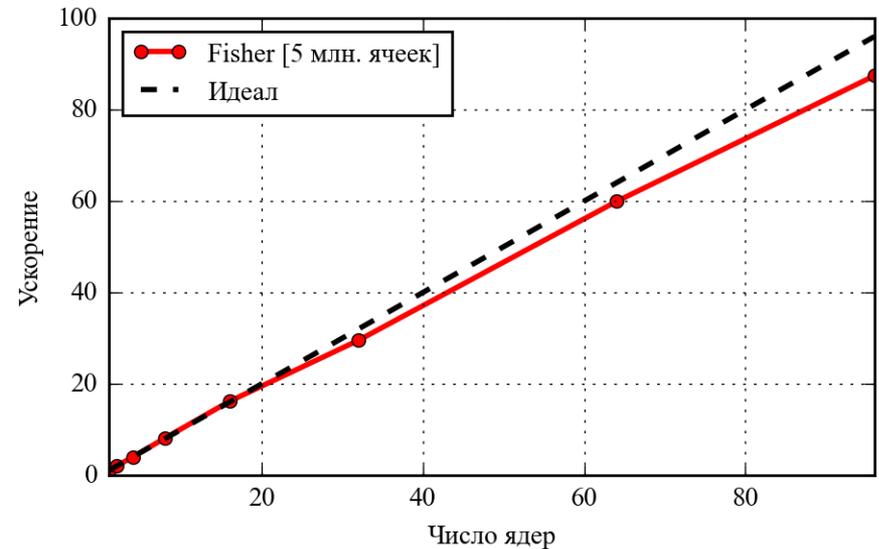
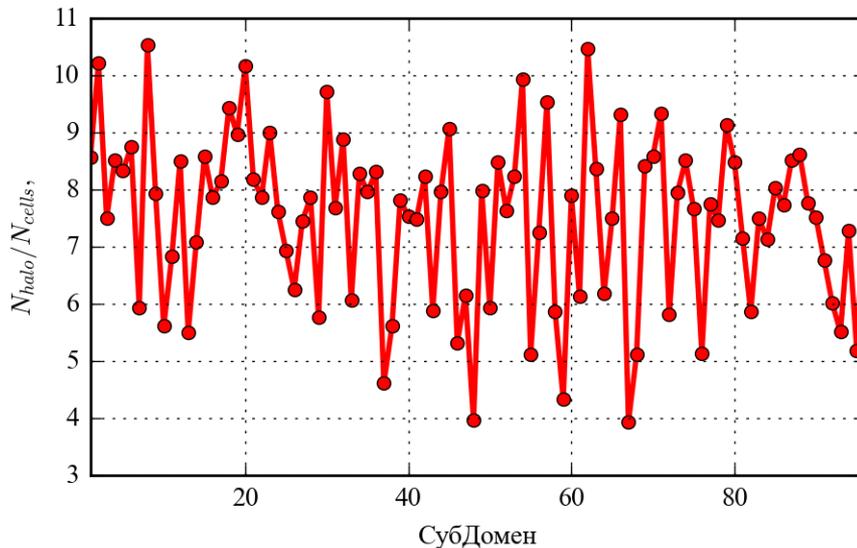
LES

Нумерация ячеек сетки и масштабируемость параллельных вычислений

При проведении параллельных расчетов с использованием MPI-подсистемы скорость расчета зависит от числа ячеек обмена (HALO-ячеек) между субдоменами, на которые разбивается расчетная область.

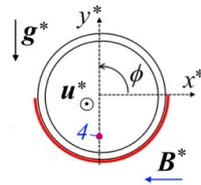
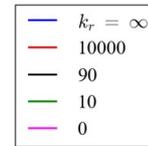
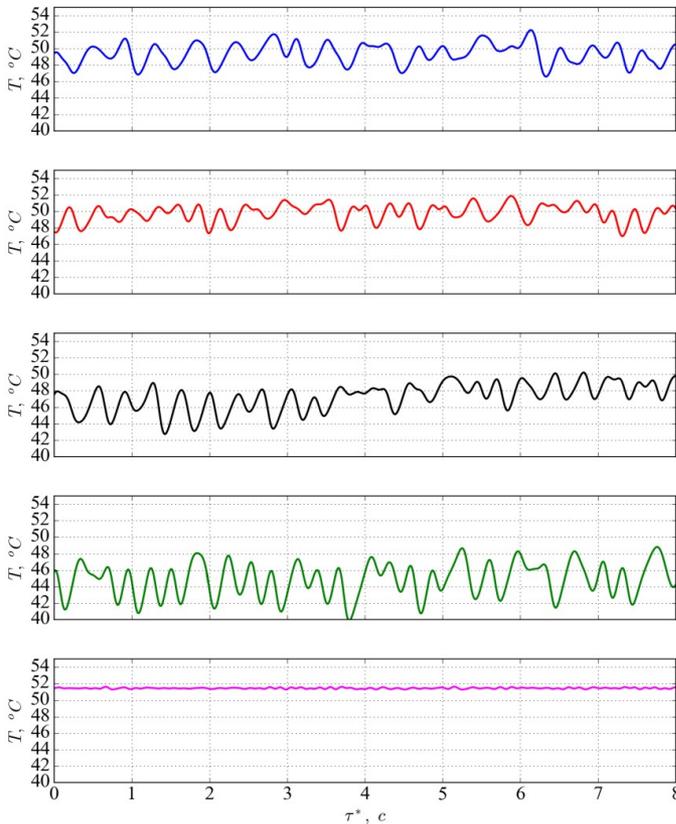
Для уменьшения числа HALO-ячеек используется перенумерация ячеек на основе модифицированного алгоритма пакета MeTiS.

Пример: Стабилизированное турбулентное течение в трубе

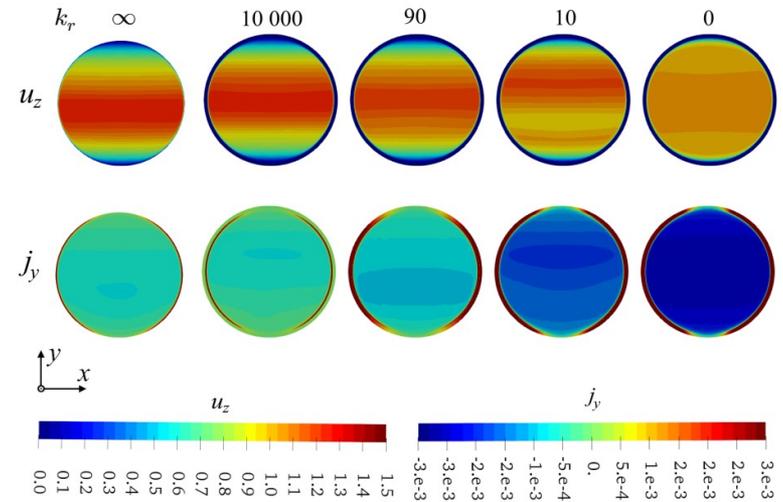


# Течение ртути в обогреваемой снизу горизонтальной трубе при поперечном МП

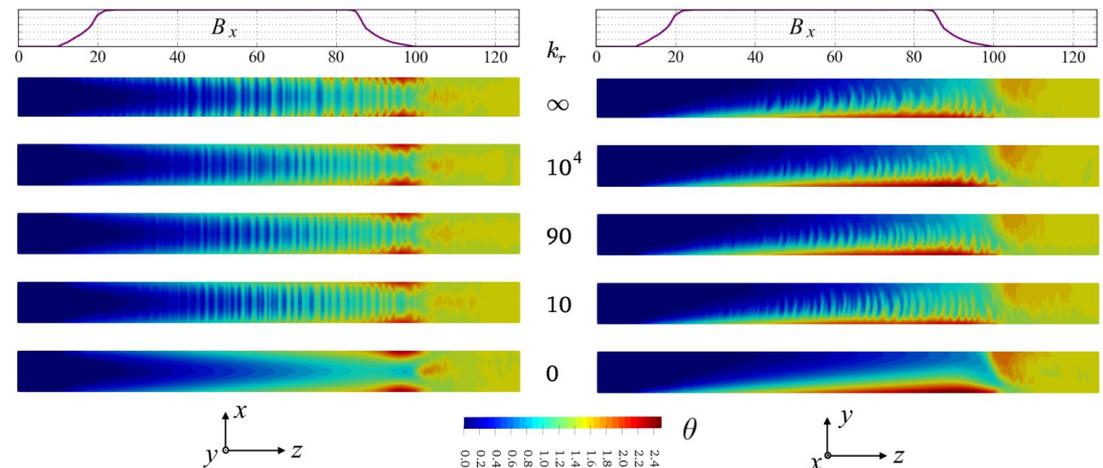
## Влияние контактного сопротивления



$$f_{m,z} = -j_y B_x$$



Поля мгновенной безразмерной аксиальной скорости и безразмерной плотности тока  $j_y$  для различных  $k_r$  в сечении  $z=84$

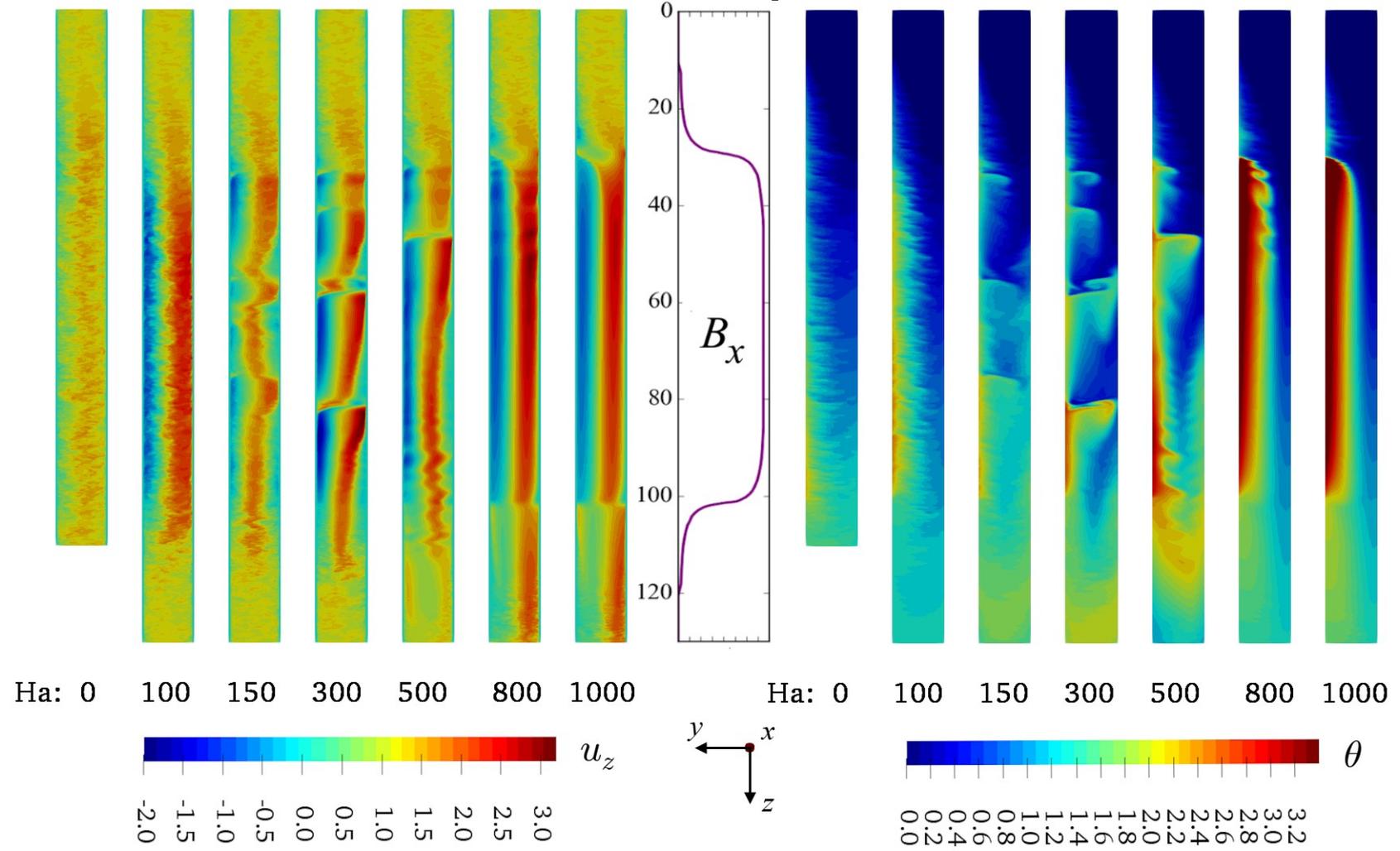
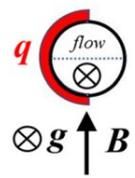


Осциллограммы температуры в точке 4 сечения  $z = 84$  для различных  $k_r$   
 $Re=1e4, Ha=300, Gr=4,4e7$

Поля мгновенной безразмерной температуры для различных  $k_r$

# Опускное течение ртути в неоднородно обогреваемой вертикальной трубе под воздействием МП

## Влияние магнитного поля на устойчивость течения



Поля безразмерных продольной компоненты вектора скорости и температуры в плоскости симметрии  $y-z$  для вариантов K1000W при  $Gr = 6 \cdot 10^7$  ( $Ri = 0,6$ )

# Выводы

- Проблемой численного моделирования течений в каналах под действием сильного магнитного поля является "жесткость" задачи, вызванная появлением дополнительных малых характерных масштабов: времени джоулевой диссипации и толщины пограничных и внутренних сдвиговых слоев, что приводит к необходимости использования вычислительных сеток с очень высокой пристеночной кластеризацией.
- Важную роль в рассматриваемых явлениях играют свойства стенок канала. Использование метода DNS со схемами высокого порядка точности для сопряженной со стенкой постановки задачи осложнено разрывами физических свойств моделируемых сред на межфазной поверхности «жидкость–стенка», а также на поверхностях контакта между слоями различных твердых сред, точное моделирование которых снижает эффективность вычислений.
- Одним из вариантов может быть применение в DNS приближения "тонкой стенки", но при этом возникает сложность моделирования контактного электрического сопротивления, которое в реальных устройствах может возникнуть, например, в результате выпадения загрязнений теплоносителя на теплообменной поверхности. Другой вариант - использование хорошо верифицированного LES метода, в котором моделирование реальных процессов на границе «жидкость–стенка» возможно без существенной потери эффективности вычислений.

# Благодарности

- D. Krasnov (Ilmenau, Germany)
- O. Zikanov (TU University of Michigan-Dearborn, USA)

**Спасибо за внимание!**