

СМЕШАННАЯ КОНВЕКЦИЯ ПРИ ПОДЪЕМНОМ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ОБОГРЕВАЕМОЙ КРУГЛОЙ ТРУБЕ В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Листратов Я.И. (НИУ МЭИ, Москва, Россия),
Лучинкин Н.А. (ОИВТ РАН, НИУ МЭИ, Москва, Россия),
Разуванов Н.Г. (ОИВТ РАН, НИУ МЭИ),
Беляев И.А. (ОИВТ РАН),
Свиридов Е.В. (НИУ МЭИ)

Актуальность

Применение жидких металлов и расплавов солей

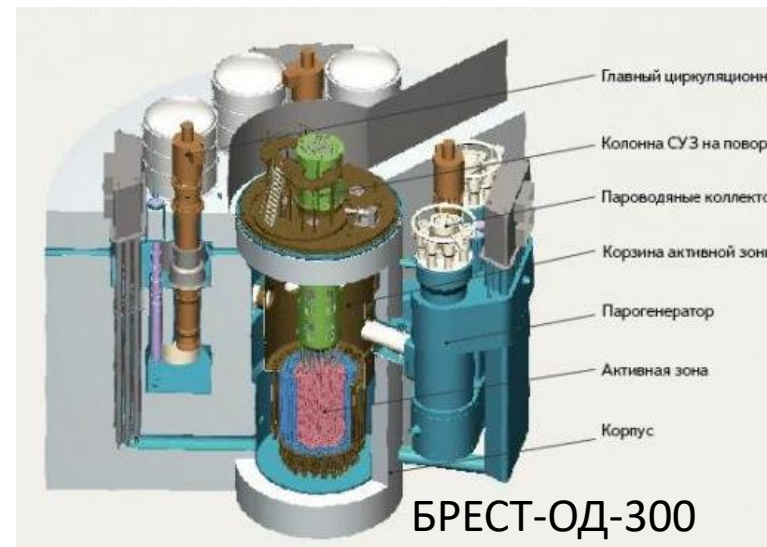
- реакторы («быстрые» - БРЕСТ, БН, ТЯР (токамак), ТИН)
- металлургия
- химические технологии
- выращивание кристаллов
- жидкометаллические аккумуляторы

В энергетических реакторах:

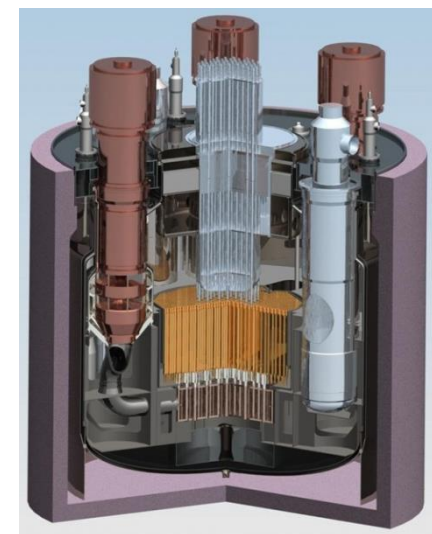
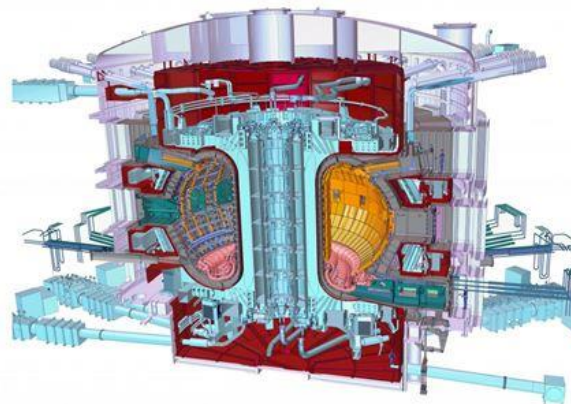
- Охлаждение (активная зона, бланкет, дивертор)
- «Защита» поверхностей
- «Наработка» трития

Конфигурации течений:

- Течения в каналах
- Циркуляция в большом объеме
- Течения в пленке
- Свободные струи
- Капельные завесы



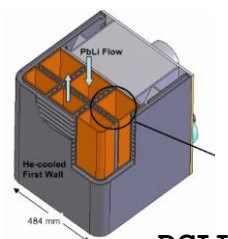
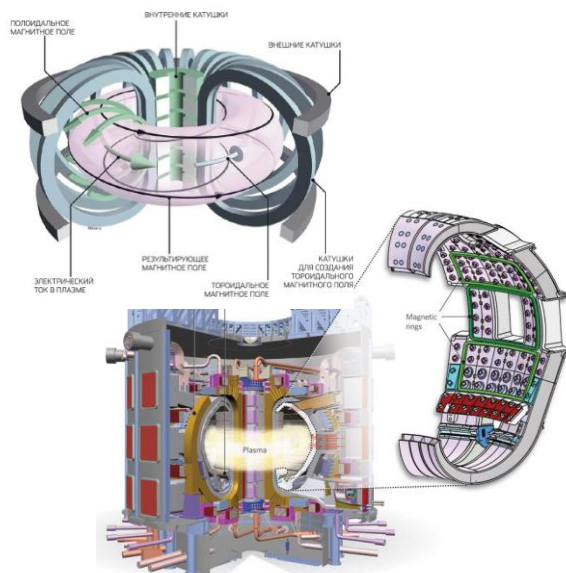
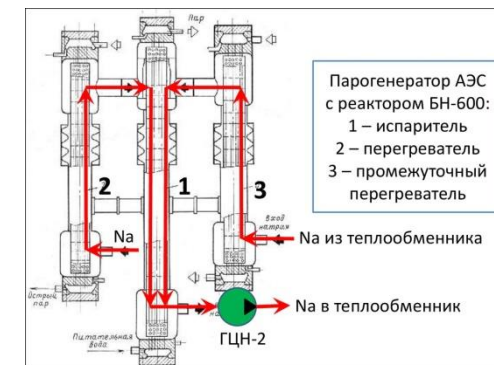
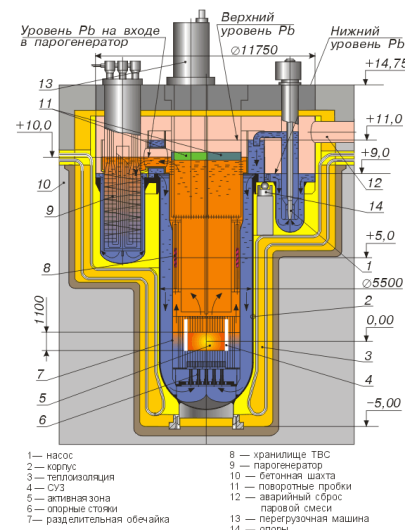
БН 1200



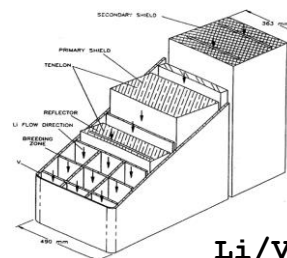
Актуальность

Конфигурации в реакторах

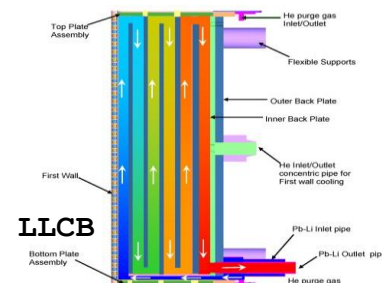
- Трубы, каналы
- Вертикальные, горизонтальные, наклонные
- Продольное, поперечное, магнитное поле (токамак)
- Неоднородный обогрев



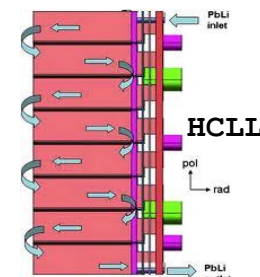
DCLL



Li/V



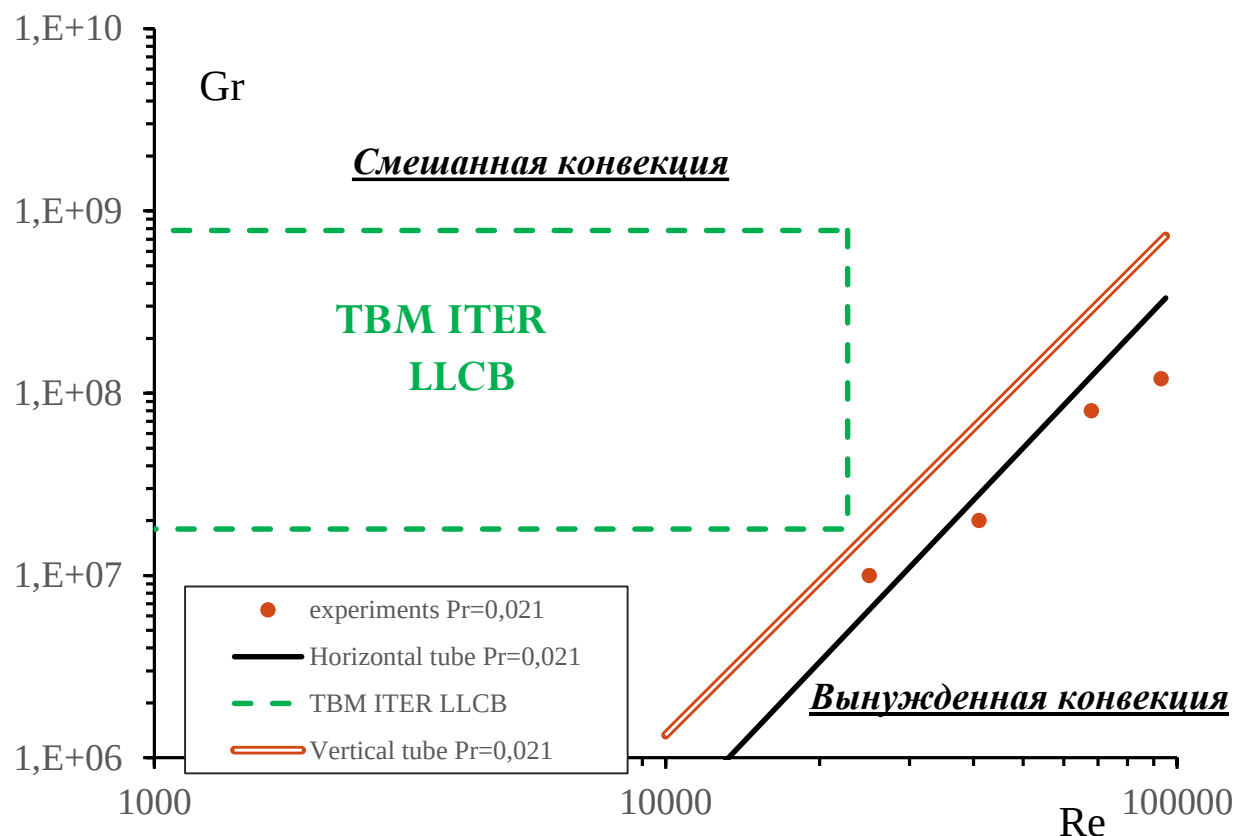
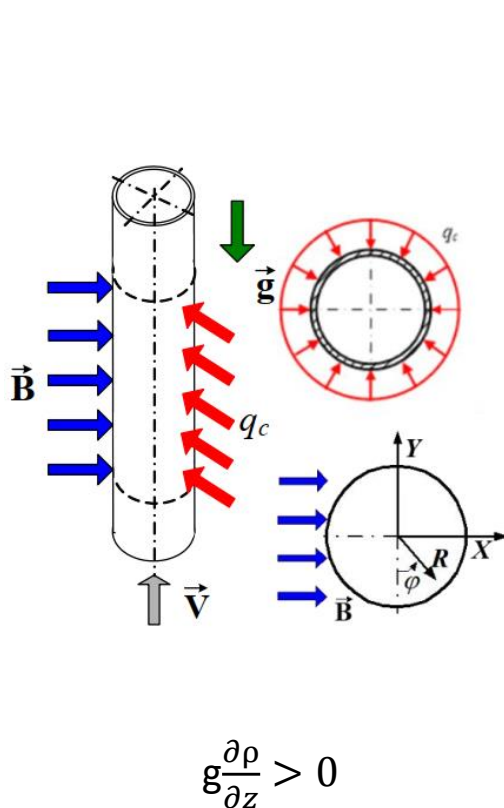
LLCB



HCLL

Задача

Смешанная конвекция при подъемном течении ртути при однородном обогреве трубе в поперечном магнитном поле



«Устойчивая стратификация»

Современное состояние

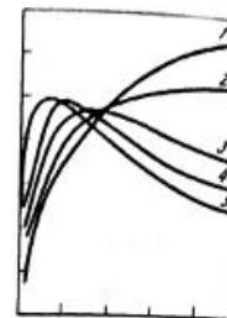
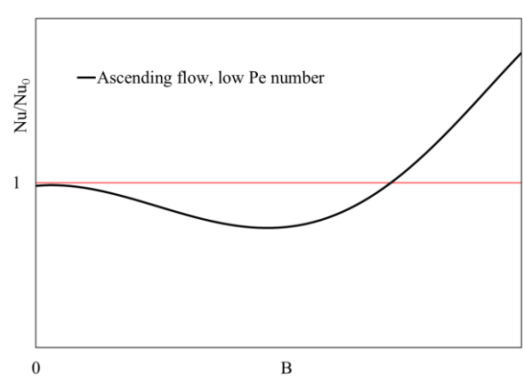
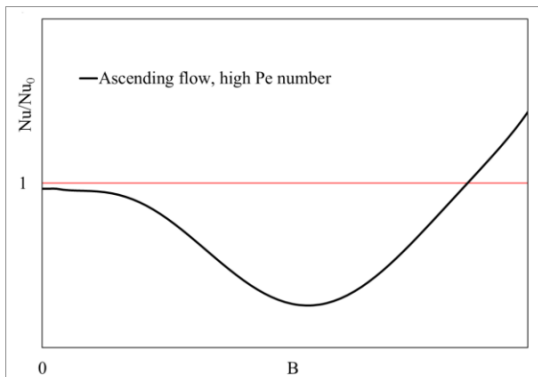
Без магнитного поля

Jongwoo You et al (2003), DNS (воздух)

Kim et al (2008), тестирование моделей турбулентности (воздух)

Jäger, Wadim and Wolfgang Hering. “Mixed convection with liquid metals: Review of experiments and model development.” (2018).

Author	Fluid	L/d	Pe	Chan.	Flow	Year
Ampleyev et al.	NaK	40	10 – 3000	Pipe	↑↓	1969
Brukx et al.	Na	... 6	50	Pipe, Annulus	↑↓	1976
Buhr et al.	Hg	105	80 – 2000	Pipe	↑	1967
Horsten	Hg	84	400 – 1600	Pipe	↑	1971
Jackson et al.	Na	... 35	90 – 300	Pipe	↑↓	1994
Jacoby et al.	Hg	67	800 – 1400	Pipe	↑	1972
Johnston	Na	52	50 – 200	Pipe	↑↓	1986
Kowalski et al.	Hg	67	2000	Pipe	↑	1974
Volchkov et al.	Na, NaK	55	3 – 150	Pipe, Annulus	↑	1969
Walton et al.	Na	... 35	90 – 260	Pipe	↑↓	1991
Wendling et al.	Na	6 – 30	5 – 185	Rectangular	↑	1971



Номер кривой
 $Gq \cdot 10^{-3}$
 Gq/Gq_{np}

1	2	3	4	5
0	1,0	2,3	4,0	8,6
0	100	230	400	860

Buhr et al 1974

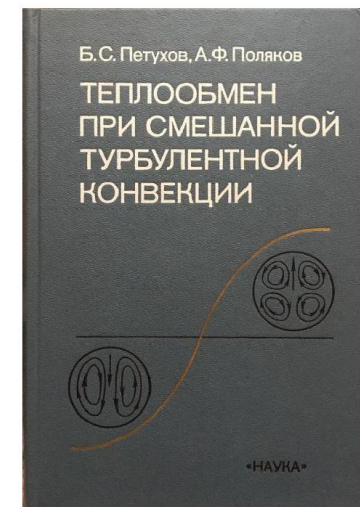
(Pr = 0,025; Re = 3 · 10⁴)

- «внешний» эффект - M
- «структурный» эффект

$$B = \frac{Gr^*}{Re^{1.825} \cdot Nu_0^2}$$

$$Ri = Gr/Re^2$$

$$Nu_0 = 5 + 0.025 \cdot (Re \cdot Pr)^{0.8}$$



Влияние магнитного поля

$$N = Ha^2 / Re$$

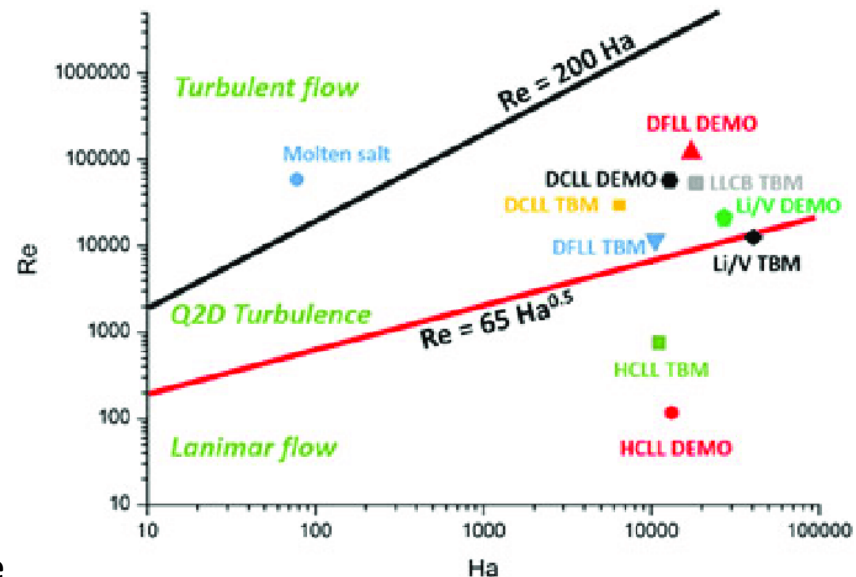
- «Эффект Гартмана» - рост сопротивления
- Подавление турбулентности
- Пространственная анизотропия
- Режимы 2D турбулентности



- 3D структуры по длине каналов
- Магнито-конвекция вызывает низкочастотные температурные пульсации высокой амплитуды
- Термогравитация образует зоны ухудшенного теплообмена

«Магнетоконвекция»

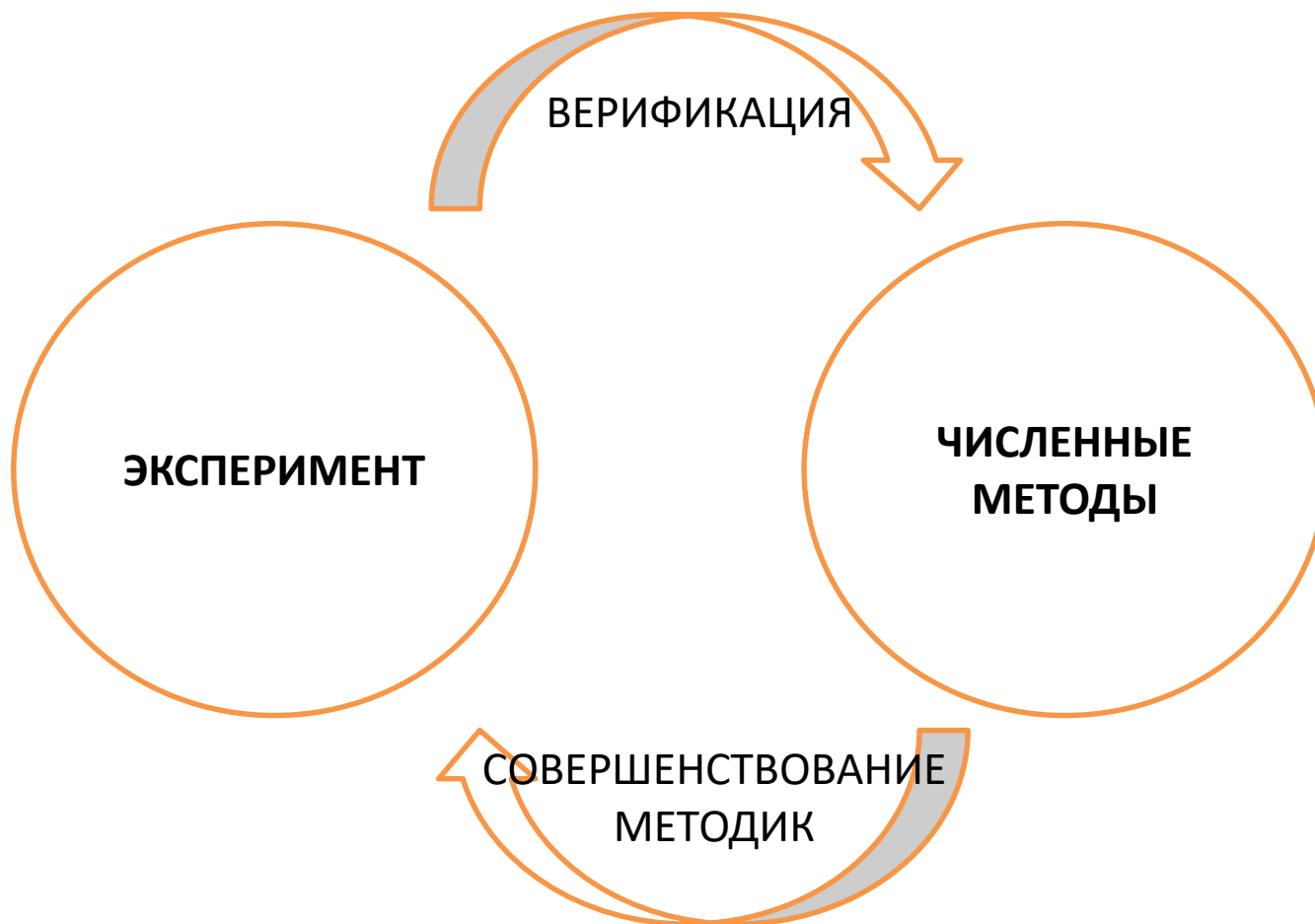
Режимы работы теплообменных систем токамаков



Meng Z. et al. AK-Epsilon RANS turbulence model for incompressible MHD flow at high Hartmann number in fusion liquid metal blankets //International Journal of Energy Research. – 2018. – Т. 42. – №. 1. – С. 314-320

Zikanov, O., Belyaev, I.A., Listratov, Y., Frick, P., Razuvarov, N., & Sviridov, V. (2021). Mixed Convection in Pipe and Duct Flows With Strong Magnetic Fields. *Applied Mechanics Reviews*, 73.

Методы



Эксперимент

Экспериментальный МГД-комплекс МЭИ-ОИВТ РАН (в рамках НОЦ «МЭИ-ОИВТ РАН»)



PK-1. УНУ «Ртутный стенд» МЭИ



**PK-2.
ОИВТ РАН**



**PK-3.
ОИВТ РАН**

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

РК-2

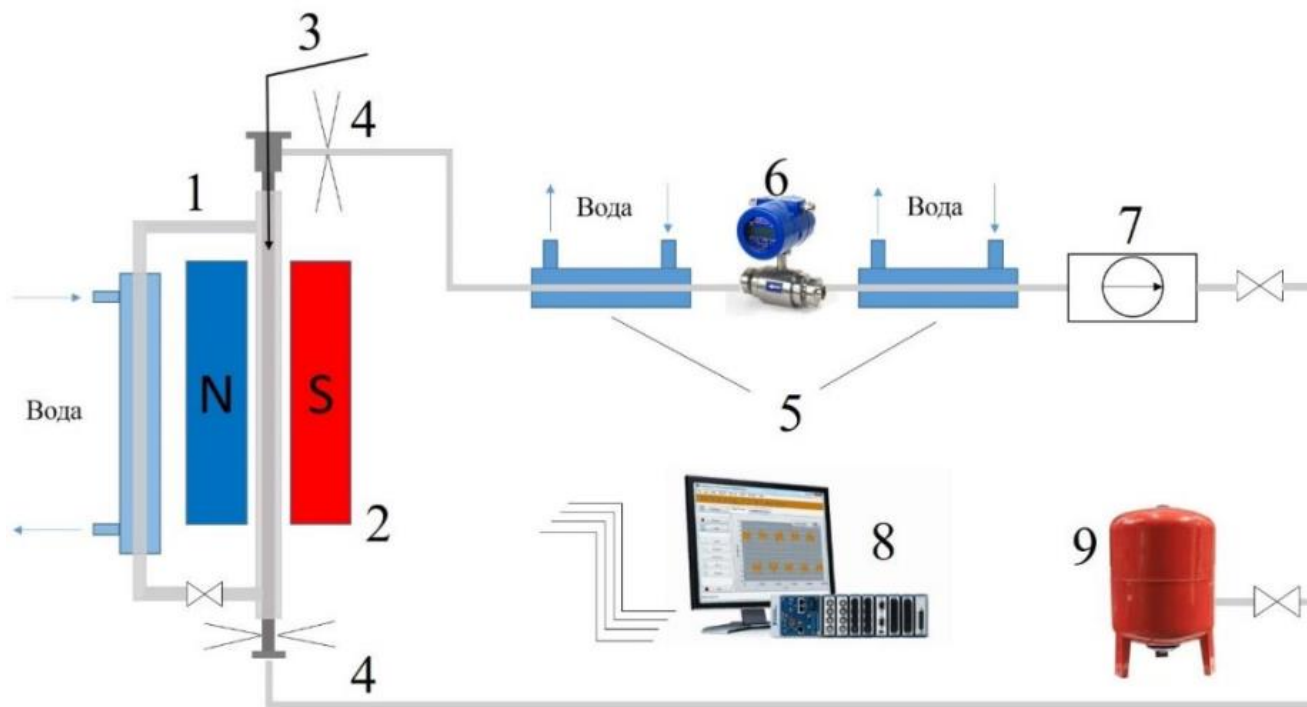
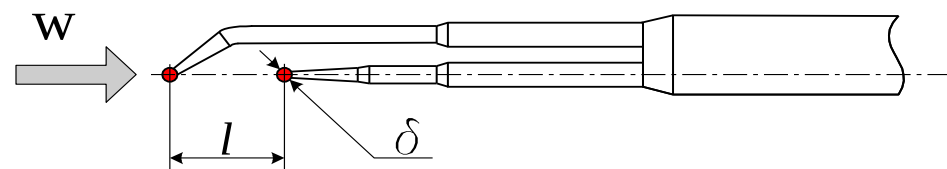
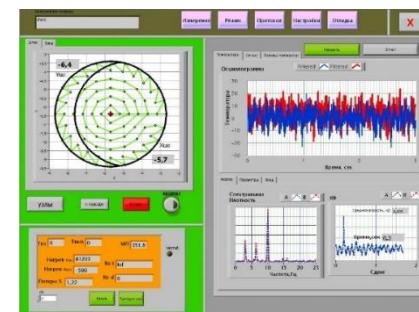
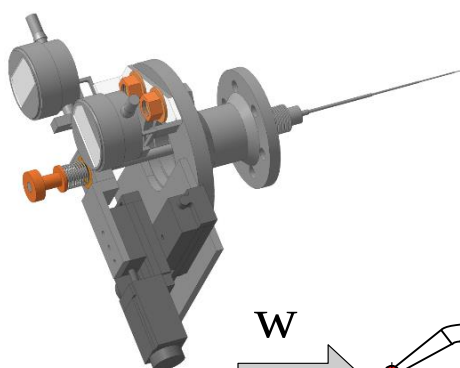


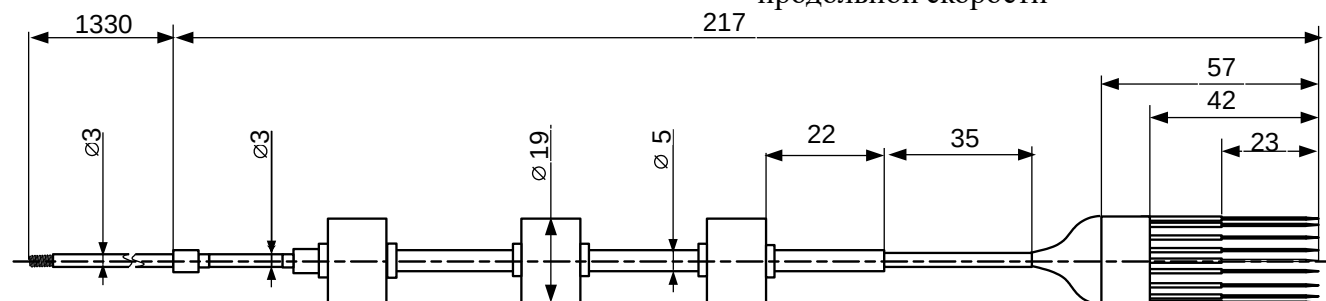
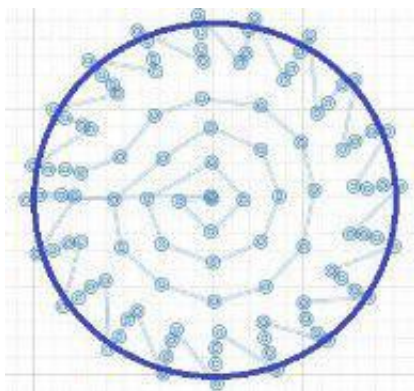
Схема МГД- стенда: 1- экспериментальный рабочий участок; 2- электромагнит; 3- зонд – гребенка; 4 – термопары, измеряющие температуру входа и выхода; 5 теплообменники типа труба в трубе; 6 – электромагнитный расходомер; 7 – электромагнитный насос; 8 – измерительная система; 9 - сливной бак со ртутью.

Эксперимент

Зондовые методики измерений в потоках и системы автоматизации научных исследований (АСНИ)



Корреляционный датчик
продольной скорости



Численное моделирование

DNS

Модель:

- Течение жм в трубе
- Несжимаемая среда
- 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

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

Численный метод

- Консервативная конечно-разностная схема 2го порядка
- Явная схема Адамса-Башфорта по времени
- Преобразование Фурье по углу
- 2D солвер из fishpack
- MPI+OMP параллелизация

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

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

$$\mathbf{F}^n = -(\mathbf{v}^n \cdot \nabla) \mathbf{v}^n + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{v}^n + N(\mathbf{j}^n \times \mathbf{e})$$

$$\frac{3\mathbf{v}^* - 4\mathbf{v}^n + \mathbf{v}^{n-1}}{2\Delta t} = 2\mathbf{F}^n - \mathbf{F}^{n-1}$$

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

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

D. Krasnov et al. / Computers & Fluids 50 (2011) 46–59

```
* Grid resolution
numx: 256
minDX: 2.902447E-04
minDX+: 1.070511E-01
maxDX: 2.452285E-02
maxDX+: 9.044777E+00
numy: 4096
minDY: 2.539062E-02
minDY+: 9.364837E+00
maxDY: 2.539062E-02
maxDY+: 9.364837E+00
numz: 128
minDZ: 8.490183E-04
minDZ+: 3.131439E-01
maxDZ: 1.182563E-02
maxDZ+: 4.361655E+00
```

• Разрешение сетки: $N_r \times N_\phi \times N_z = 128 \times 256 \times 4096$ points

• Сгущение сетки в направлении $r - A$

• Шаг по времени $1.0e-3$

• Возмущения на входе амплитудой $1.0e-2$ на каждом шаге по времени

• Общее время расчета порядка **300 конвективных единиц**

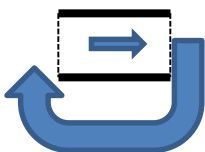
Сетка: Gauss-
Lobatto модиф

$$r = f(\eta) = A * \sin(\pi/2 * \eta) - (1-A) * \eta$$

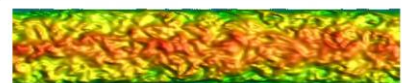
Граничные условия

Вход

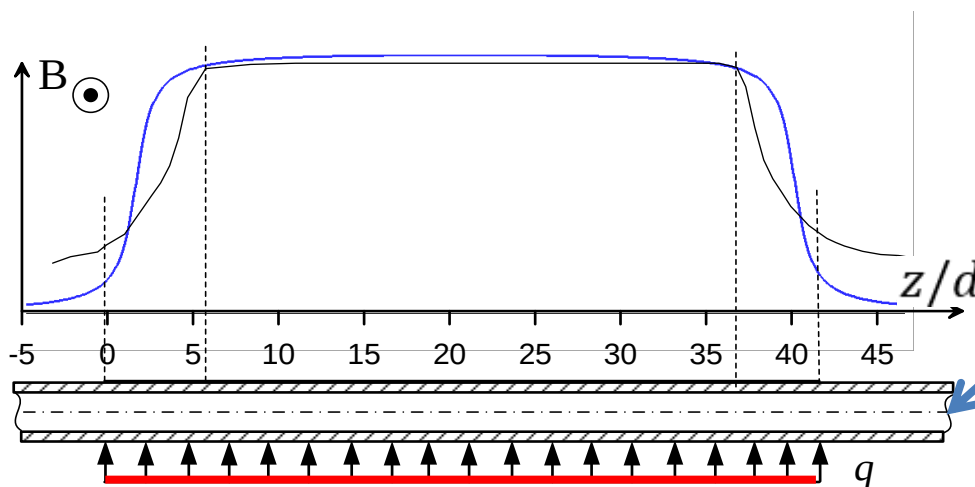
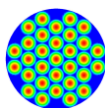
1. Отдельно заранее
рассчитываемые входные
течения с ПГУ



изотермическое
турбулентное течение на
входе



2. Вставка «хoneyкомб»



Реалистичное бездивергентное магнитное поле, с
учетом неоднородности входа/выхода в магнит
(Votyakov, Kassinos & Albets-Chico (2009))

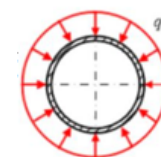
Выход

Конвективные
граничные условия
на выходе

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + U_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} = 0$$

«Стенка» $C_w = \frac{\sigma_w \delta}{\sigma d}$

1. $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$ $C_w \rightarrow 0$
2. $\varphi = \text{const}$ $C_w \rightarrow \infty$



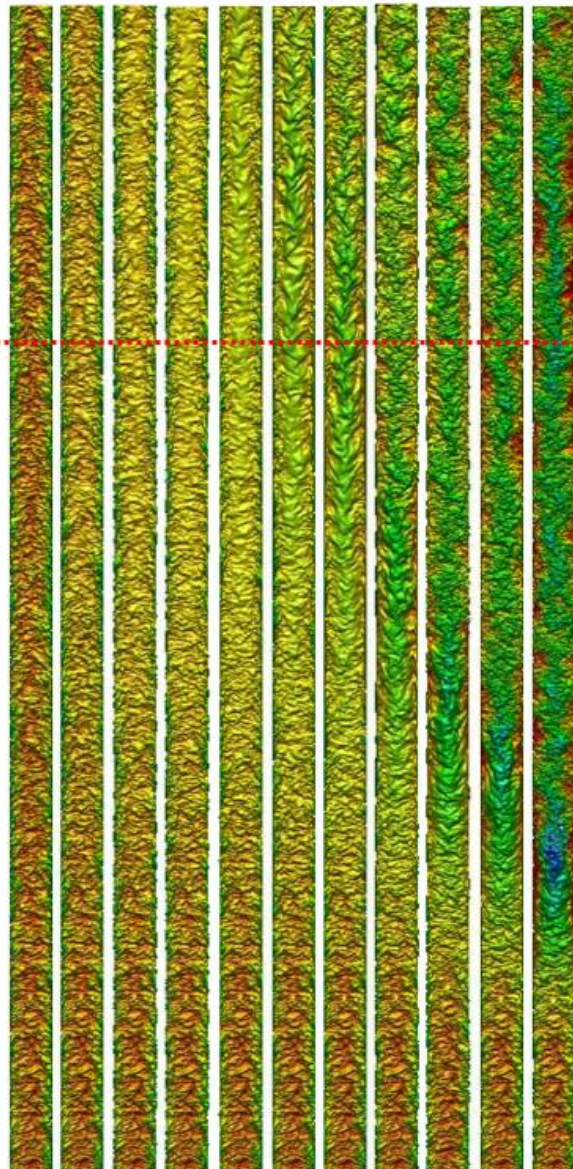
$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q_c = \text{const}$$

Гидродинамика и теплообмен В отсутствие магнитного поля, $Re=250$

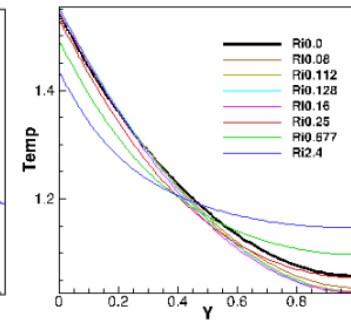
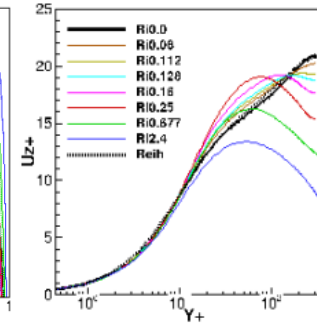
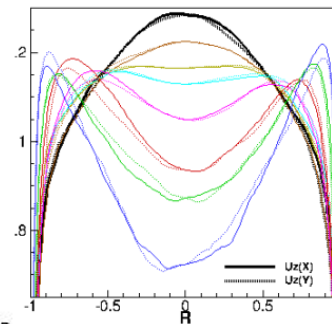


$Re=10000$
 $Pr=0.025$

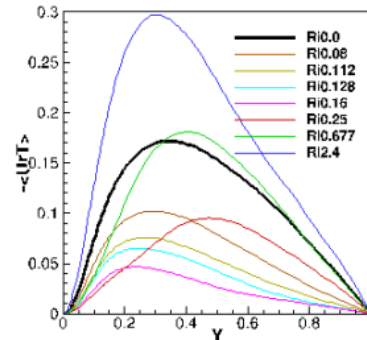
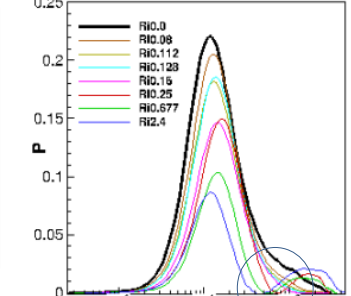
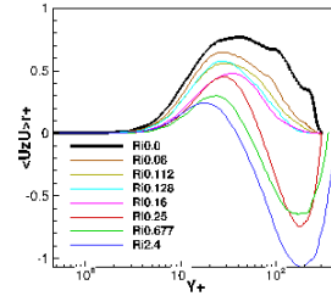
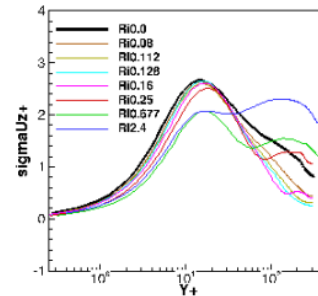
$Ri=0$ 0.08 0.11 0.13 0.16 0.2 0.25 0.4 0.68 1.0 2.4



$x/d=32$



- Монотонное изменение профиля скорости при изменении Ri
- Немонотонное изменение поля температуры при изменении Ri

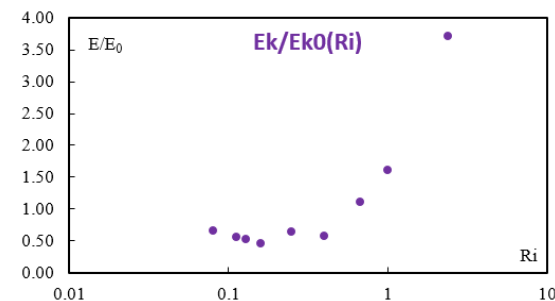
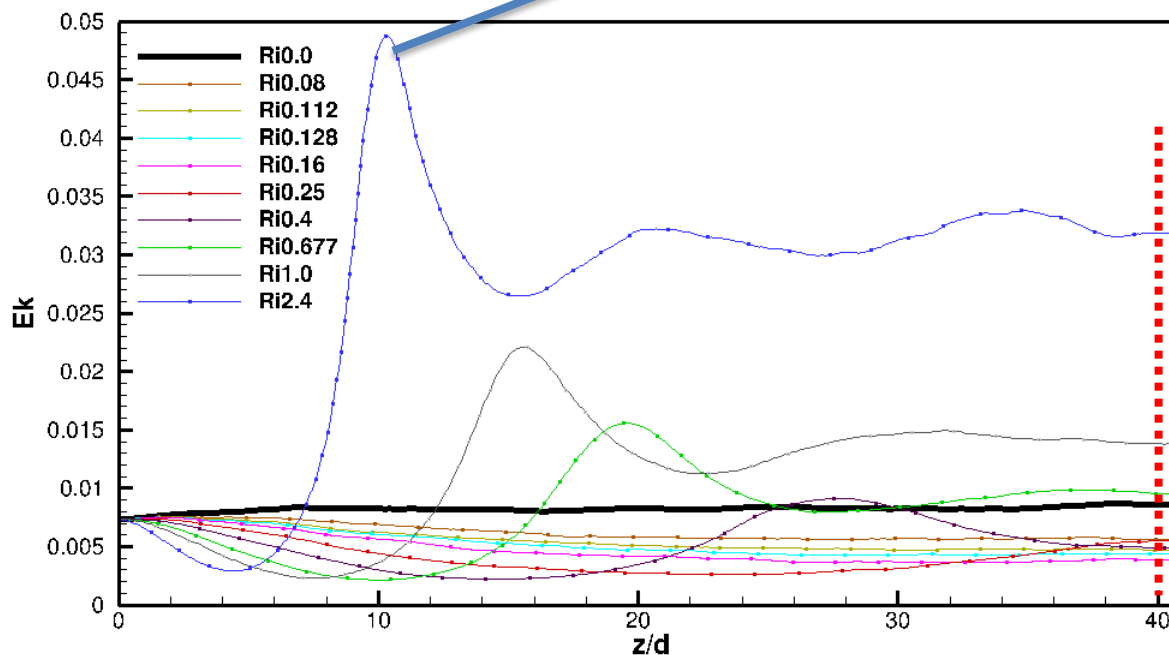
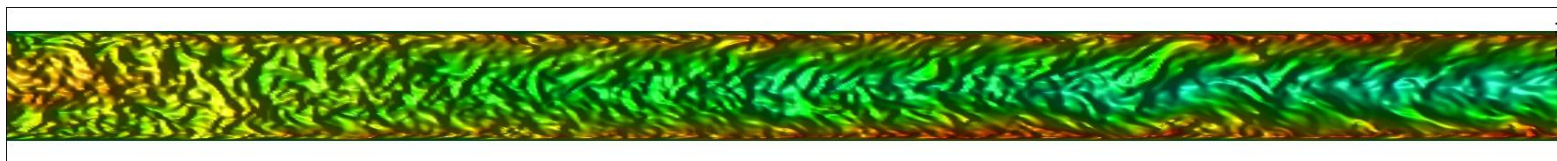


- В пристенной области термогравитация приводит к подавлению турбулентности, а в ядре за точкой максимума к ее генерации – полная ламинаризация течения неосуществима
- Существует область с «отрицательной вязкостью» - соотношения для вихревой вязкости не имеют смысла



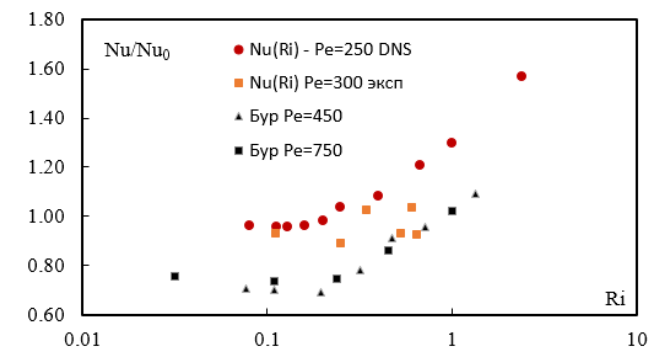
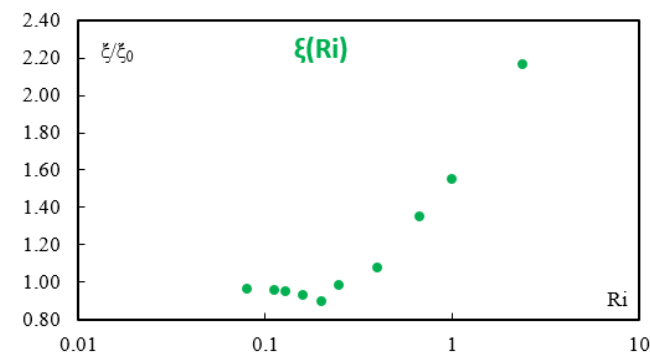
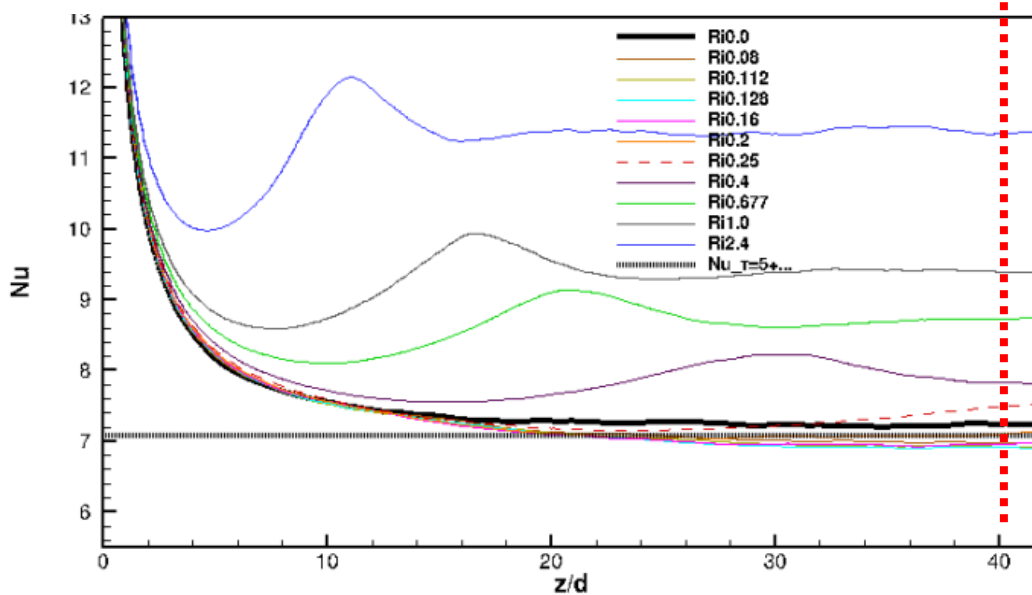
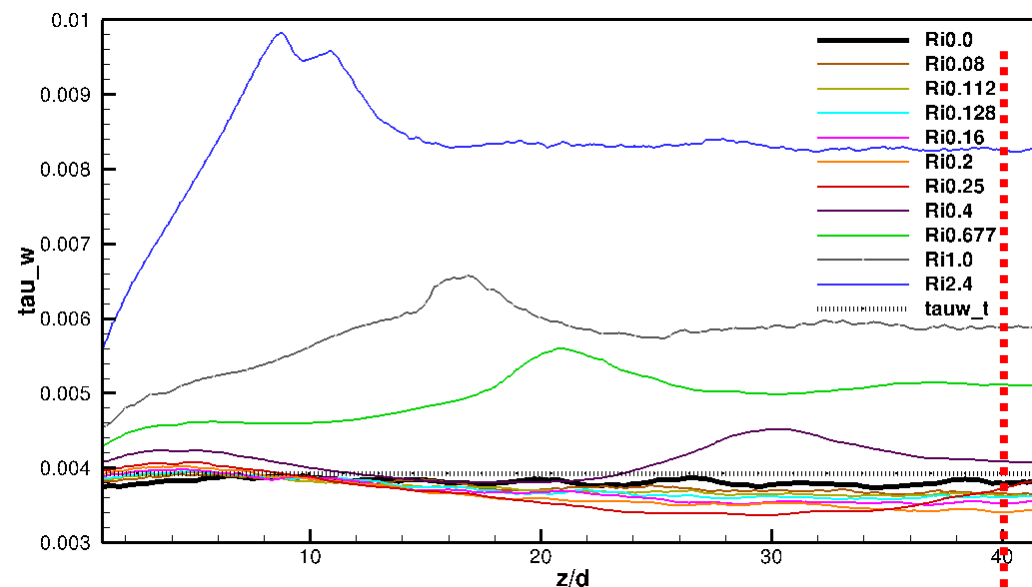
поверхность продольной скорости

Гидродинамика и теплообмен В отсутствие магнитного поля, $Re=250$



$$e_k = \sum \frac{\overline{u_i^2}}{2} \quad E_k = \int e_k dF \quad \text{Энергия флуктуаций}$$

Гидродинамика и теплообмен В отсутствие магнитного поля, $Re=250$



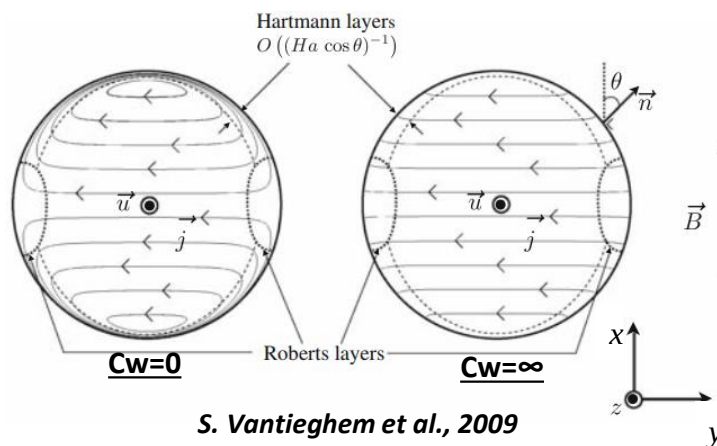
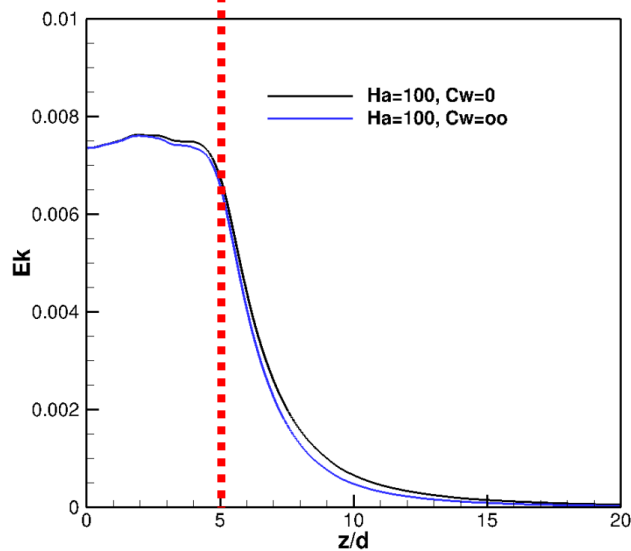
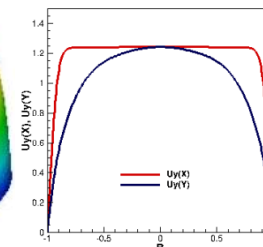
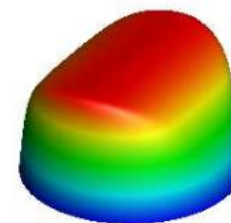
Гидродинамика и теплообмен Влияние магнитного поля, $Ri=0$, $Ha=100$

$Cw=0$

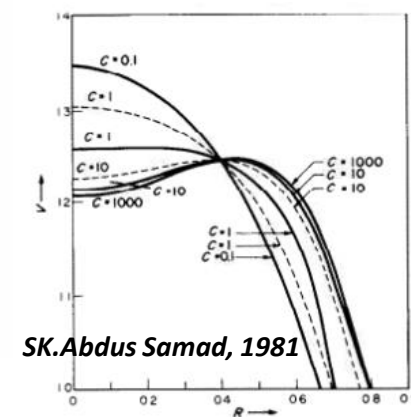
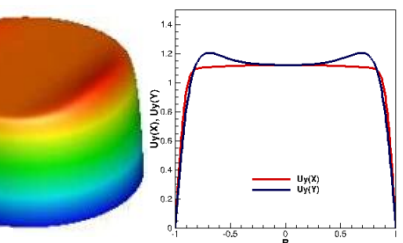


продольная скорость

$Cw=\infty$



S. Vantieghem et al., 2009

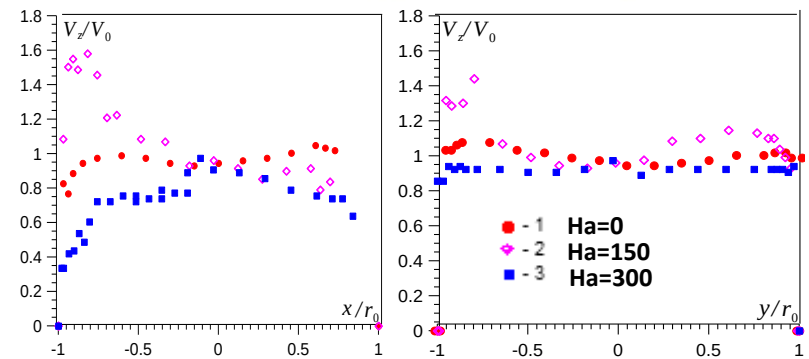
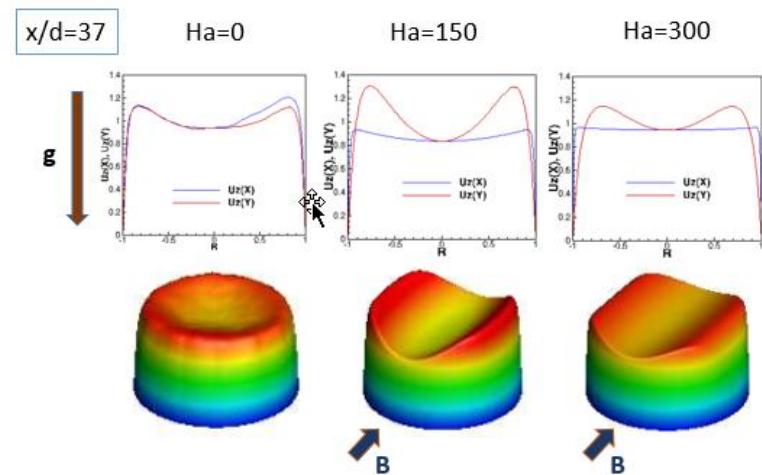
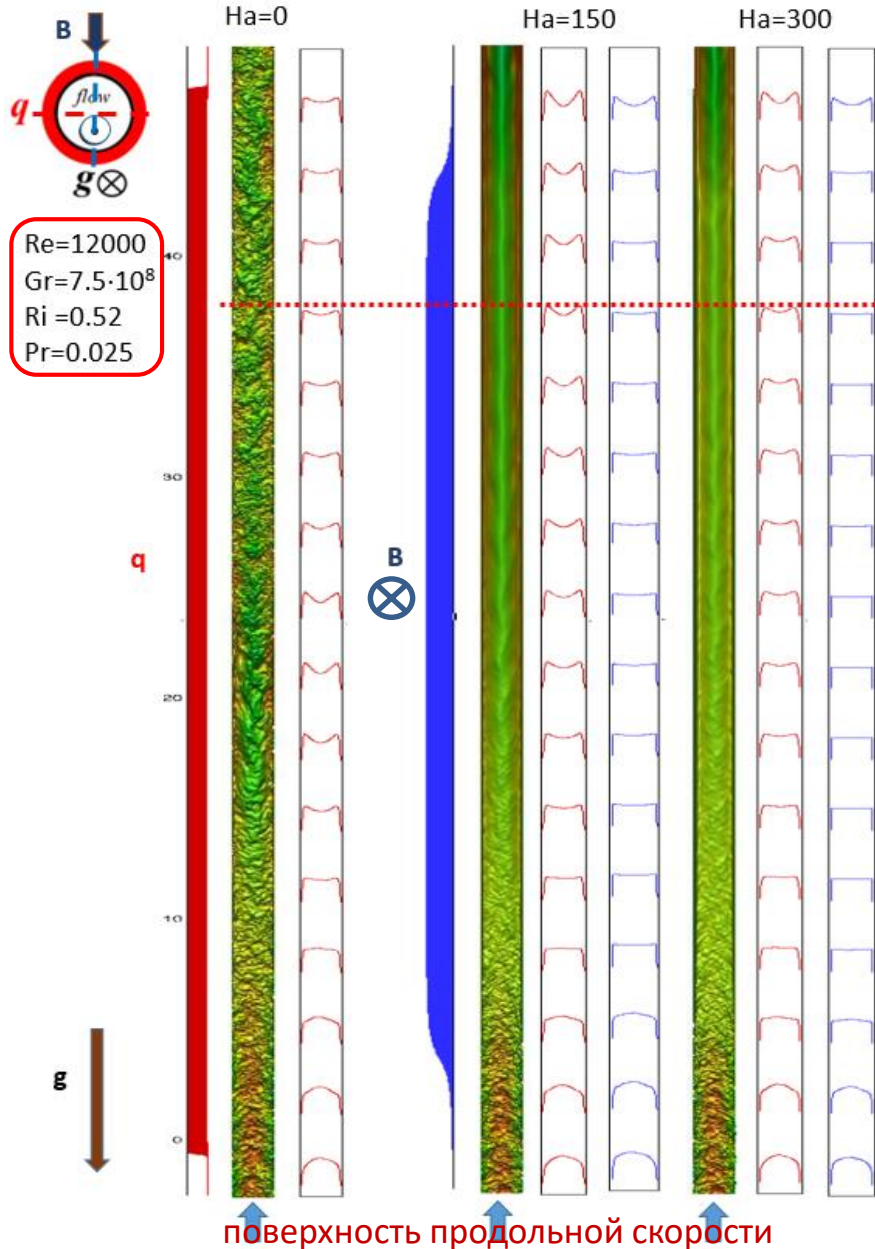


SK.Abdus Samad, 1981

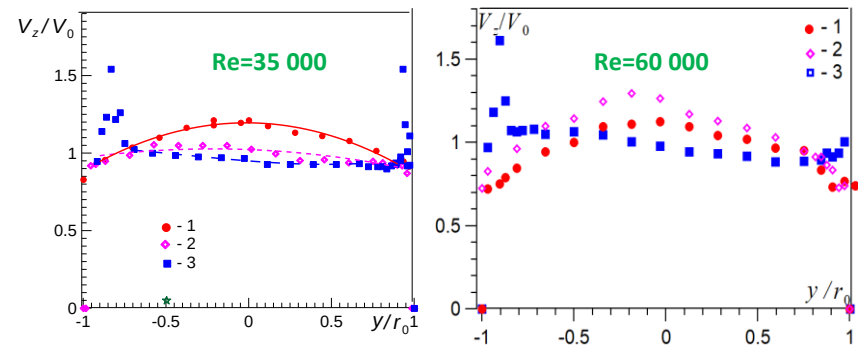
Гидродинамика и теплообмен

Смешанная конвекция в магнитном поле.

Сравнение с экспериментом ($Cw \sim 0.01$). Профили скорости



Корреляционная методика определения скорости

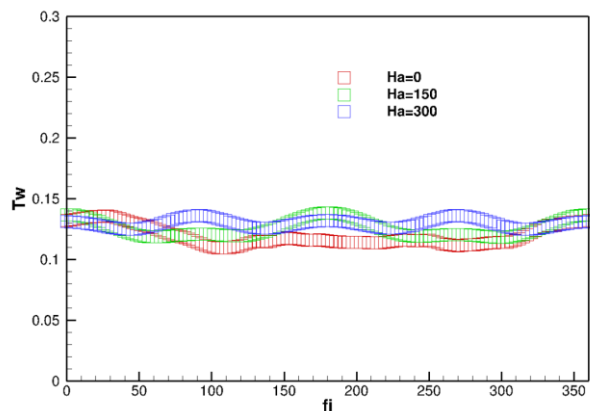


эксперимент

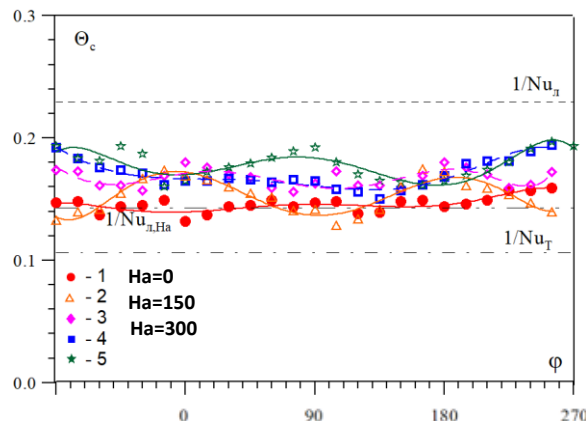
Гидродинамика и теплообмен

Смешанная конвекция в магнитном поле.

Сравнение с экспериментом. $Sw \sim 0.01$. Поле температуры



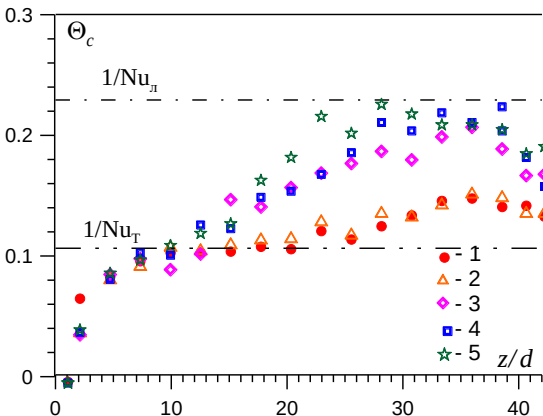
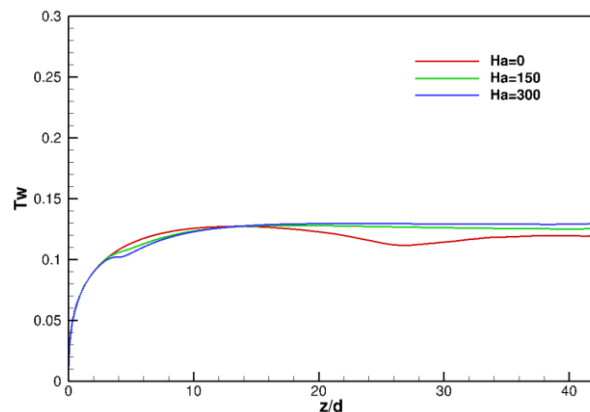
расчет



эксперимент

$$\theta_c = (T_c - \bar{T}) / (q_c d / \lambda)$$

Распределение θ_c в сечении $z/d=38$,
 $Re=1.2 \cdot 10^4, Gr_q = 0.75 \cdot 10^8$ ($q_c = 30$ кВт/м²):
1) $Ha=0$, 2) 150, 3) 350, 4) 450, 5) 550

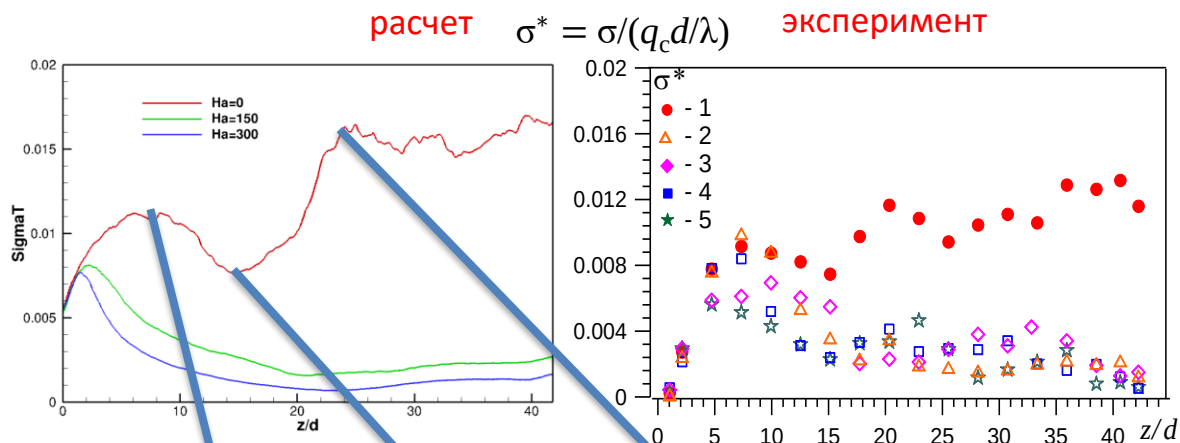


Распределение θ_c по длине канала
 $Re=12000, Gr_q = 0.75 \cdot 10^8$ ($q_c = 30$ кВт/м²):
1) $Ha=0$, 2) 150, 3) 300, 4) 450, 5) 550.

Гидродинамика и теплообмен

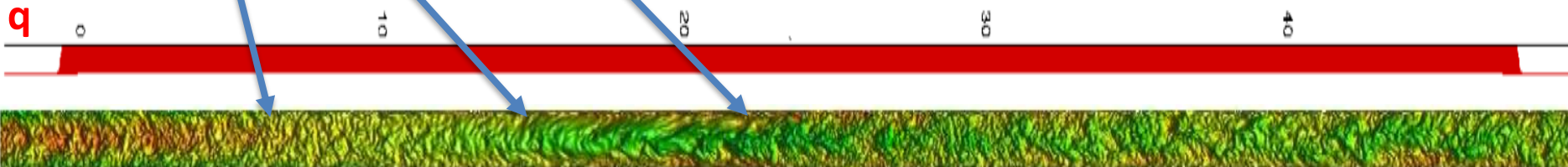
Смешанная конвекция в магнитном поле.

Сравнение с экспериментом. $Cw \sim 0.01$. Интенсивность пульсаций



Распределение интенсивности температурных пульсаций $\sigma/(q_c d/\lambda)$ вблизи обогреваемой стенки ($r/r_0=0.8$) в плоскости, поперечной магнитному полю

$Re=12000$ $Gr_q = 0.75 \cdot 10^8$ ($q_c = 30$ кВт/м²):
1) $Ha=0$, 2) 150, 3) 300, 4) 450, 5) 550.



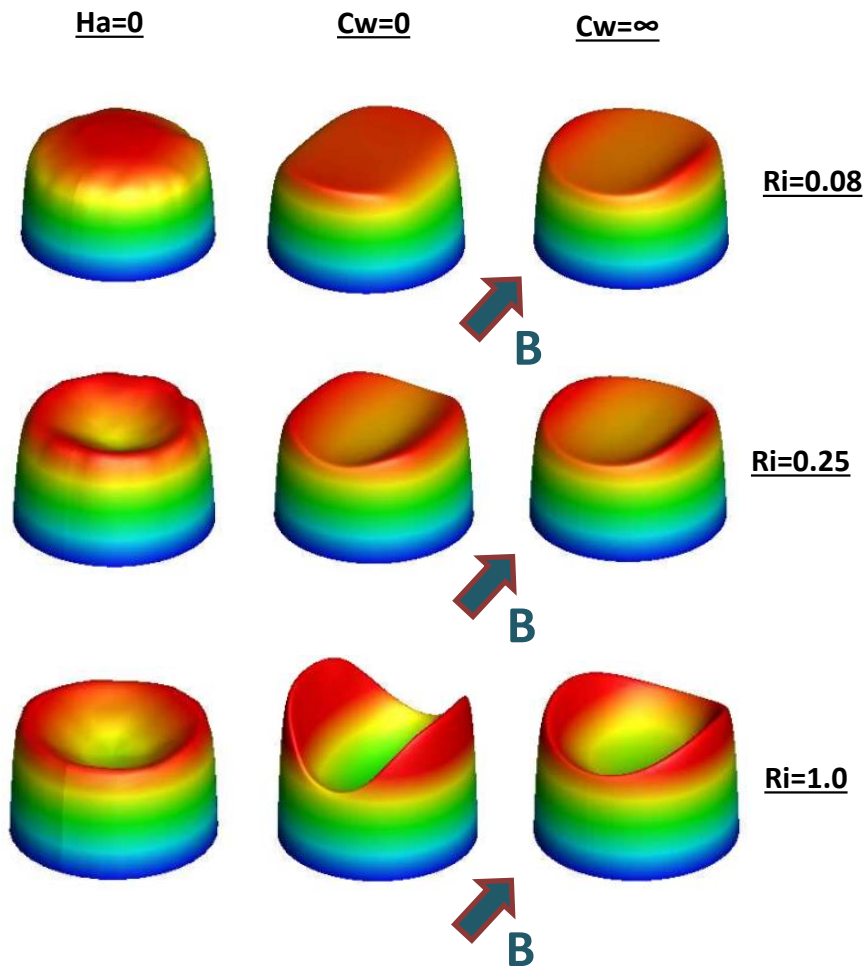
Гидродинамика и теплообмен

Смешанная конвекция в магнитном поле.

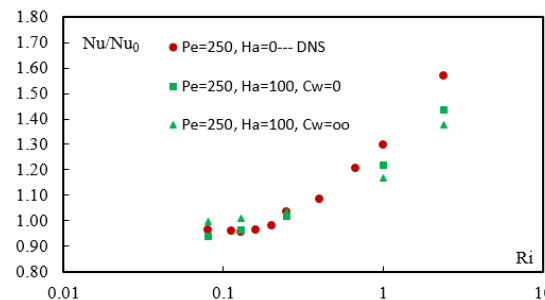
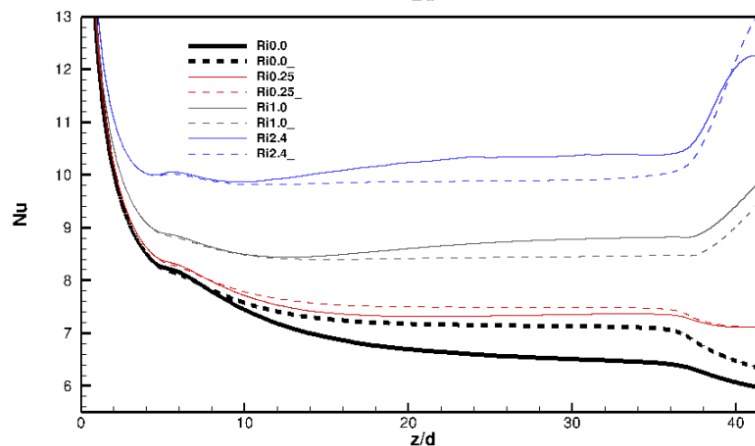
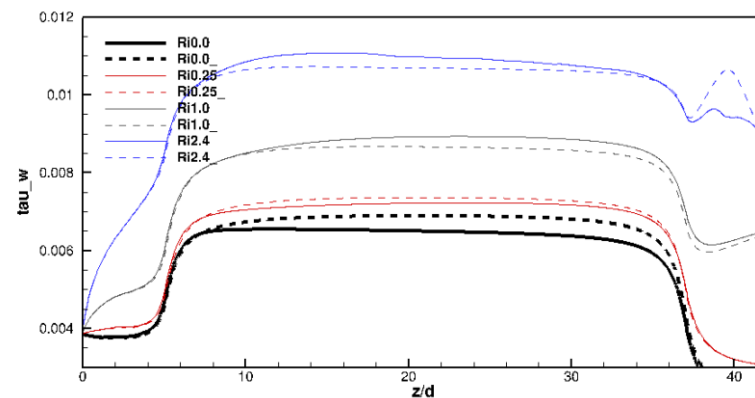
Параметрический анализ. $Pe=250$, $Ha=100$ ($N=1$), $Ri=var$

$Cw=0$ —————

$Cw=\infty$ - - - - -



осредненная продольная скорость в сечении $z/d=32$



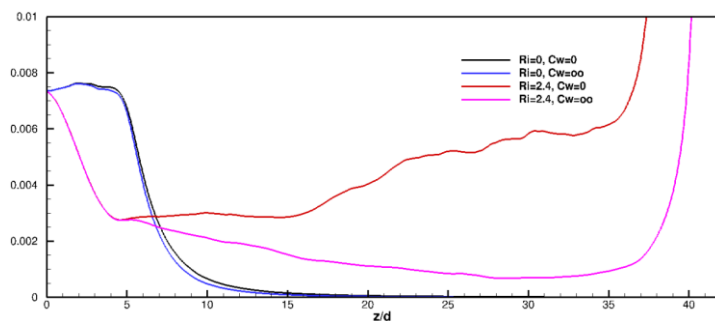
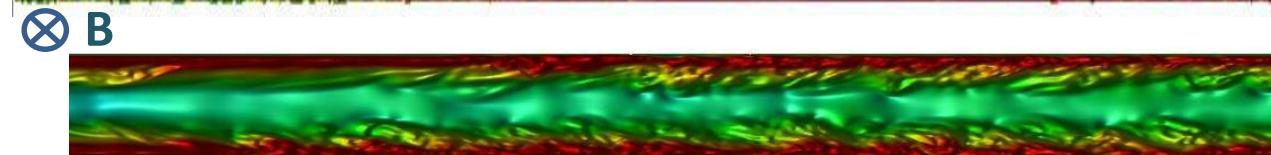
Гидродинамика и теплообмен

Смешанная конвекция в магнитном поле.

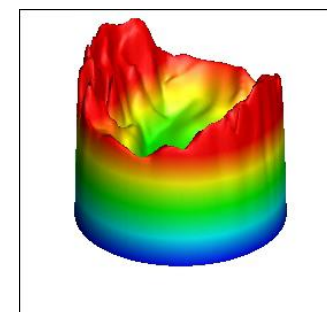
Параметрический анализ. $Re=250$, $Na=100$ ($N=1$), $Ri=2.4$

продольная скорость

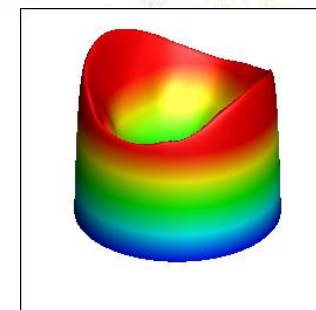
$Cw=0$



$Cw=\infty$



B



B

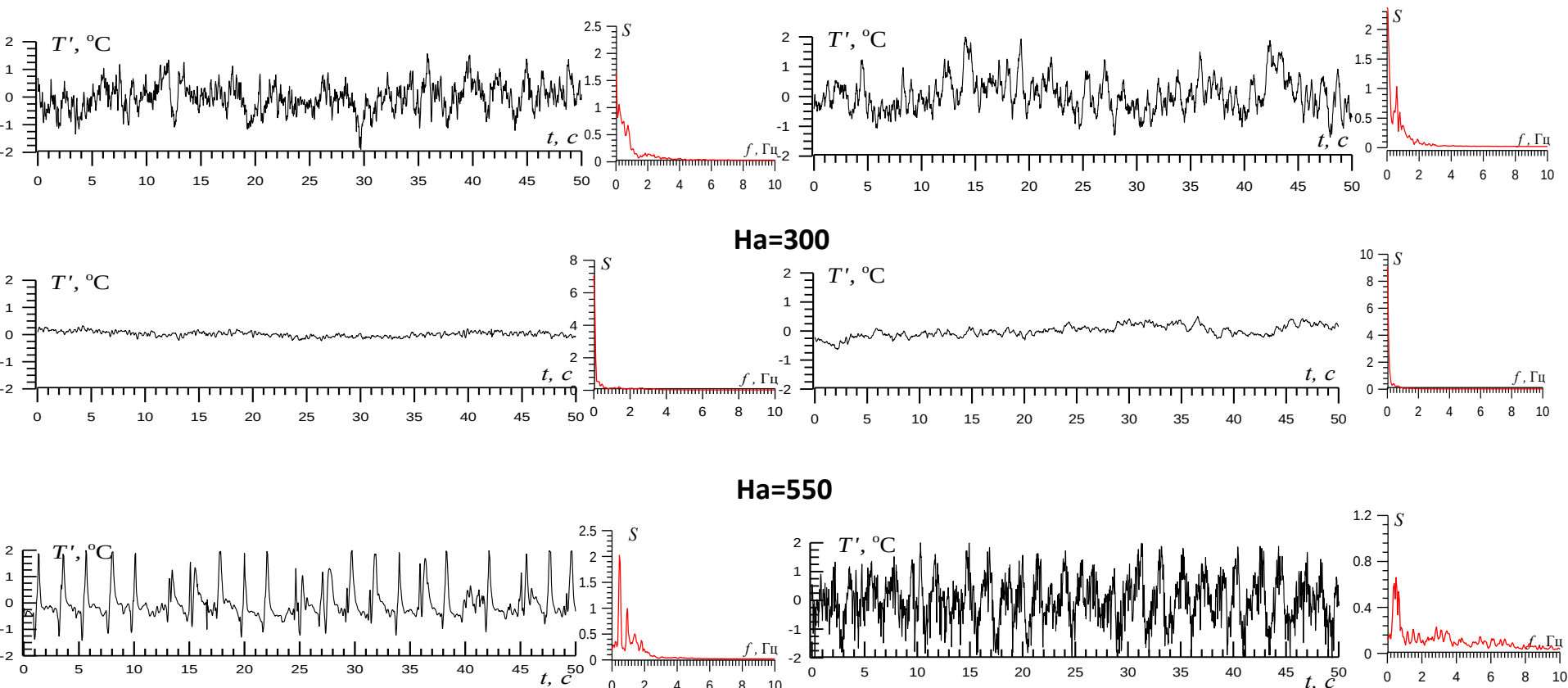
Смешанная конвекция в магнитном поле.

Магнетоконвективные флуктуации? Обнаружены в эксперименте!

Re=20 000

Ha=0

Re=50 000



Осциллограммы температурных пульсаций и спектры вблизи обогреваемой стенки ($z/d=38$, $r/r_0=0.8$), $Gr_q = 0.75 \cdot 10^8$ ($q_c = 30$ кВт/м²):

ВЫВОДЫ

1. В отсутствие магнитного поля результаты расчета удовлетворительно согласуются с имеющимися опытными данными и теоретическими представлениями о влиянии плавучести на гидродинамику и теплообмен жидкого металла при подъемном течении в круглой трубе.
2. Влияние поперечного магнитного поля на смешанную конвекцию при подъемном течении жидкого металла ($Pr=0.025$) в обогреваемой трубе проявляется:
 - в подавлении турбулентного переноса и ламинаризации течения по всему объему течения (т.н. структурное воздействие)
 - в деформации профиля скорости с образованием пристенных областей с высокими градиентами скоростей (т.н. внешнее воздействие)
 - в зависимости от проводимости стенок канала и соотношений параметров Ha , Gr возникают течения с различной топологией профиля скорости, что приводит к существенной неоднородности в распределении температуры стенки
3. Анизотропное воздействие магнитного поля в разных плоскостях вдоль потока приводит к образованию т.н. струйных пристенных течений в слоях Робертса. Такие струи могут либо подавляться при увеличении числа Гартмана, либо усиливаться при увеличении числа Ричардсона. Наличие конечной проводимости стенки должно приводить к уменьшению скорости в струях.
4. При существенном воздействии термогравитации ростом числа Гартмана теплоотдача уменьшается из-за подавления турбулентности, однако это снижение не драматическое и составляет 10-20%, относительно теплоотдачи, в этом случае, можно объяснить существенным пристенным градиентом скорости в потоке по всему периметру трубы.
5. При слабом влиянии термогравитации магнитное поле, подавляя турбулентный перенос лишь незначительно увеличивает теплоотдачу до уровня, приблизительно соответствующего ~ 7 – ламинарному течению в поперечном поле.
6. Течение в струях в слоях Робертса при $Ri > 1$ имеет тенденцию к неустойчивости и возможно образование в потоке магнетоконвективных флуктуаций температуры. Проводимость стенки уменьшает скорость в струях, поэтому течение стабильнее. Необходимо дальнейшее исследование таких режимов.
7. В эксперименте магнетоконвективные флуктуации температуры в потоке обнаружены лишь в режимах при высоких числах Рейнольдса и Гартмана, которые на данном этапе недостижимы в численном DNS расчете.



**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ !**