

29 июня 2015 года заседание Ученого совета ОИВТ  
РАН

# Исследование МГД-теплообмена жидких металлов и расплавов солей в обоснование проектирования ядерных и термоядерных установок

зав. отд. д.т.н. проф. В.Г. Свиридов

*ОИВТ РАН Отдел 2.1.2. Теплофизических проблем ядерной энергетики  
Национальный исследовательский институт «МЭИ»*

[info@cati.ru](mailto:info@cati.ru)



# Объединенный авторский коллектив МЭИ-ИВТ РАН

Руководители: **Л.Г.Генин**, В.Г.Свиридов

- Аверьянов К.В.
- Батенин В.М.
- Беляев И.А.
- Боронко В.В.
- Дорофеев Д.И.
- Жилин В.Г.
- Загорский В.С.
- Захаров А.Н.
- Захарова О.Д.
- Ивочкин Ю.П.
- Као Ба Нинь
- Карякин А.И.
- Ковалев С.И.
- Краснощекова Т.Е.
- Крылов С. Г.
- Кудрявцева Е.В.
- Листратов Я. И.
- Манчха С.П.
- Мельников И.А.
- Муравьев Е.В.
- Огнерубов Д.А.
- Пахотин Ю.А.
- Полянская О.И.
- Поддубный И.И.
- Пятницкая Н.Ю.
- Разуванов Н.Г.
- Свиридов Е.В.
- Свиридова Л.А.
- Сукомел Л.А.
- Устинов А.В.
- Цой В.Р.
- Шпанский Ю.С.
- Шестаков А.А.
- Аспиранты и студенты различных курсов

# Мнение специалистов:

- Альтернативы ядерной энергетике (ЯЭ) в большой энергетике нет.

**Вопрос:** что понимать под перспективной ЯЭ?

- ЯЭ **только** тепловых реакторов (ТР) - вызывает вопросы:
  - Откуда взять топливо?
  - Что делать с облученным топливом?
  - Что делать с радиоактивными отходами?
  - Как вовлечь в ядерный топливный цикл Th?
- Ускоренный ввод быстрых реакторов (БР) мог бы обеспечить решение указанных вопросов

**Проблема:** опоздали со строительством БР!

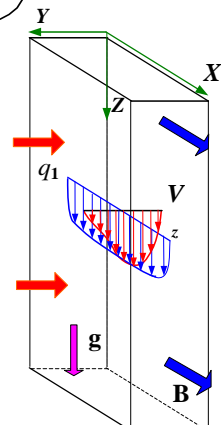
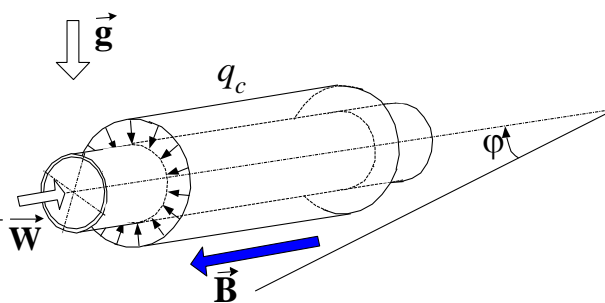
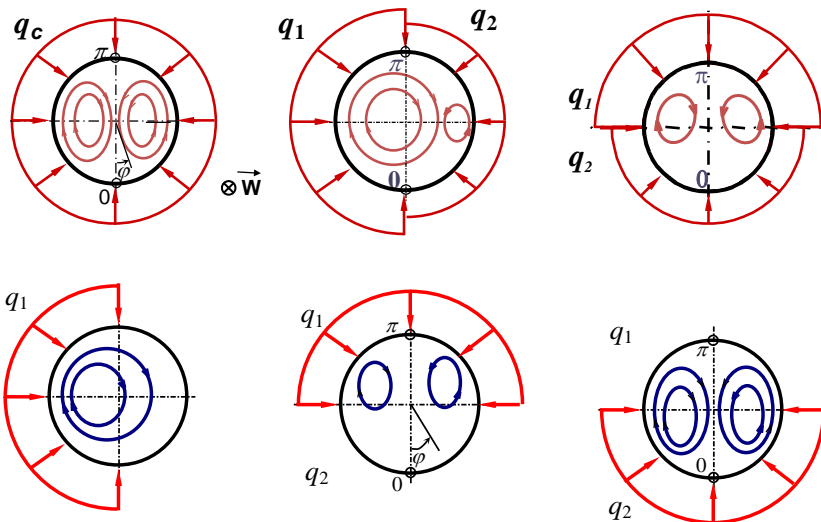
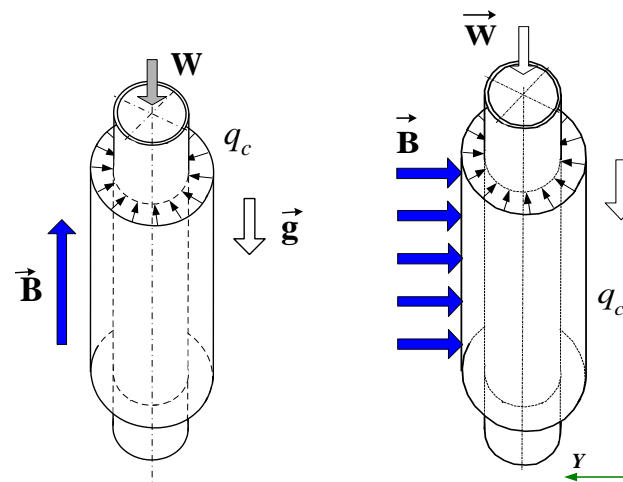
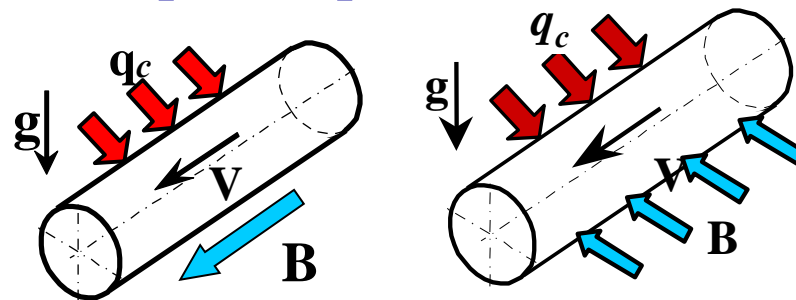
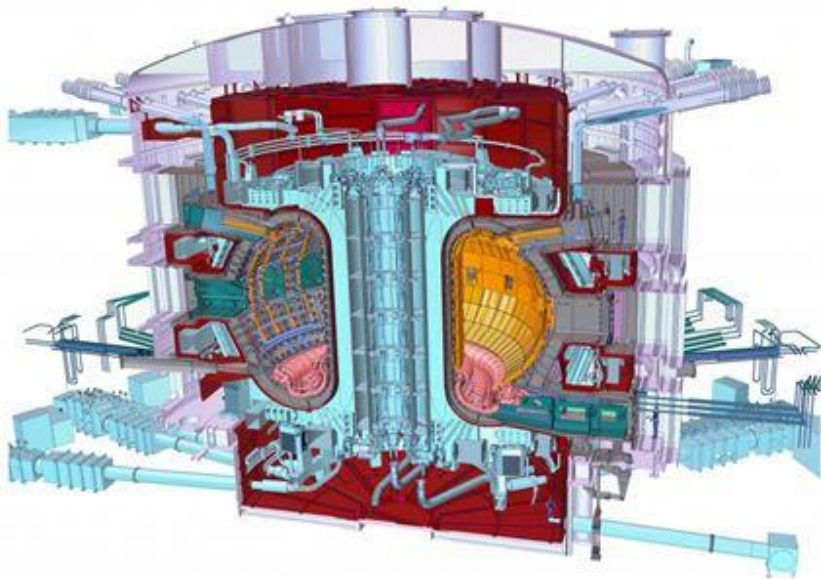
- **БН-600**, БН-800, БН-1200...(Na)
- БРЕСТ (Pb, Pb-Bi)

- **Возможный путь:** реакторы деления (ТР, БР)  
+ гибридные реакторы синтеза, термоядерные источники нейтронов (ТИН)  
**Теплоносители** – жидкие металлы (Li, Pb, Pb-Li, ...)  
– расплавы солей (LiF.BeF<sub>2</sub>, LiF.NaF.KF + UF<sub>4</sub>)

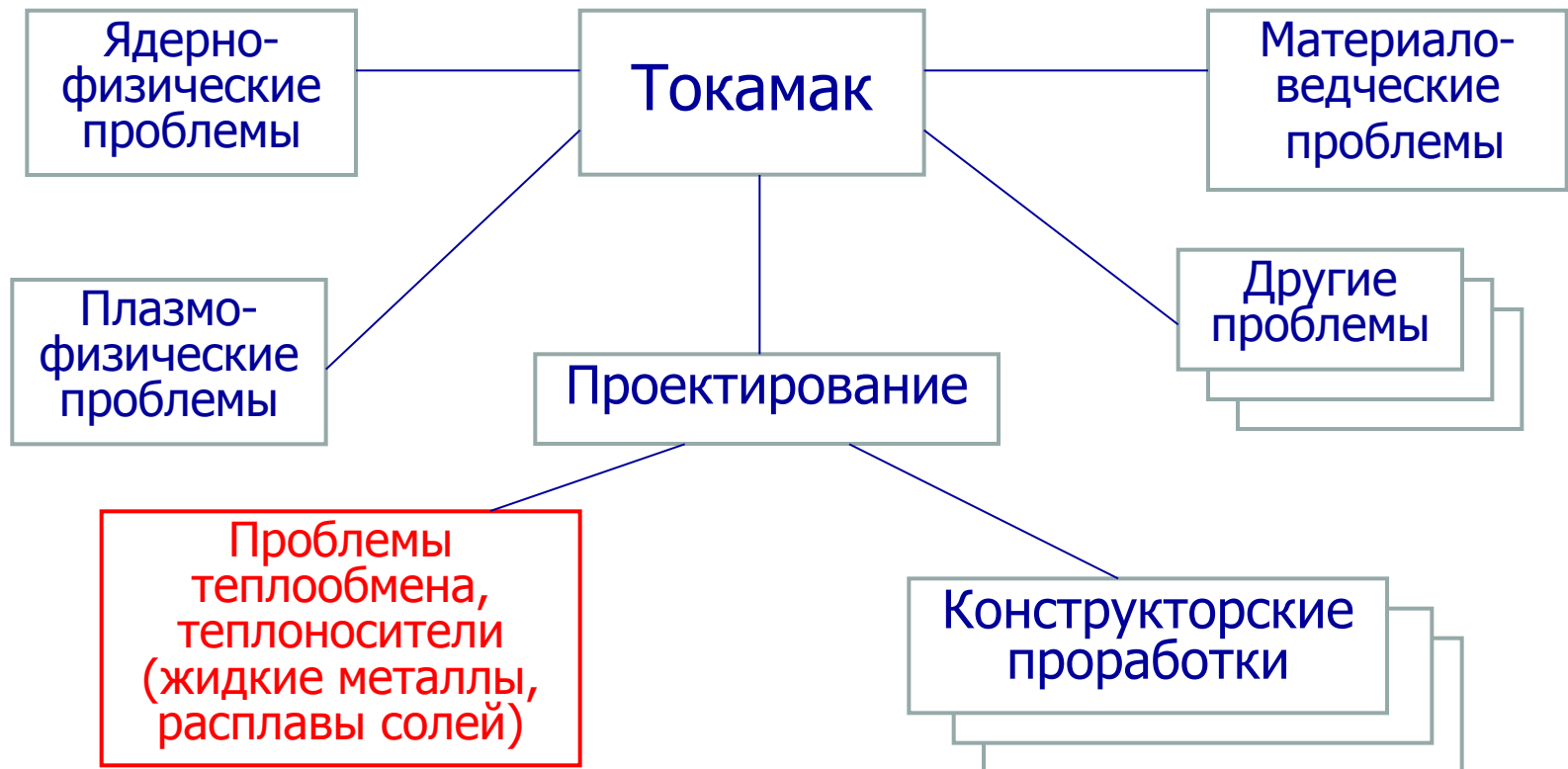
Далее:

- Особенности гидродинамики и теплообмена жидких металлов в реакторе токамаке
- Особенности гидродинамики и теплообмена расплавов солей в реакторе токамаке

# Конфигурации МГД-теплообмена в реакторе токамаке



# Программа развития работ ОИВТ РАН-МЭИ: Теплофизическое обоснование проектирования реакторов-токамаков



Ртуть – **наихудший** теплоноситель среди ЖМ.

По этой причине ртуть – **наилучшая** среди ЖМ рабочая жидкость для лабораторного эксперимента по МГД-теплообмену.

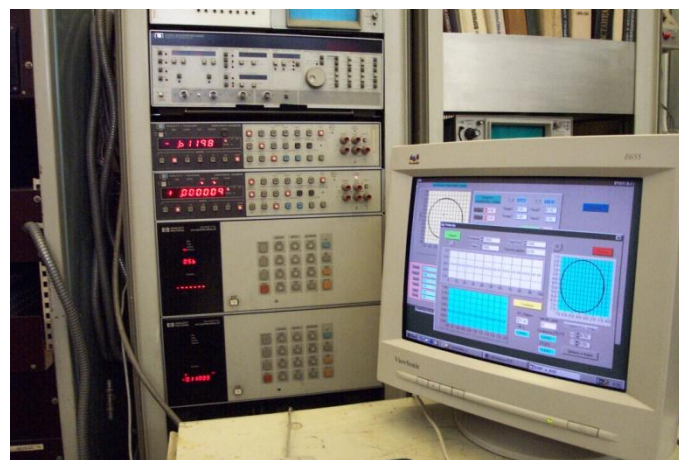
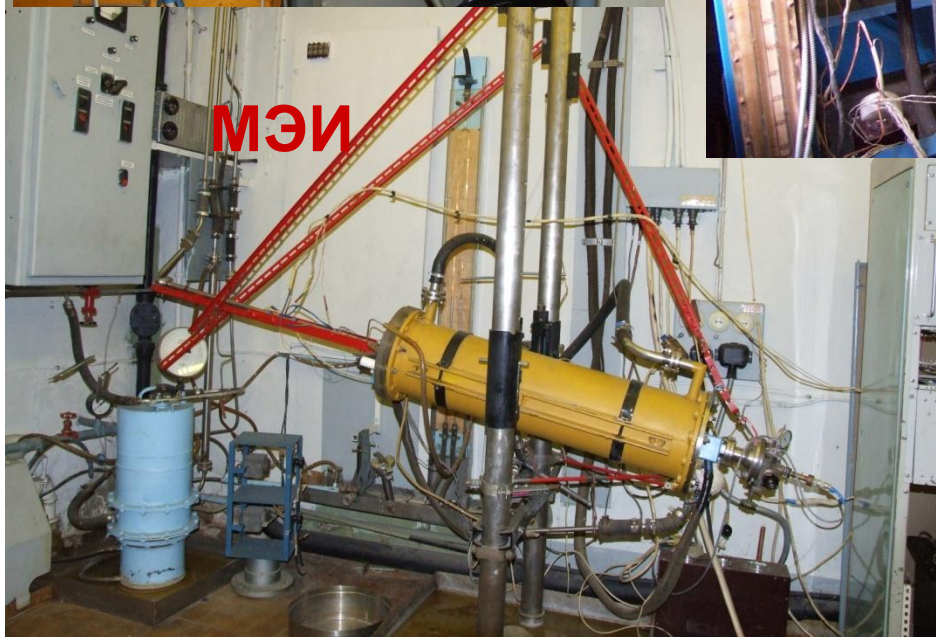
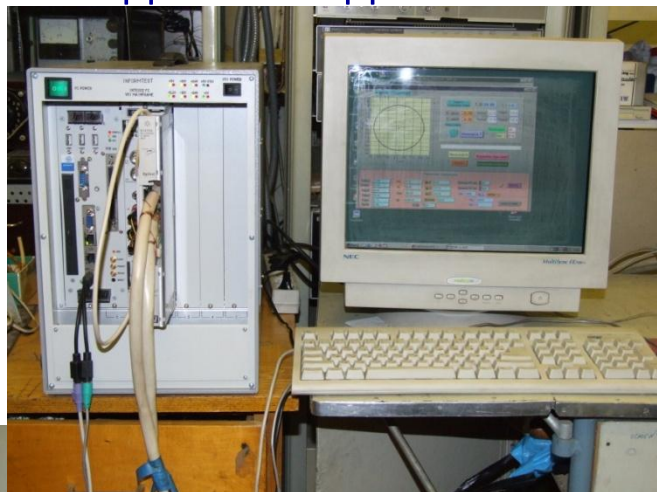
- низкие значения  $\lambda, c_p, \nu$
- слабо окисляется, совместима с водой
- жидкость при комнатной температуре -

Только на ртути – надежные опытные данные с погрешностью  $< 10\%$  для:

- Технического обоснования ядерных энергоустановок
- Верификации компьютерных кодов

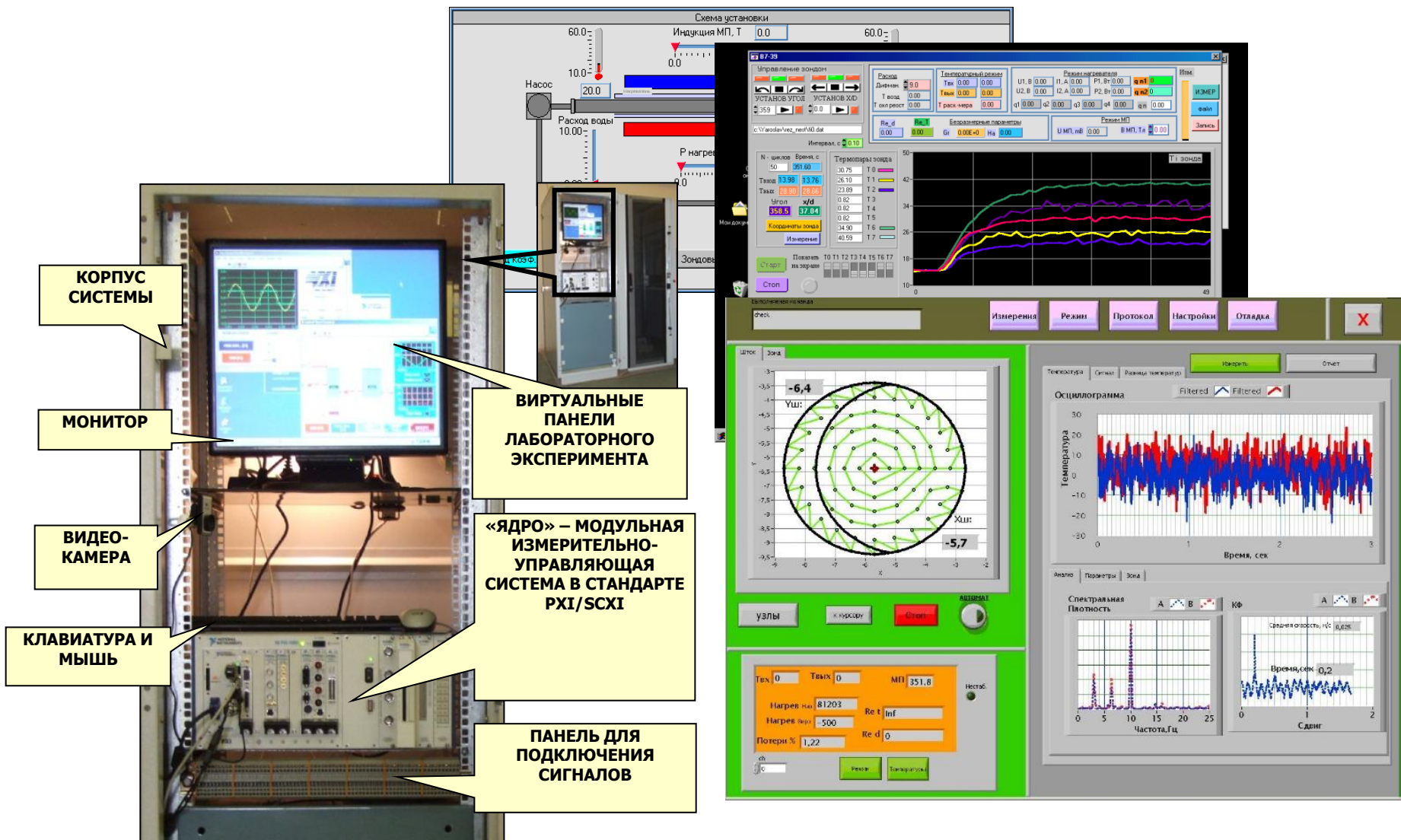


# Объединенный экспериментальный МГД-комплекс МЭИ-ИВТ РАН для исследования теплообмена в продольном и поперечном МП.



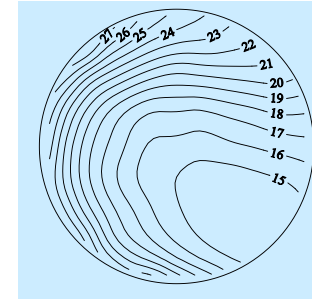
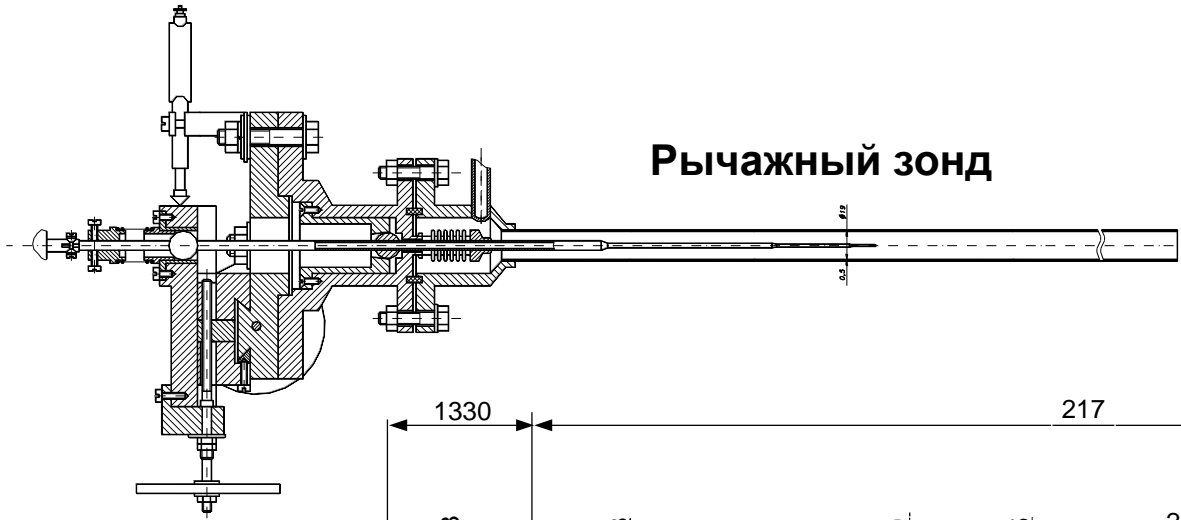


# Современные технологии автоматизированного эксперимента

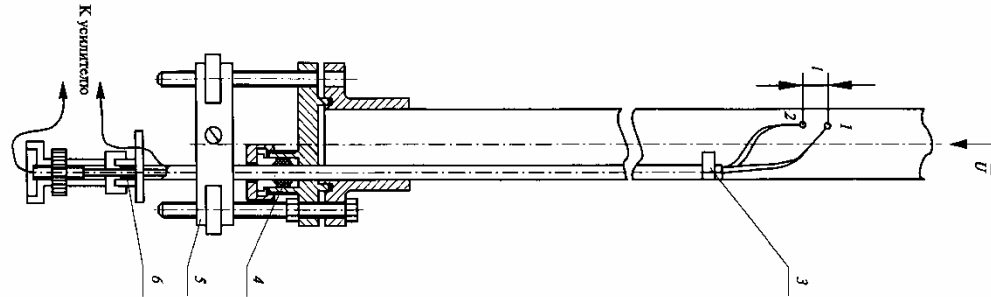
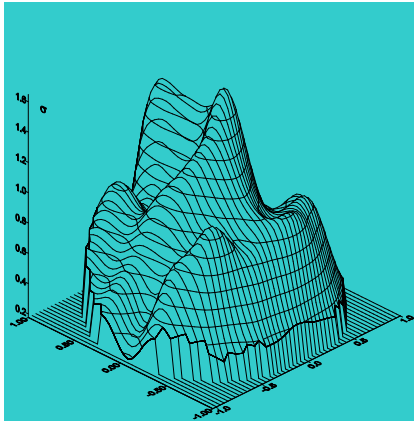
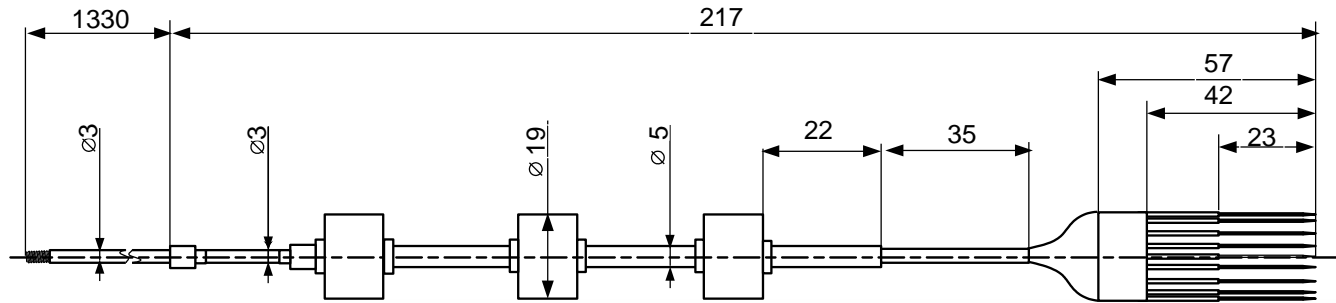


# Зонды

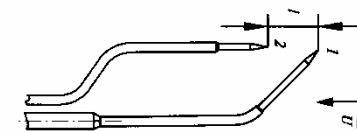
## Рычажный зонд



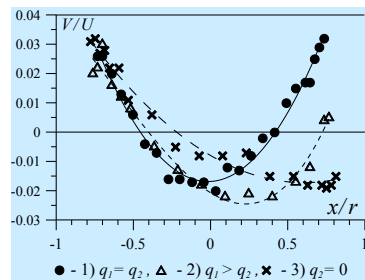
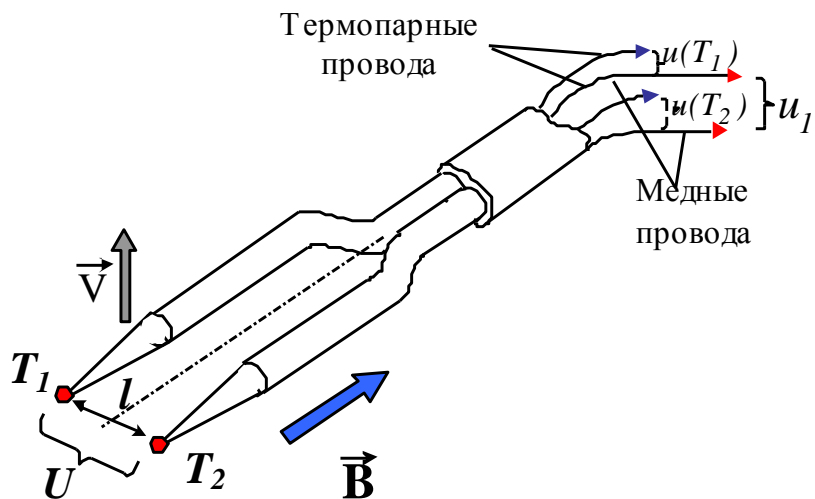
## Продольный типа "гребенка"



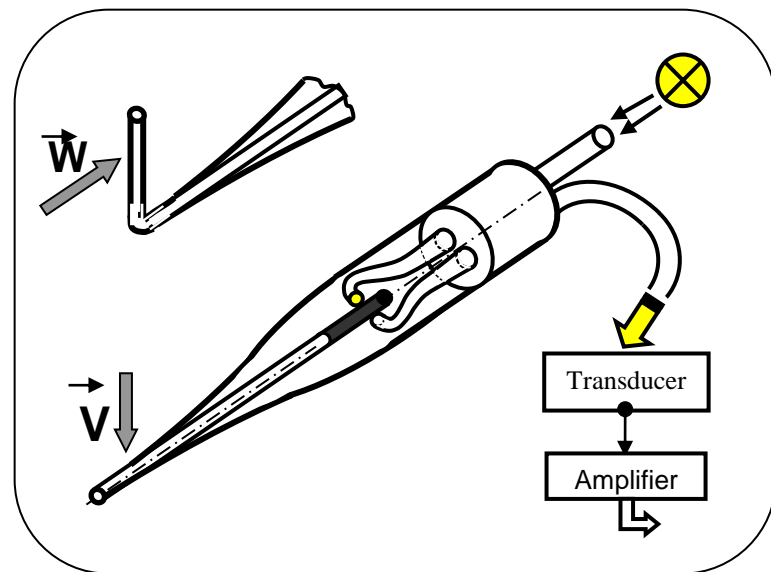
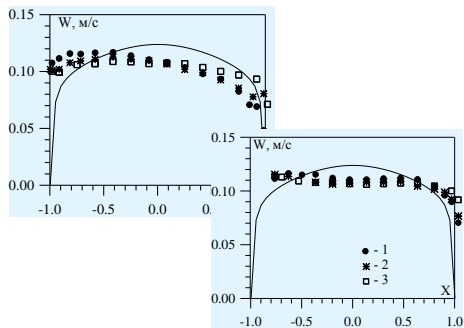
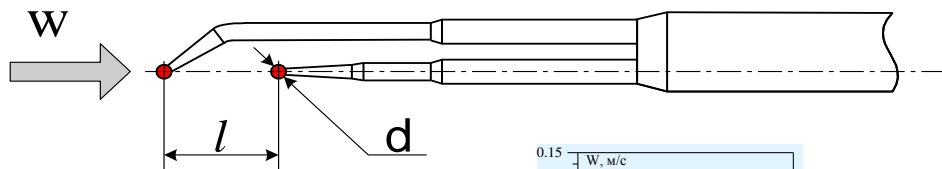
## Продольный, с эксцентрическим стержнем



# Датчики



Электромагнитный датчик скорости с температурной компенсацией



## Аварийно-опасные режимы теплообмена ЖМ в ядерных энергоустановках

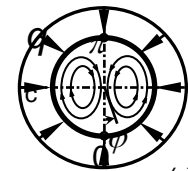
По результатам исследований ОИВТ РАН – МЭИ можно сделать вывод:

**Во всех исследованных конфигурациях теплообмена ЖМ** могут проявляться, по крайней мере, два ранее неизвестных эффекта:

- I) Сильная неоднородность локальных коэффициентов теплоотдачи и температуры стенки по периметру сечения канала, вплоть до образования зон ухудшенного теплообмена – «hot spots».
- II) Пульсации скорости и температуры низкой частоты и аномально высокой интенсивности, проникающие в стенку теплообменника.

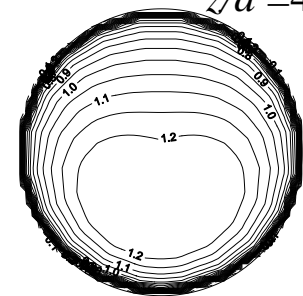
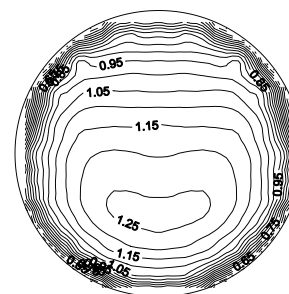
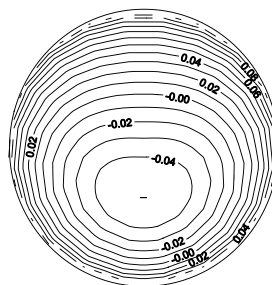
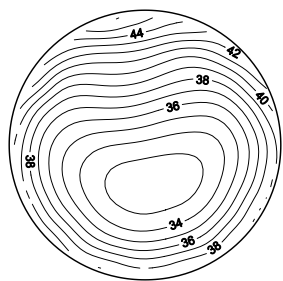
Физическая причина: развитие в потоке крупных вихрей термогравитационного происхождения

Первичные данные зондовых измерений и численного моделирования 3-х мерных полей скорости и температуры – основа для анализа

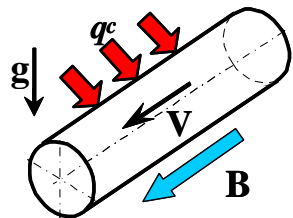


$q_c = 35 \text{ кВт/м}^2$ ,  
 $Gr_q = 0.8 \cdot 10^8$ ,  
 $Re = 35000$

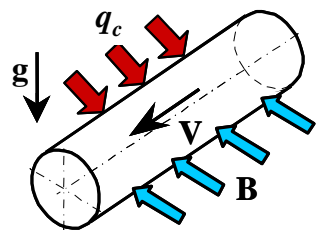
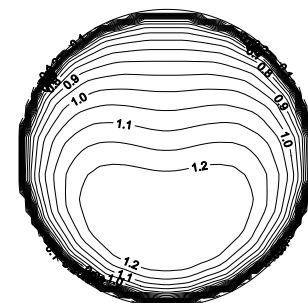
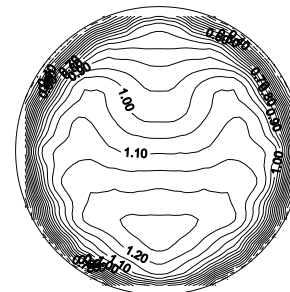
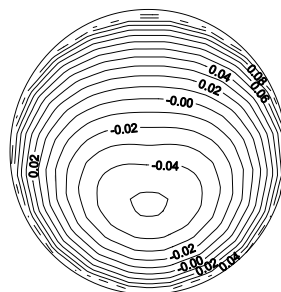
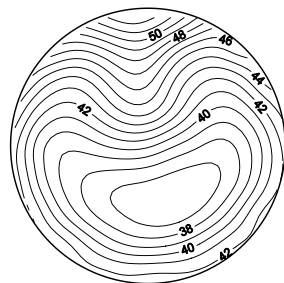
$Ha=0$



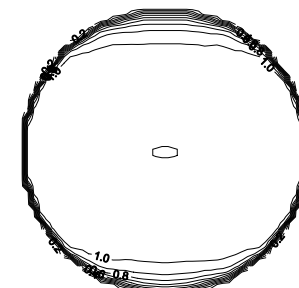
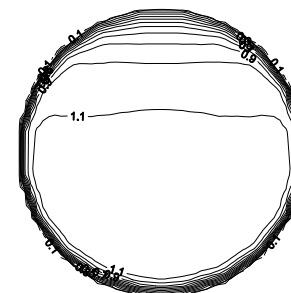
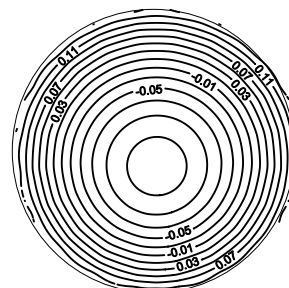
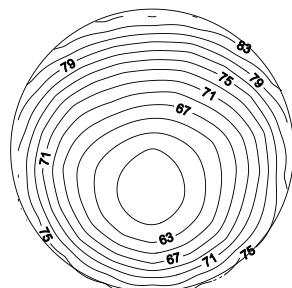
$z/d = 40$



$Ha=300$



$Ha=300$



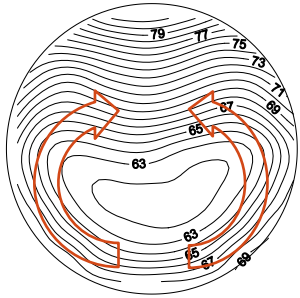
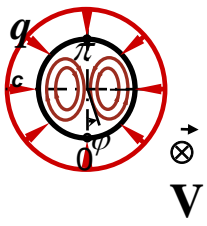
Температура  
эксперимент

Температура  
расчет

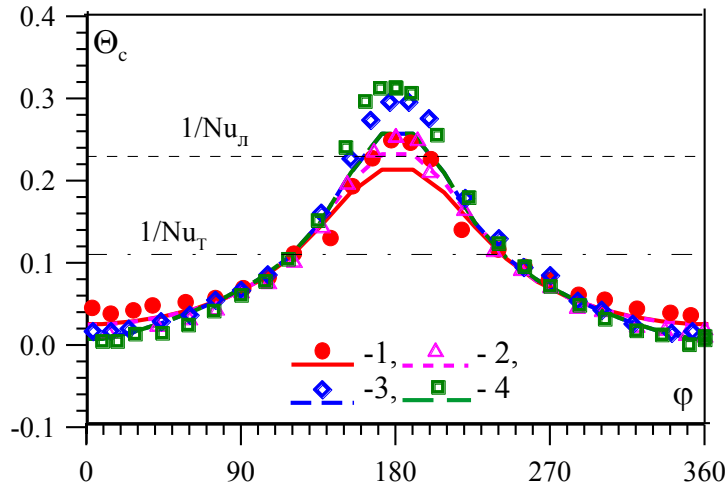
Скорость  
эксперимент

Скорость  
расчет

# Неоднородность теплоотдачи по периметру сечения канала и зоны ухудшенного теплообмена

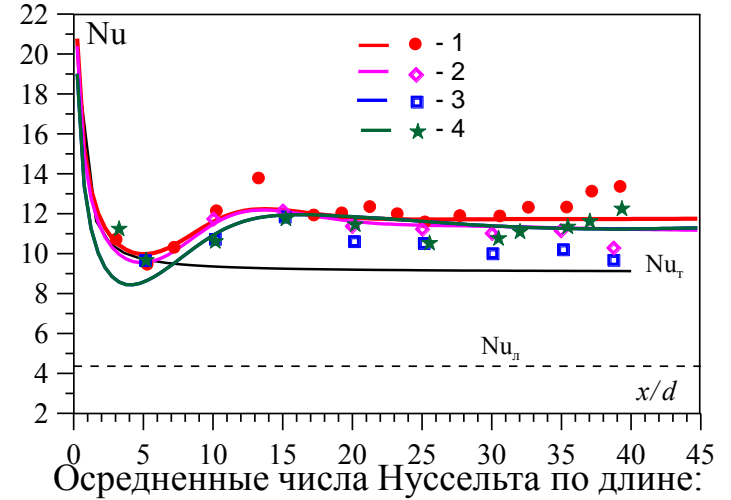
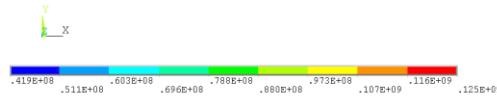


Вторичные термогравитационные течения

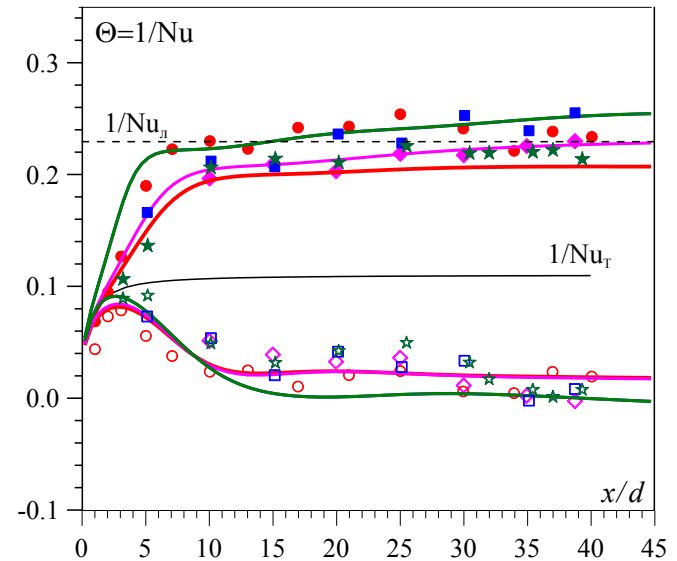


Неоднородность температуры стенки  $\Theta_c$

Неоднородность температуры приводит к изгибу трубы теплообменника токамака

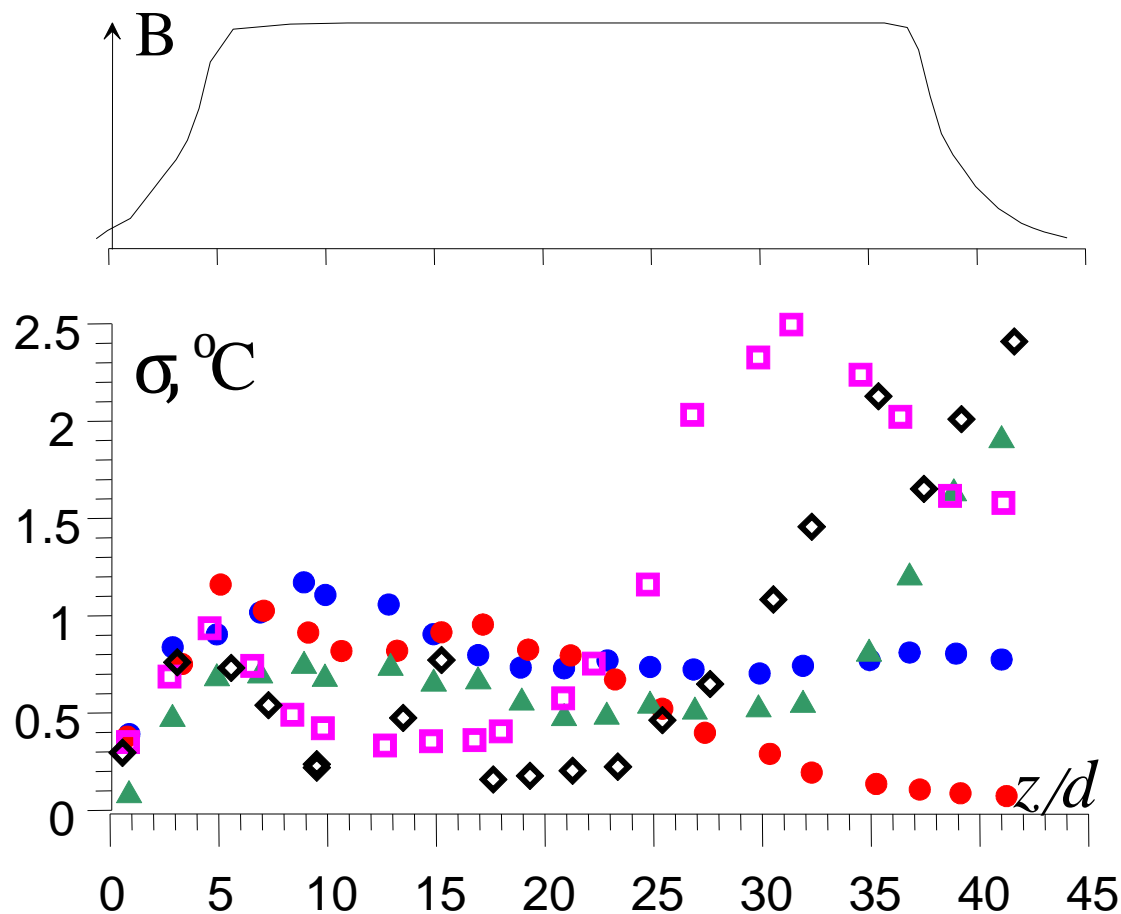


Осредненные числа Нуссельта по длине:  
1) –  $Ha=0$ , 2) 150, 3) 300, 4) 450.

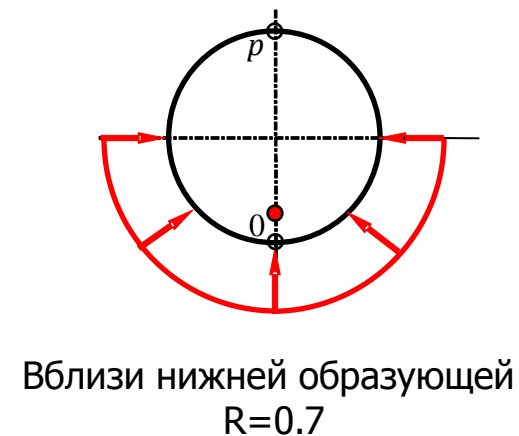


$\Theta$  на верхней (темные символы) и нижней (светлые символы) образующих.

# Необходимость 3D измерений

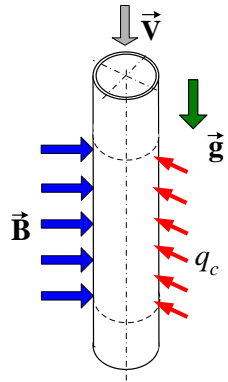


Интенсивность пульсаций температуры по длине канала



$Re=10^4$   
 $Gr_q=0.4 \cdot 10^8$

# Пульсации температуры большой амплитуды в потоке и «термокачка» теплообменника

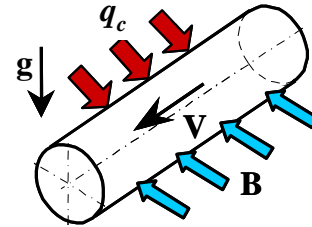


Вертикальная труба

$$q_c = 35 \text{ кВт/м}^2,$$

$$\text{Gr}_q = 0.8 \cdot 10^8$$

$$\text{Re} = 12000$$

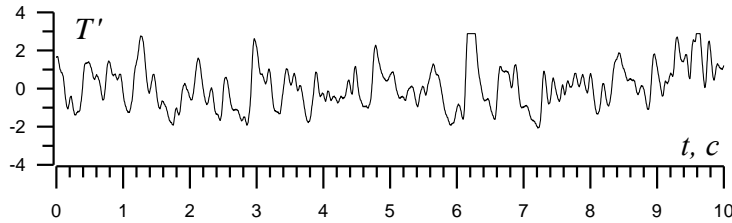
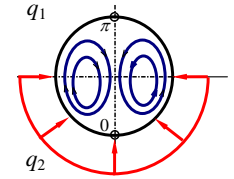


Горизонтальная труба

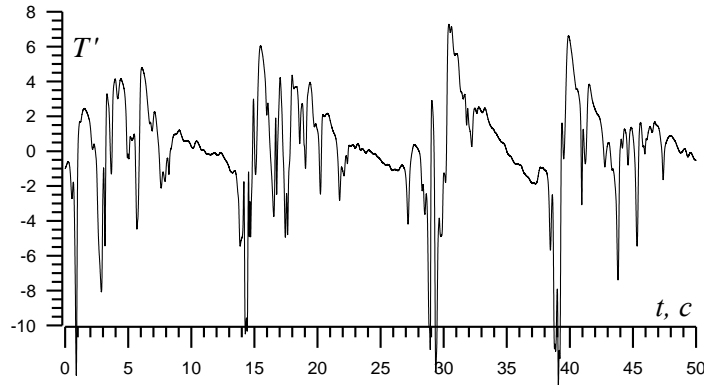
$$q_1/q_2 = 0/35 \text{ кВт/м}^2$$

$$\text{Gr}_q = 0.4 \cdot 10^8$$

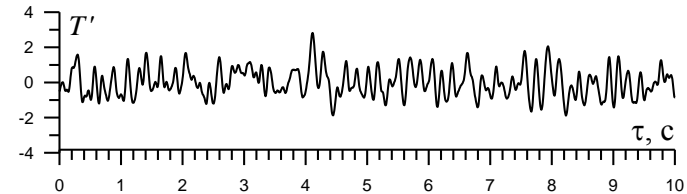
$$\text{Re} = 10000$$



Поперечное МП

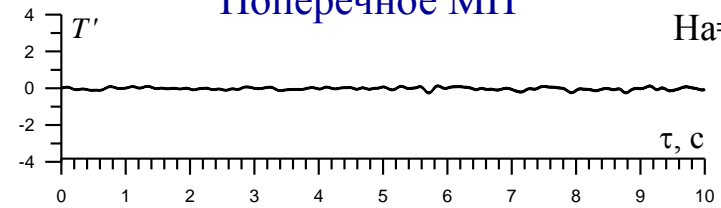


Ha=0

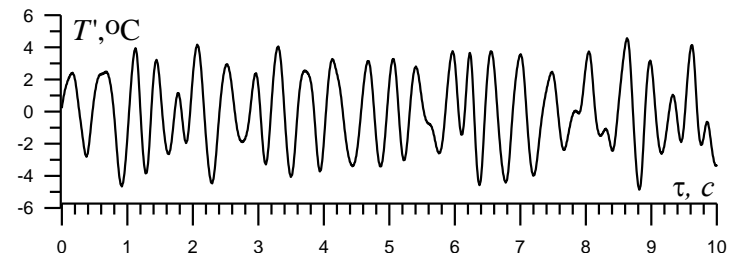


Поперечное МП

Ha=100



Ha=300

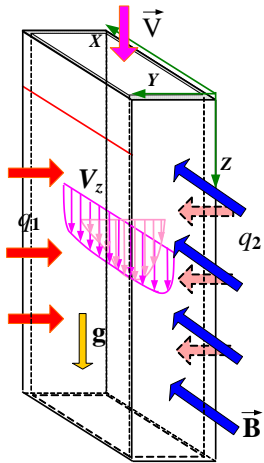




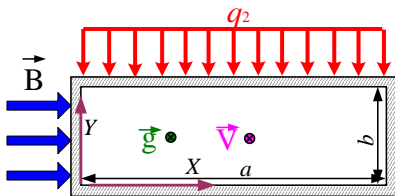
# Пульсации температуры «пробивают» стенку насквозь!

## Осциллограммы пульсаций температуры

Вертикальный канал в компланарном МП



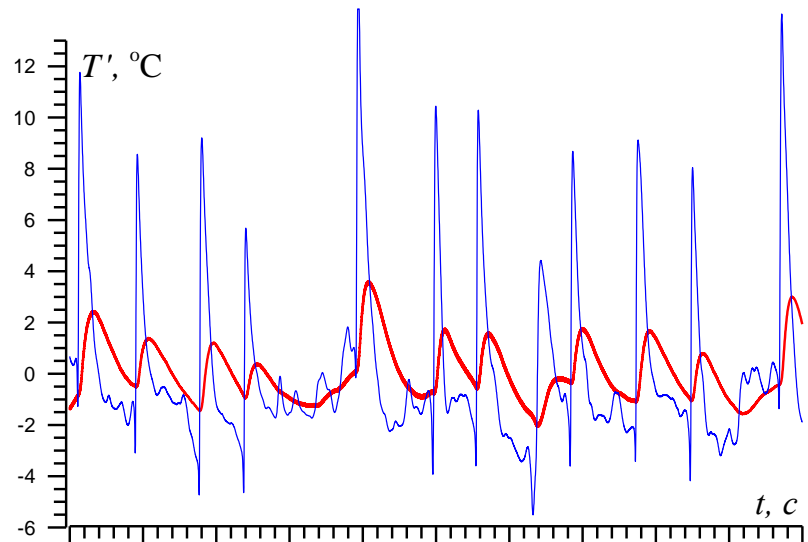
Односторонний обогрев



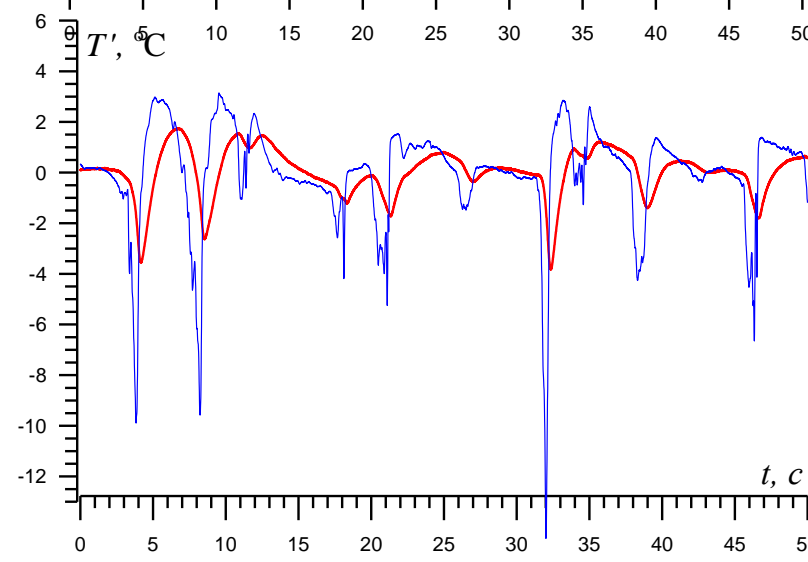
$$q_1/q_2 = 35/0 \text{ кВт/м}^2$$

$$Gr_q = 4 \cdot 10^8$$

$$Re = 30000$$



← с обогреваемой стороны



с наружной стороны стенки

— (red line)

с внутренней (из потока)

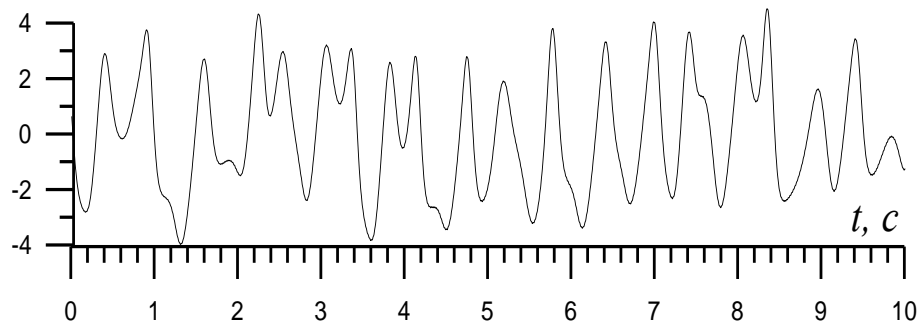
— (blue line)

← Со стороны адиабатической стенки

# Физическое и численное моделирование

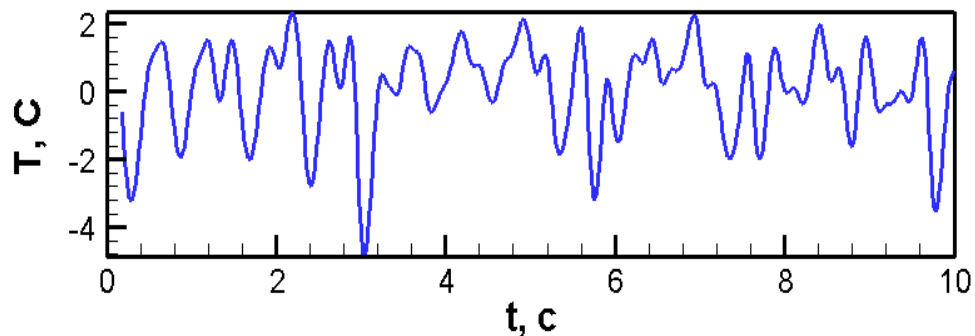
Осциллограммы пульсаций температуры:  $r=0.7R$ , низ,  $x/d=37$

Эксперимент



Характерная частота: 1.8 Hz

Расчет  
DNS



Характерная частота : 1.5 Hz

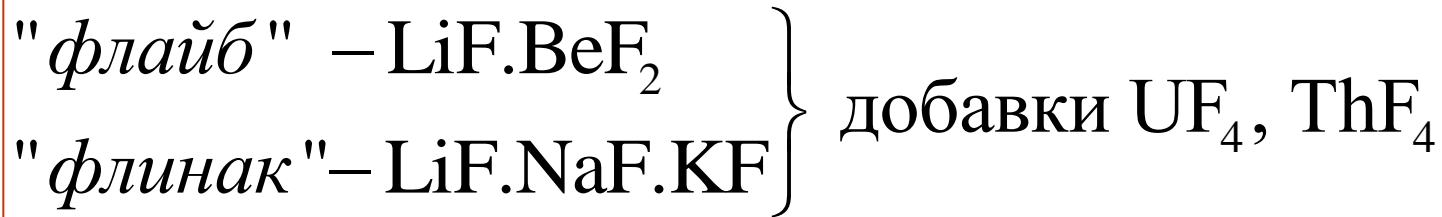
# Расплавы солей – альтернатива жидким металлам?

Вопрос:

В какой мере обнаруженные эффекты проявятся в расплавах солей?

Критерии:  $Re, Pr, Gr, Ha = B_0 d \sqrt{\frac{\sigma}{\eta}}$

## Расплавленные соли:



Преимущества солей: – экологичность  
- отсутствие МГД -потерь

Теплофизические проблемы:

- Высокая температура плавления  $T_{\text{пл}} \sim 450 \text{ }^\circ\text{C}$
- Высокая температура в контуре  $T_{\text{ж}} \sim 550\text{-}600 \text{ }^\circ\text{C}$
- Невысокая температура стенки  $T_{\text{с}} \leq 650\text{-}700 \text{ }^\circ\text{C}$
- Малый рабочий диапазон ( $T_{\text{с}} - T_{\text{ж}}$ )
- Проявятся ли эффекты МГД-теплообмена?

Вывод: необходимо хорошо знать :

- локальные коэффициенты теплоотдачи
- свойства расплавов солей

# Свойства расплавов солей и других теплоносителей

Table 1.1. Some thermophysical properties of molten salts of interest and a few others for reference.

Molten salt coolant	Mol % (Wt. %)	Formula weight (g/mol)	Freezing/Melting Point (K)	Boiling Point (K)	Thermophysical Properties				
					Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific Heat Capacity (J/kg K)	Viscosity (Pa·s)	Thermal conductivity (W/m K)	Prandtl No.
LiF-NaF-KF (FLiNaK)	46.5-11.5-42 (29-12-59)	41.3	727	1843	2020	1882.8	0.0029	0.92	5.938
LiF-BeF <sub>2</sub>	67-33 (53-47)	33.0	733		1940	2414.17	0.0056	1.0	13.525
KCl-MgCl <sub>2</sub>	68-32 (62-38)	81.44	708		1664	1158.97	0.0014	0.40	4.0
NaNO <sub>3</sub> -NaNO <sub>2</sub> -KNO <sub>3</sub> @ 400°C	7-49-44 (7-40-53)	1.77-1.98	415		1790	1560	0.0013-0.0016	0.51-0.605	
NaNO <sub>3</sub> -KNO <sub>3</sub> @ 400°C	48-52	93.37	495		1840	2660.19	0.0017	0.55	8.222
LiF-NaF-BeF <sub>2</sub>		38.9	588		2000	2045.98	0.005	0.97	10.551
LiF-NaF-RbF		67.7	708		2690	987.42	0.0026	0.62	4.14
NaF-BeF <sub>2</sub>		44.1	613		2010	2175.68	0.007	0.87	17.513
H <sub>2</sub> O @ 20°C		18	273		1000	4184	0.001	0.6	7
He (P = 7.5 MPa)		4			3.8	5505.31	0.000042	0.29	0.8
Na @ 550°C		23	370.8		820		0.00023	62	0.004

Engineering Database of Liquid Salt Thermophysical and thermochemical Properties  
 M.S. Sohal, M.A.Ebner, P. Sabharwall, P. Sharpe. March 2010. Idaho National Laboratory.  
 INDEX-10-18297

Автореферат на соискание степени д.т.н. **ИГНАТЬЕВ ВИКТОР ВЛАДИМИРОВИЧ**  
 СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК И БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ ВЫБОРА И  
 УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЖИДКОСОЛЕВЫХ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ И  
 ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ. Москва 2007г.

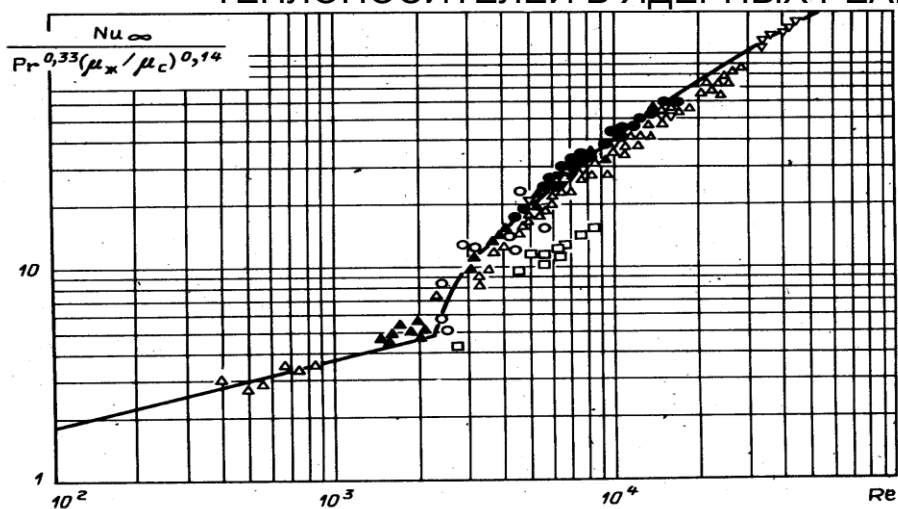
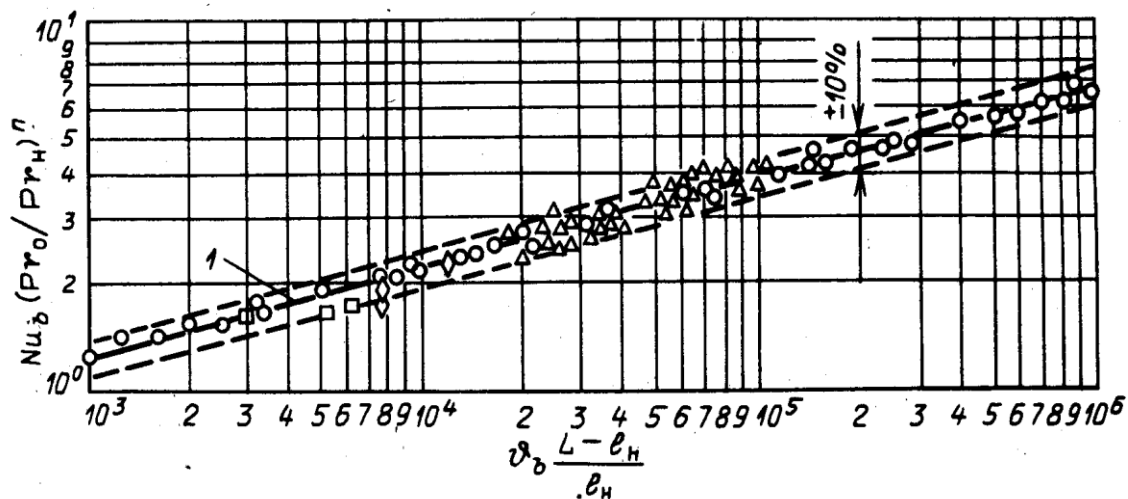


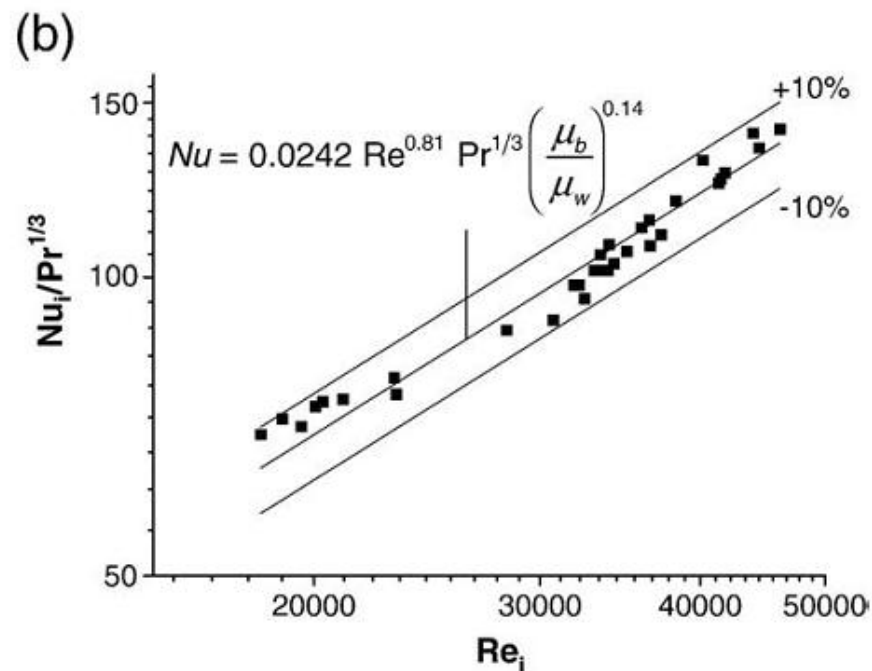
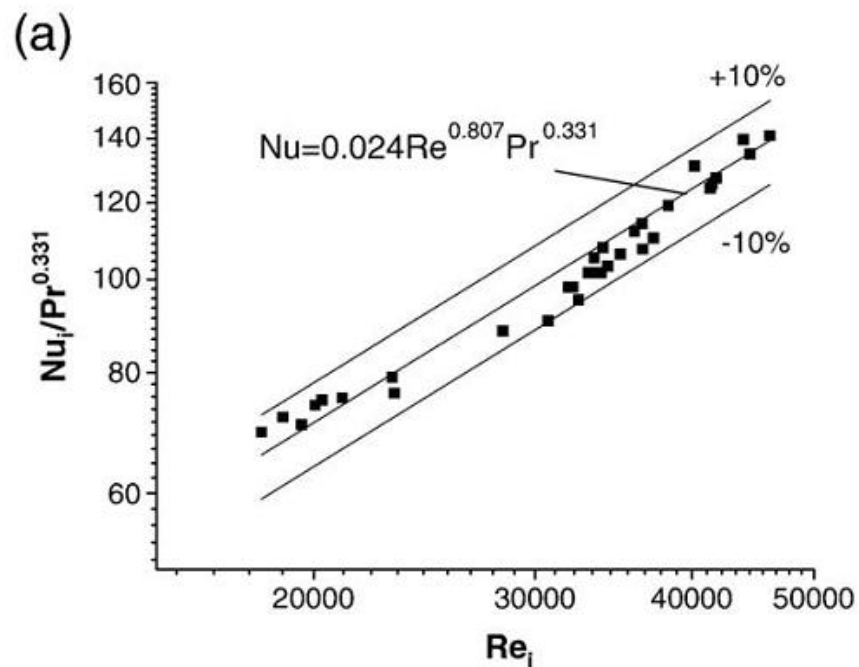
Рис. 5.1. Сравнение опытных данных (настоящая работа ●- LiF-NaF-KF) и ORNL:  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$  - LiF-BeF<sub>2</sub>-ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub>;  $\nabla$  - NaF-NaBF<sub>4</sub>;  $\square$  - LiF-NaF-KF в трубе из инконеля;  $\blacktriangledown$ ,  $\circ$  - то же в трубе из стали 316 и никеля) по теплоотдаче расплавов фторидных солей с обобщающими зависимостями (линия): Хаузена (2200 < Re < 10000) и Зидера—Тэйта (10000 < Re < 50000)



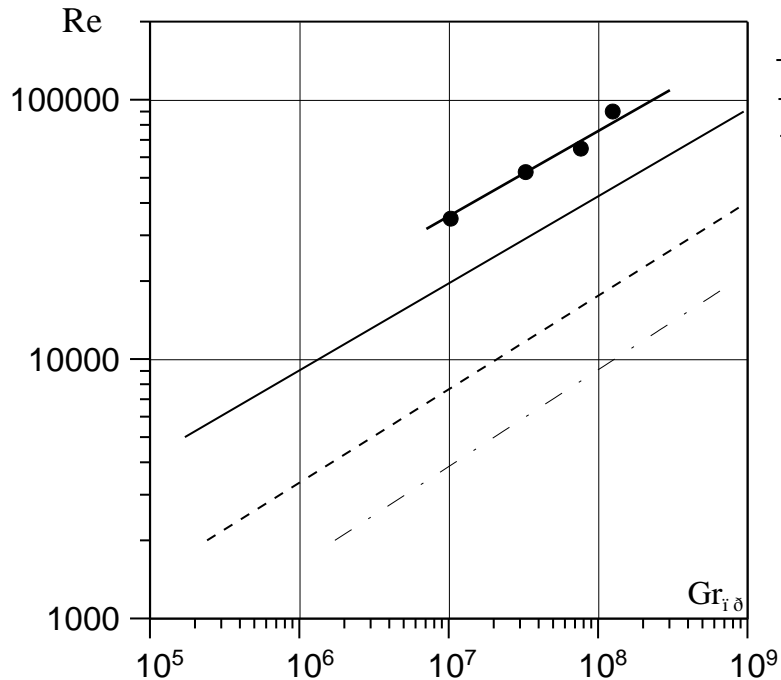
Зависимость  $Nu_b$  от определяющего параметра  $ub(L-l_n)/\ln$  для вертикального термосифона со вставкой при раздельном и совместном действии в зоне нагрева объемных источников тепла в жидкости ( $qv$ ) и потока тепла через стенку ( $q_{сн}$ ): LiF-BeF<sub>2</sub>-UF<sub>4</sub> ( $\diamond$  -  $q_{сн} = \text{const}$ ;  $qv = 0$ ;  $\square$  -  $t_{сн} = \text{const}$ ,  $qv = 0$ ;  $\Delta$  -  $qv > 0$ ,  $q_{сн} > 0$ );  $\circ$  - дистиллированная вода ( $q_{сн} = \text{const}$ ); 1 - расчет по уравнению

# Осредненные коэффициенты теплоотдачи расплавов солей

Engineering Database of Liquid Salt Thermophysical and thermochemical Properties  
M.S. Sohal, M.A.Ebner, P. Sabharwall, P. Sharpe. March 2010. Idaho National Laboratory.  
INDEX-10-18297



# Порог влияния свободной конвекции в горизонтальных трубах



- - 1
- - - - 2
- · - · - 3
- - 4

формула Петухова - Полякова

$$Gr_{кр} = 30 \cdot 10^{-5} Pr^{0.5} Re^{2.75} \left( 1 + 2.4 \frac{(Pr^{2/3} - 1)}{Re^{1/8}} \right)$$

- 1 - По формуле для **Pr=0.025**;
- 2 - **Pr=0.8**;
- 3 - **Pr=4**;
- 4 - эксперимент.

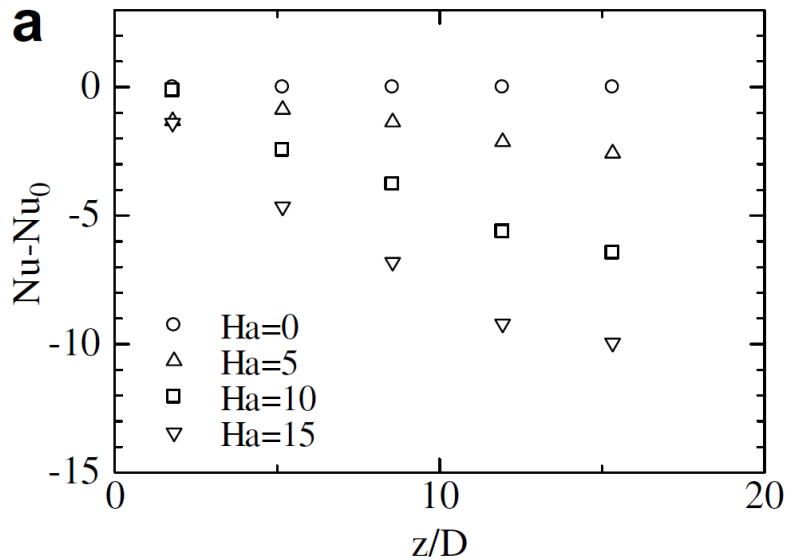


# Влияние МП, модельная жидкость

**Table 2**

Thermophysical properties of aqueous KOH solution and Flibe.

		KOH solution (33.8 °C)	Flibe (600 °C)
$\rho$	Density (kg/m <sup>3</sup> )	$1.28 \times 10^3$	$2.12 \times 10^3$
$\mu$	Viscosity (Pa s)	$1.431 \times 10^{-3}$	$11.6 \times 10^{-3}$
$\nu$	Kinematic viscosity (m <sup>2</sup> /s)	$1.118 \times 10^{-6}$	$5.48 \times 10^{-6}$
$\sigma$	Electrical conductivity (S/m)	73.67	155
$\lambda$	Heat conductivity (W/(m K))	0.727	1.00
$C_p$	Heat capacity (J/(kg K))	$3.00 \times 10^3$	$2.34 \times 10^3$
$Pr$	Prandtl number	5.90	28

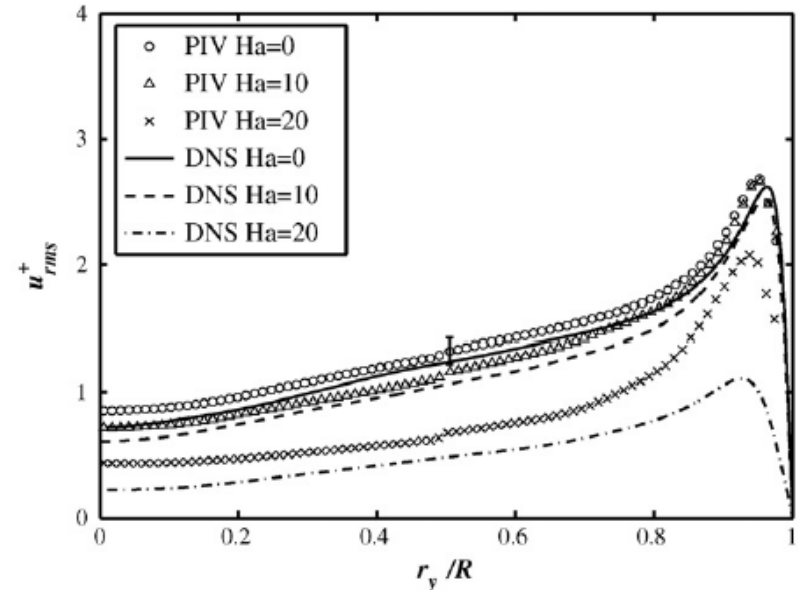


Локальные числа Нуссельта  $Re=5000$ ,  $Pr=6.2$

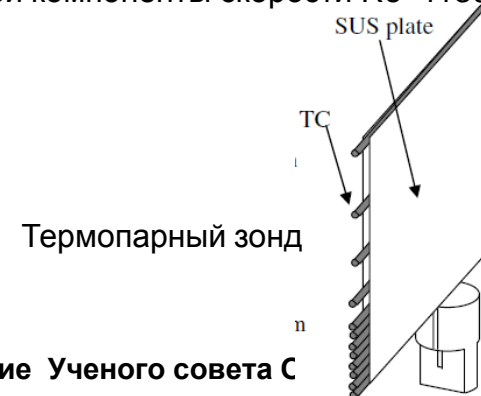
Experimental study of MHD effects on turbulent flow of Flibe simulant fluid in circular pipe

Junichi Takeuchi<sup>a,\*</sup>, Shin-ichi Satake<sup>b</sup>, Neil B. Morley<sup>a</sup>, Tomoaki Kunugi<sup>c</sup>,

США (UCLA) и Япония, М.А Abdou, N.B.Morley et. al. 2006-2008



Безразмерная интенсивность пульсаций продольной компоненты скорости  $Re=11300$



# Конструкция экспериментального стенда МЭИ.

Измерительный зонд

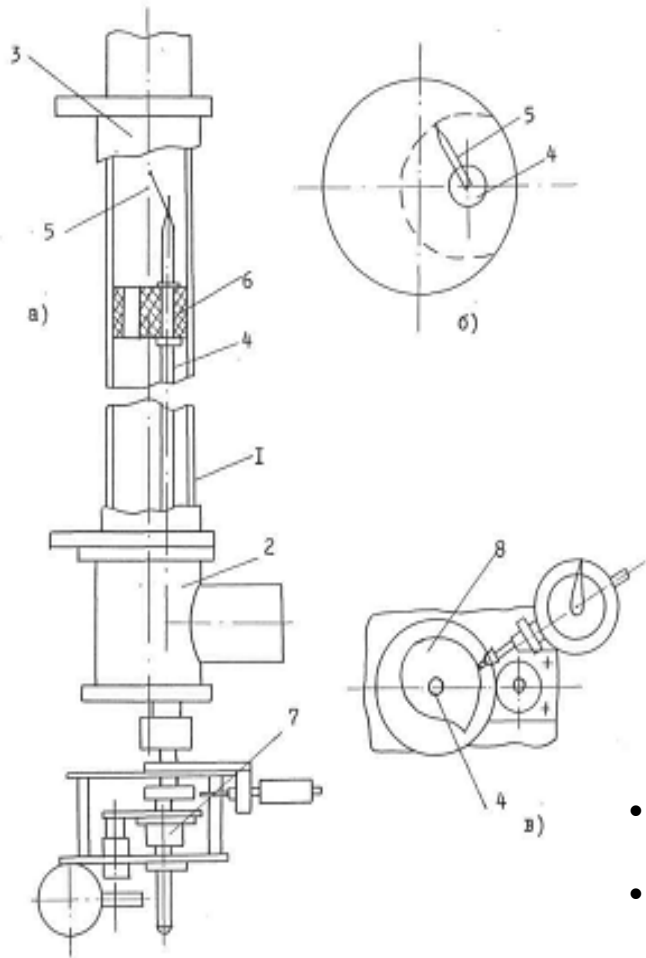
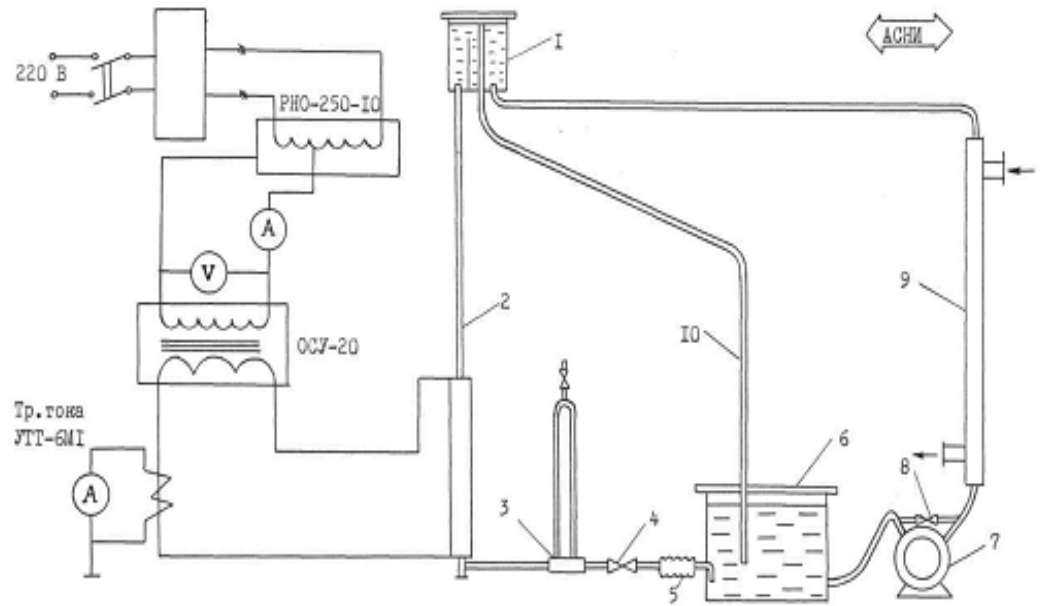


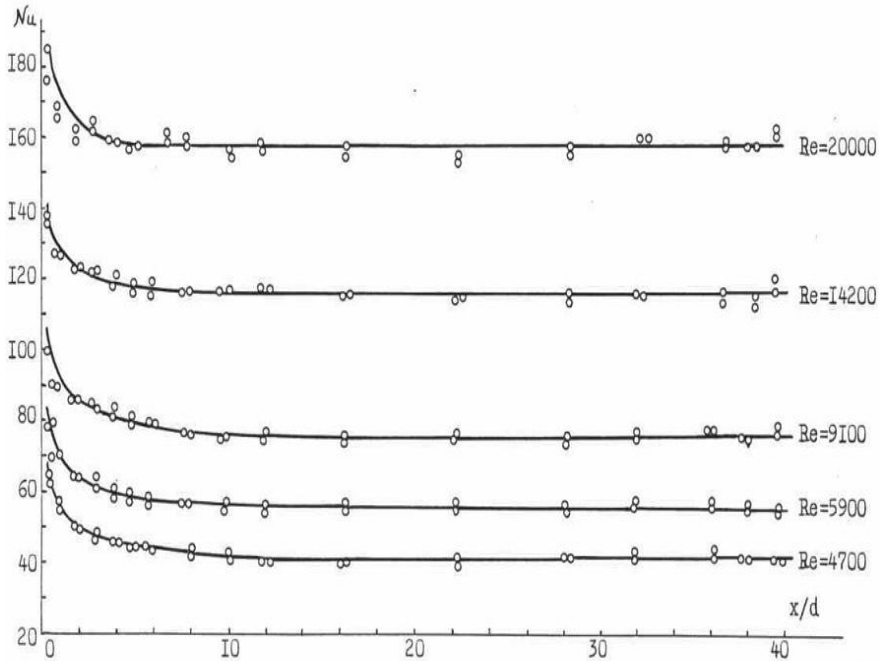
Схема водного экспериментального стенда



1 - напорный бак; 2 - рабочий участок; 3 - расходомер; 4 - регулировочный вентиль; 5 - сиффон;  
6 - резервуар; 7 - насос ВК-1; 8 - перепускной вентиль; 9 - холодильник; 10 - линия перелива

- размер саяя термопары 10 мкм
- погрешность установки термопары в потоке 10 мкм

# Опытные данные по теплоотдаче для воды

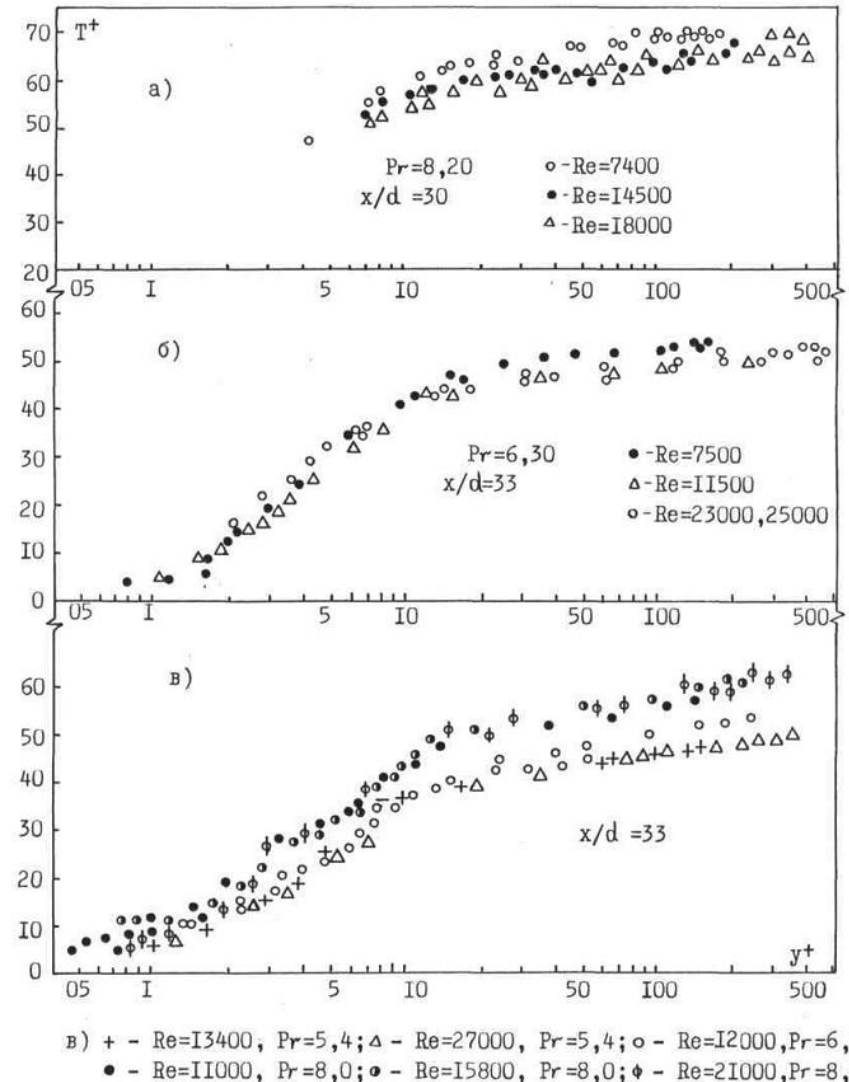


Локальные коэффициенты теплоотдачи (числа Нуссельта) по длине при различных  $Re$

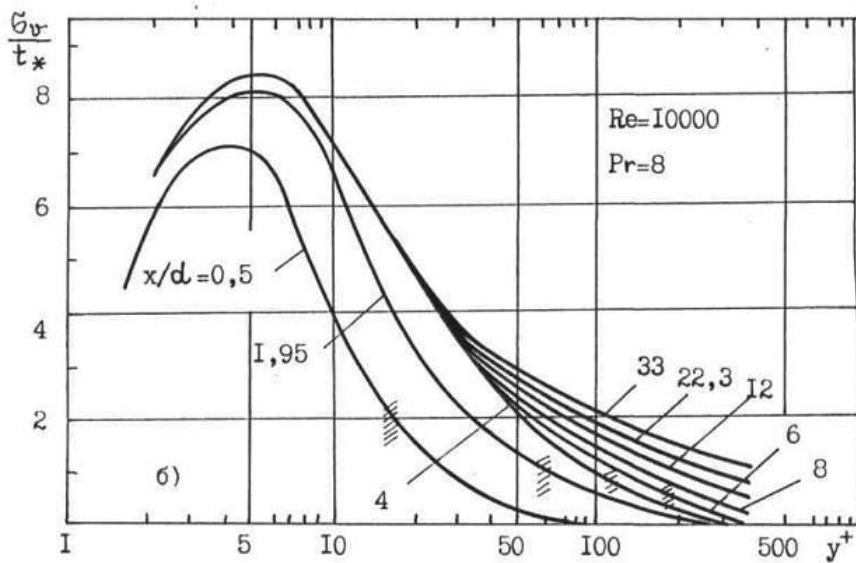
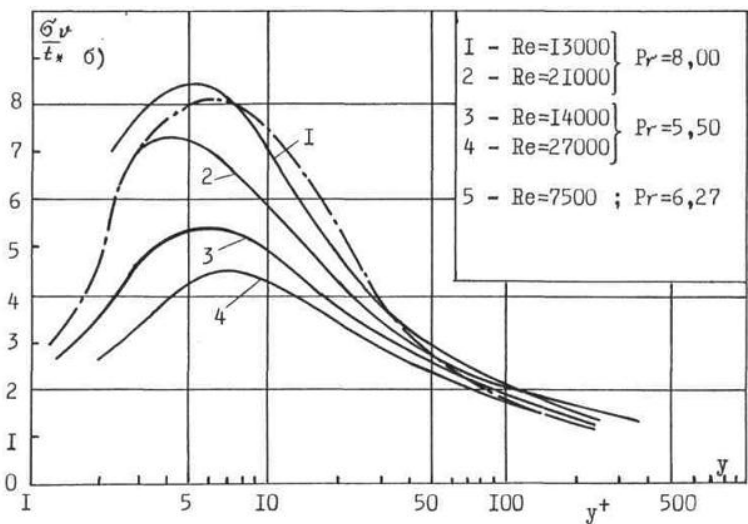
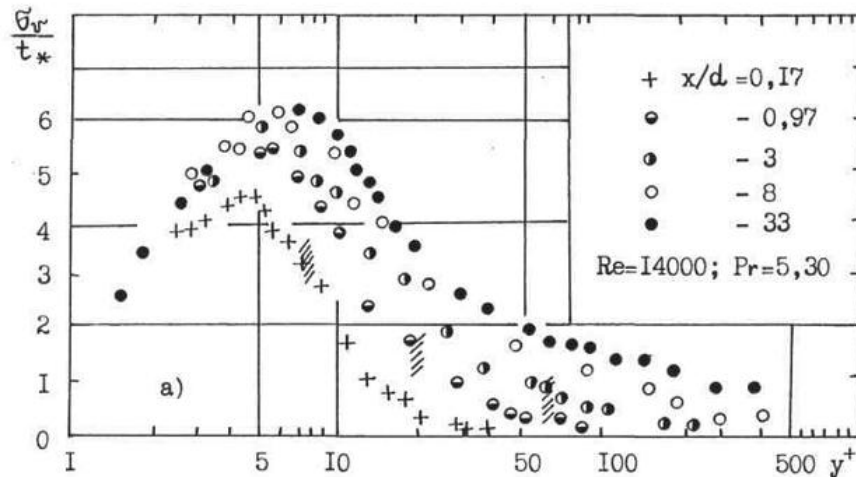
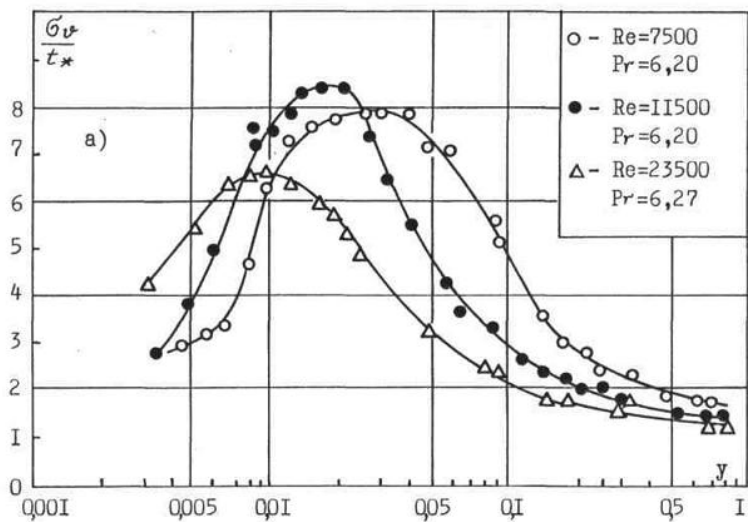
$$T^+ = (T_c - T) / t_*$$

$$t_* = q_c / \rho C_p v_*$$

## Безразмерные профили температуры



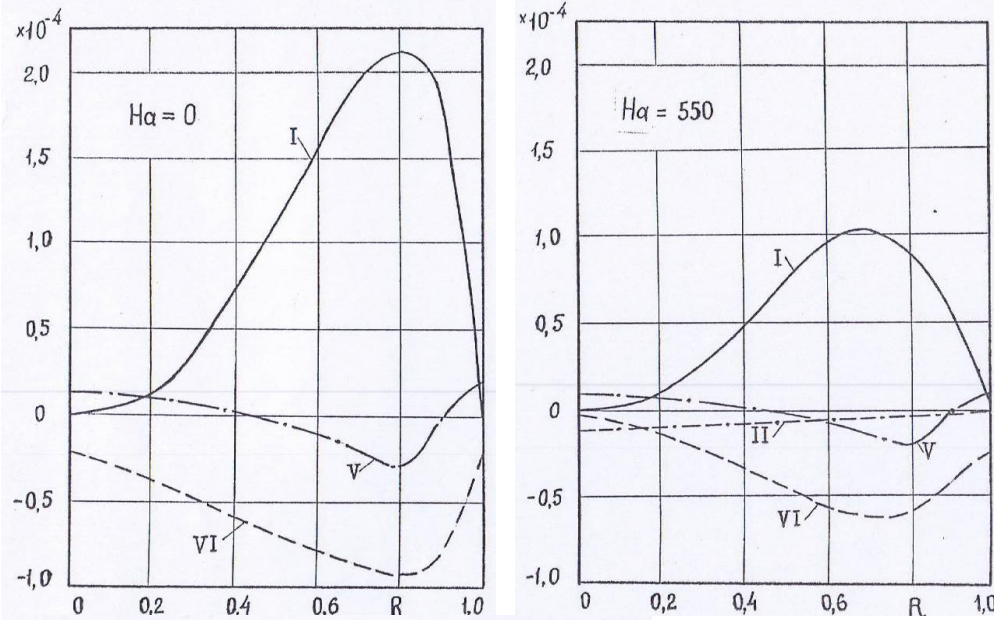
# Опытные данные по пульсациям температуры для воды



Профили интенсивности пульсаций температуры  $x/d=33.5$

# Модель МГД- турбулентности в продольном магнитном поле

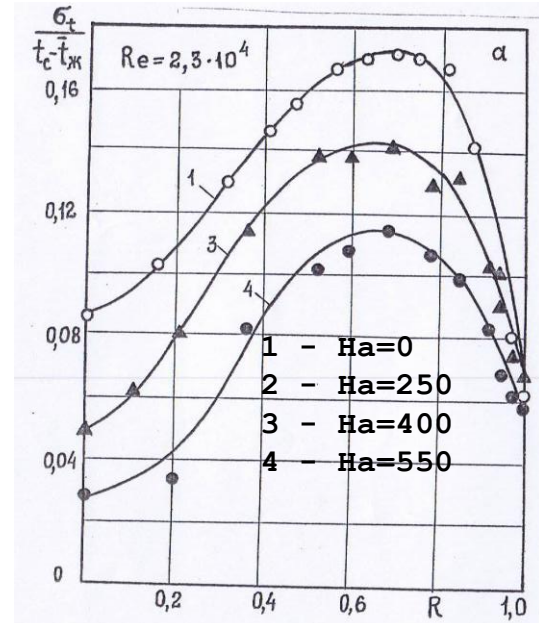
Баланс энергии температурных пульсаций



I – порождение; II – конвекция;  
 У – молекулярная диффузия, UI – диссипация.

$$(\varepsilon_{\sigma}/\nu)_{Ha} = \gamma(Re, Ha) \cdot (\varepsilon_{\sigma}/\nu)_0$$

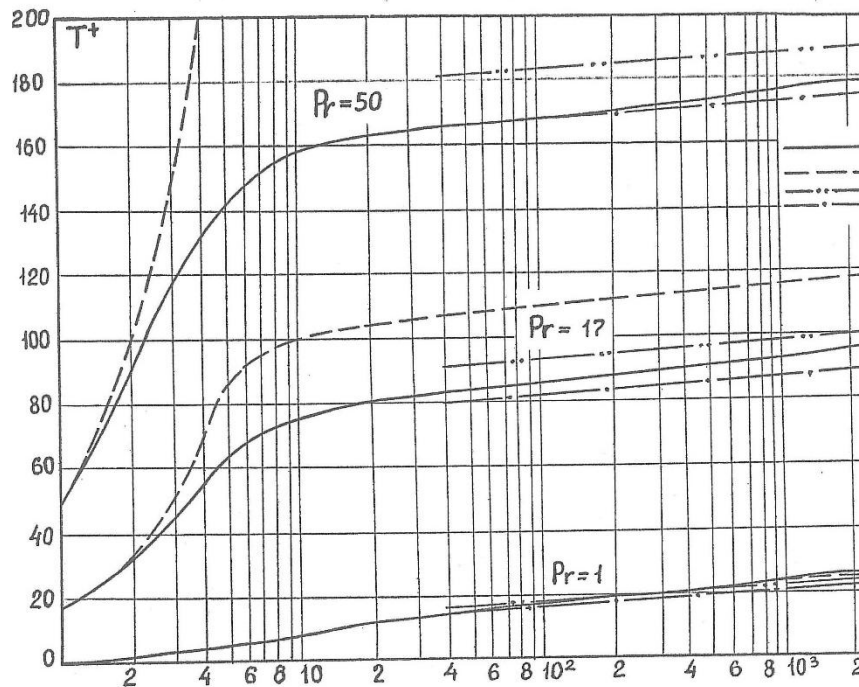
Интенсивность пульсаций температуры



$$\gamma = \begin{cases} 1 - \exp\left(-k \left(\frac{Re - Re_{кр,Ha}}{Re_{кр,Ha}}\right)^n\right) & \text{для } Re > Re_{кр,Ha} \\ \gamma = 0 & \text{для } Re \leq Re_{кр,Ha} \end{cases}$$

где  $\begin{cases} k = 11/Na^{0,4}, n = 0,5 & \text{для } 40 \leq Na \leq 200 \\ k = 14/Na^{0,42}, n = 0,6 & \text{для } 200 \leq Na \leq 1000 \end{cases}$

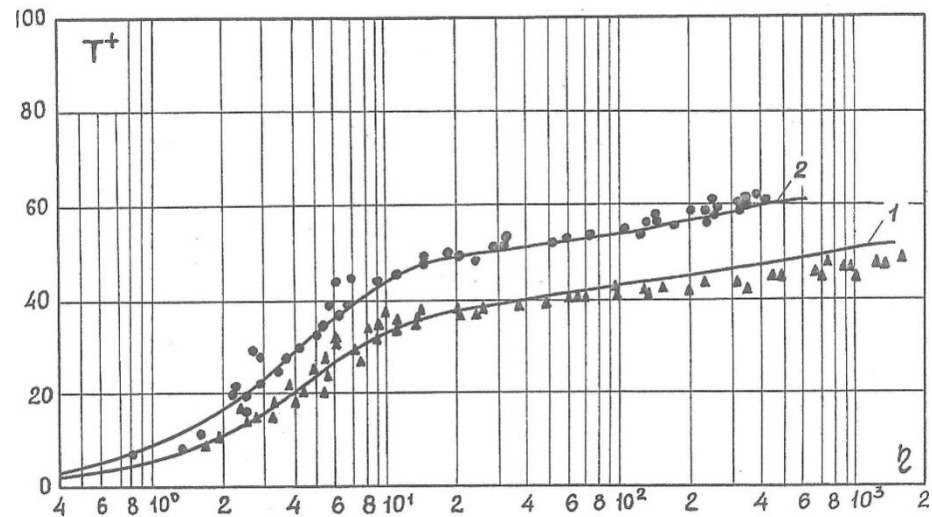
# Расчет полей температуры для расплавов солей



а - настоящий расчет; по формулам: б - (3.7); в - (3.8, 3.9); г.

Рис. 3.10

Безразмерные профили температуры для воды

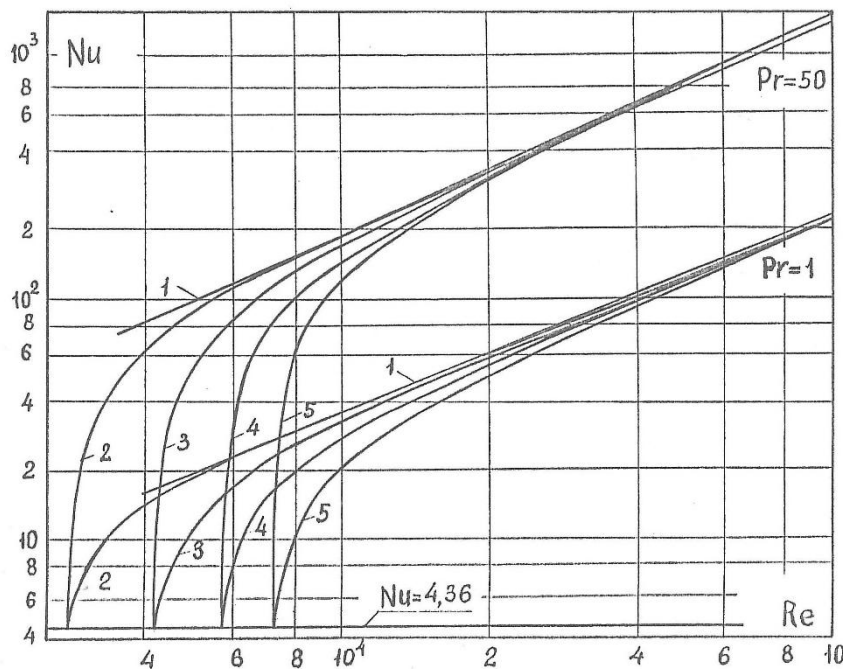


1 - расчет для  $Pr = 5,35$ ;  $Re = 6,4 \cdot 10^4$ ; точки - по данным /79/;  
2 - расчет для  $Pr = 8,0$ ;  $Re = 2,1 \cdot 10^4$ ; точки - по данным /80/.

Рис. 3.11

# Расчет МГД-теплообмена для расплавов солей

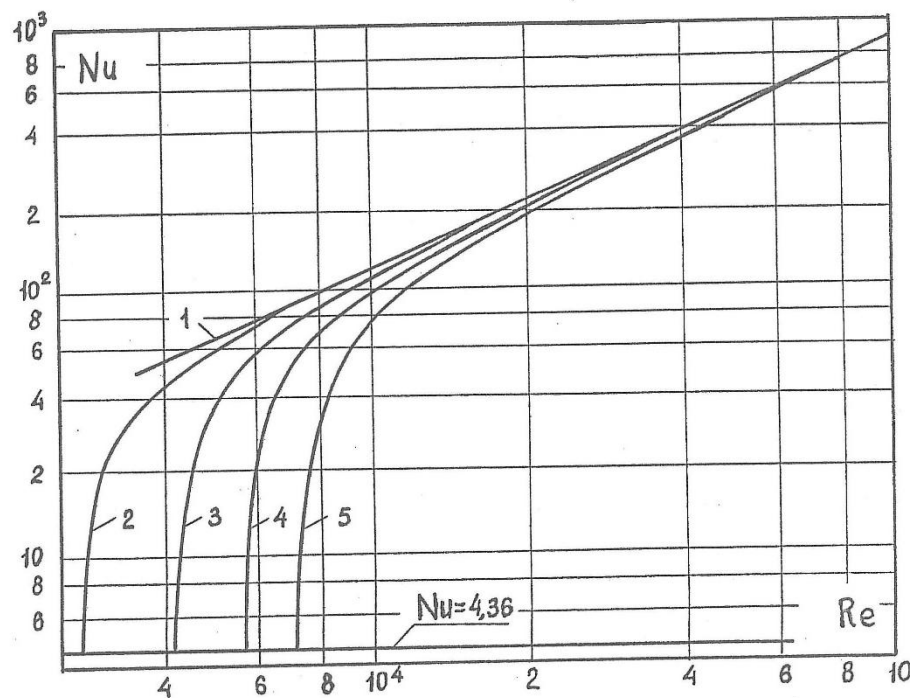
Результаты расчета теплообмена при  $Pr = 1; 50$ .



I - по формуле (3.5);  $Na$ : 2 - 40,4; 3 - 93,5; 4 - 146; 5 - 200.

Рис. 3.8

Результаты расчета теплообмена для флайба.  $Pr = 17$



I - по формуле (3.5);  $Na$ : 2 - 40,4; 3 - 93,5; 4 - 146; 5 - 200.

Рис. 3.9

# ВЫВОДЫ

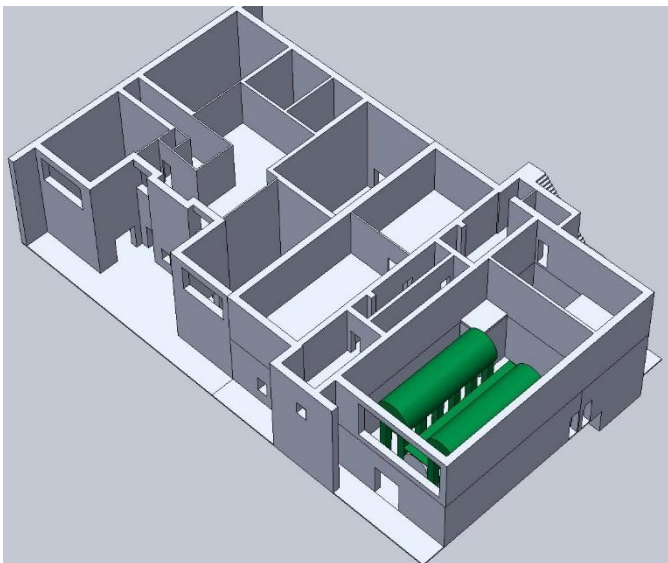
1. Конфигурации МГД-течений и теплообмена жидких металлов многообразны.
2. В ряде МГД - конфигураций обнаружены:
  - крайне неравномерное распределение локальных коэффициентов теплоотдачи, с образованием зон ухудшенного теплообмена
  - низкочастотные пульсации температуры неожиданно высокой амплитуды вблизи стенки.

Эффекты неблагоприятны, но нельзя ли их использовать?

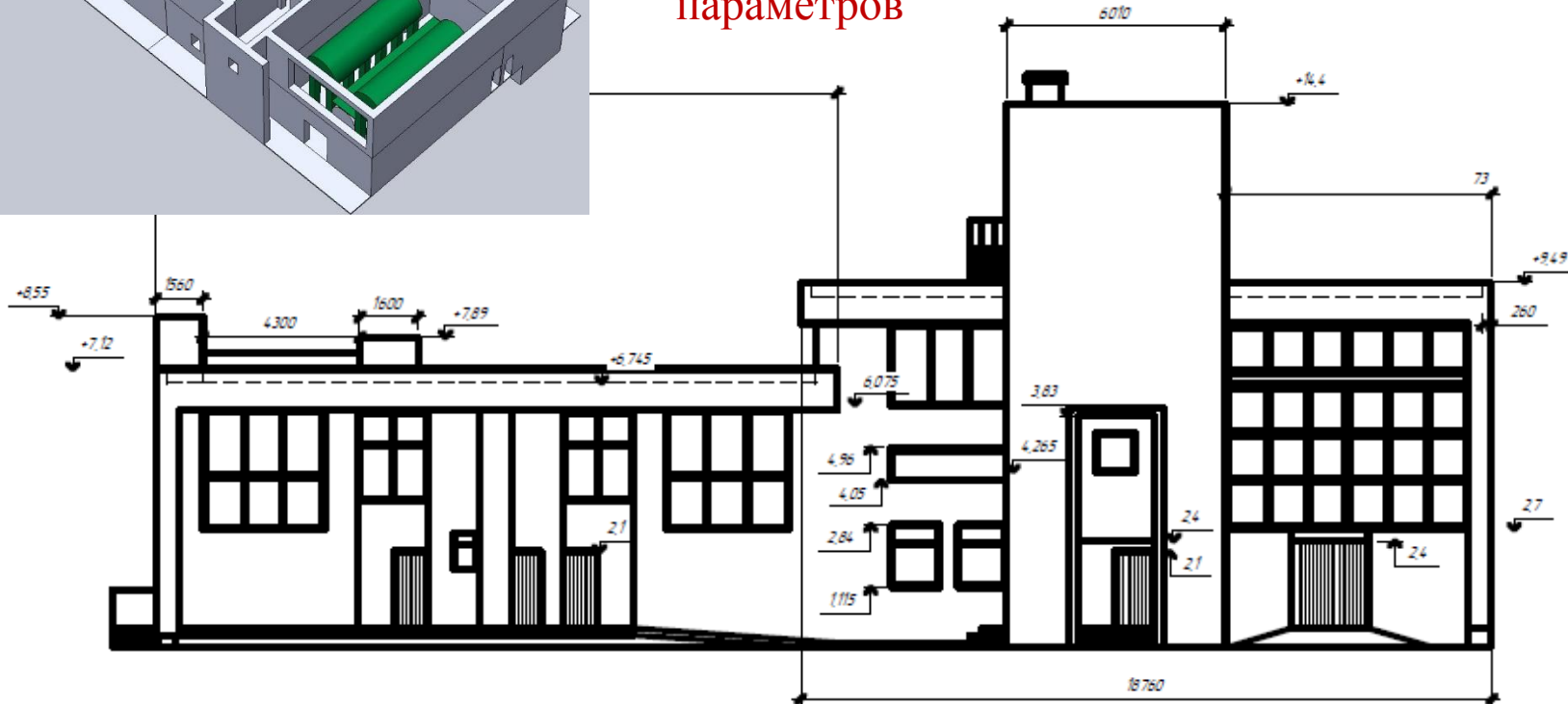
3. Необходимо комплексное экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование различных конфигураций МГД-теплообмена.
4. Конечная цель – создание базы данных о теплообмене жидкометаллических теплоносителей и расплавов солей в магнитных полях для теплофизического обоснования проектов и верификации численных методов.
5. Необходимо определить «запрещенные диапазоны» режимных параметров, в которых опасные эффекты могут проявиться. Однако, в ряде режимов обнаруженные эффекты начинают проявляться только при высоких числах Гартмана, близких к максимально реализуемым или не реализуемым на существующих стендах.



# ОИВТ РАН. Лаборатория использования жидкометаллических и солевых теплоносителей



Для продолжения исследований в ОИВТ РАН при участии НИУ МЭИ создается новый экспериментальный МГД-стена на более высокие значения режимных параметров

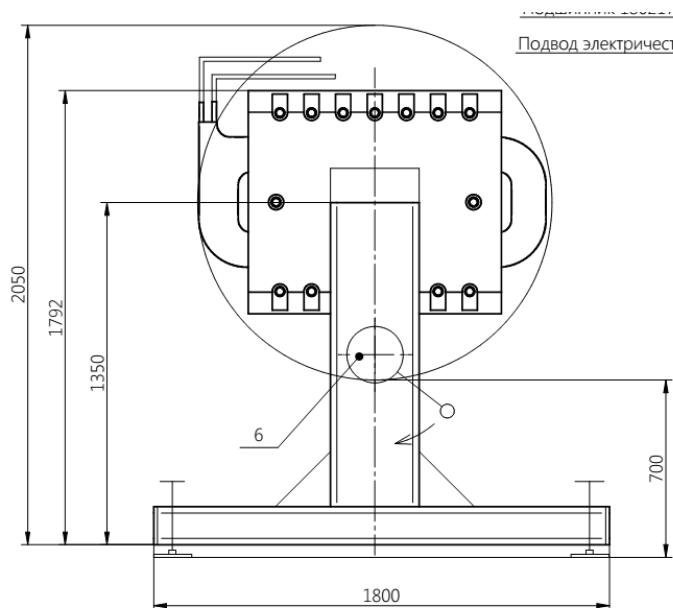


# Электромагнит

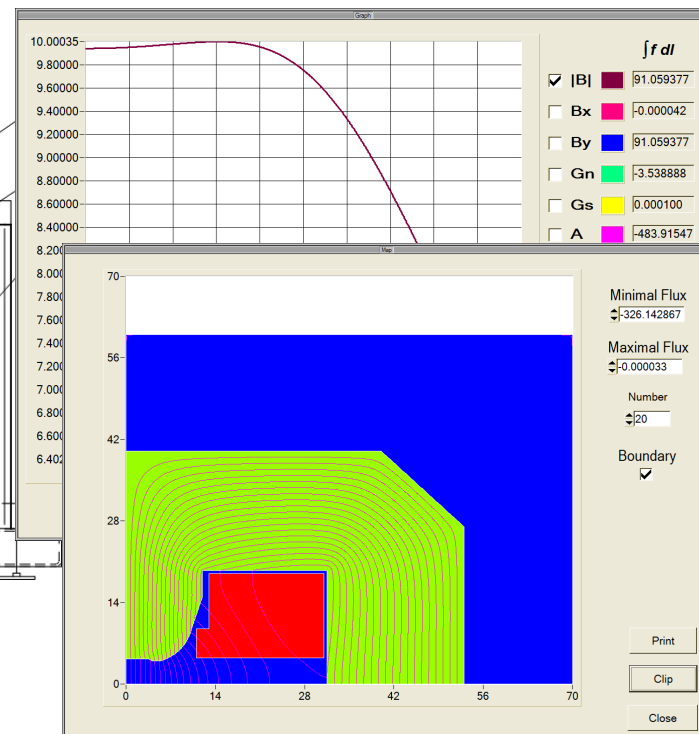
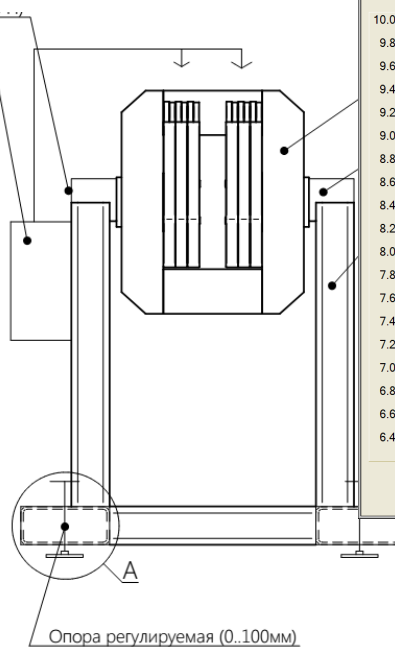


Институт ядерной физики  
им. Г.И. Будкера СО РАН

Параметр	Значение
Максимальное магнитное поле, Т	1,5-2,5
Магнитный зазор, мм	30-100
Длина сердечника по полю, мм	1000



Подвод электричества и воды



# Спасибо за внимание!

РНФ проект № 14-50-00124.