



ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТЕНКИ НА ТЕЧЕНИЕ РТУТИ В ОДНОСТОРОННЕ ОБОГРЕВАЕМЫХ ТРУБАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

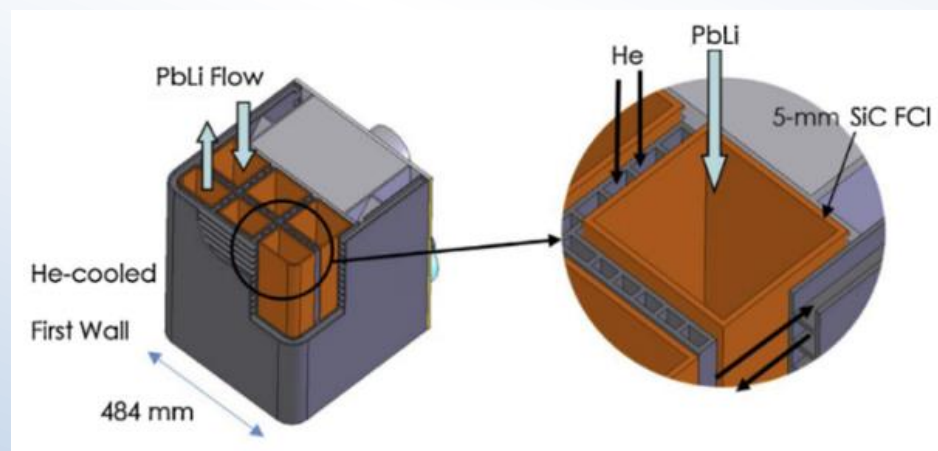
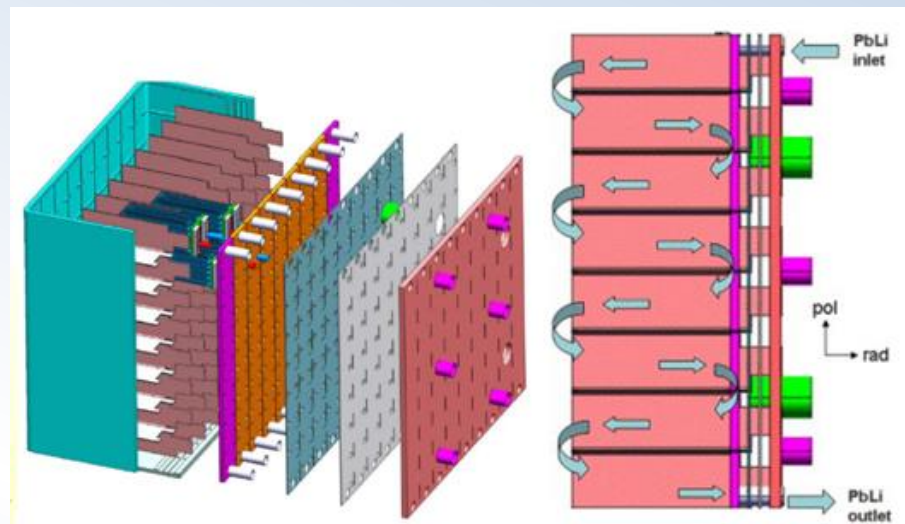
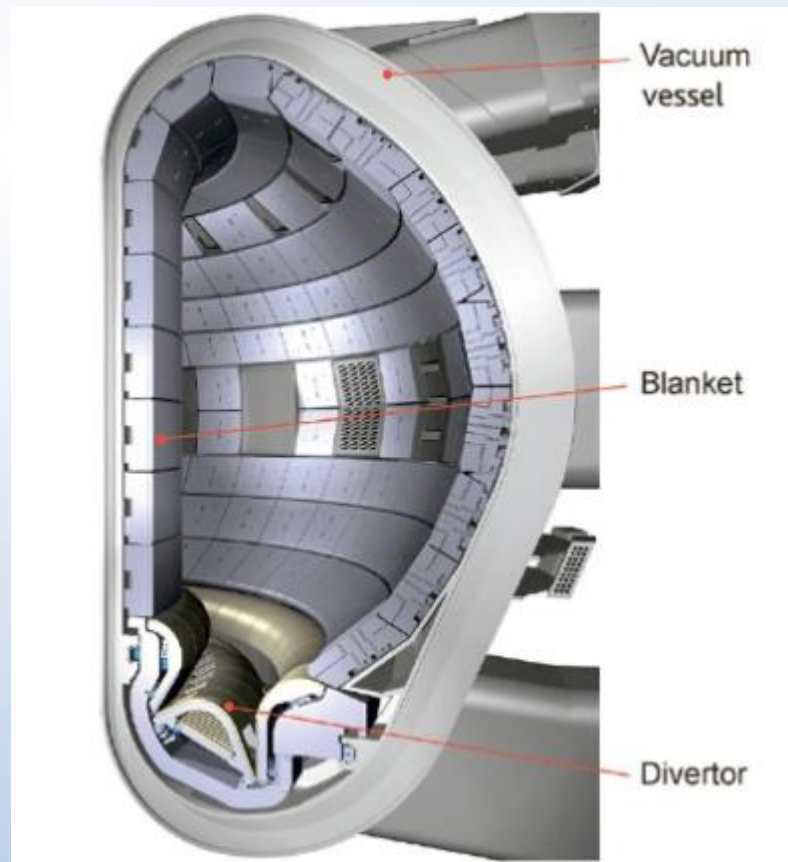
Макаров М.В., Яньков Г.Г., Артемов В.И.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, 14 - 17 ноября 2023 г.



Введение





Введение

Три кассеты blankets ITER модифицированы - *Test Blanket Modules* (TBM)

TBM содержат изотоп лития ${}^6_3\text{Li}$

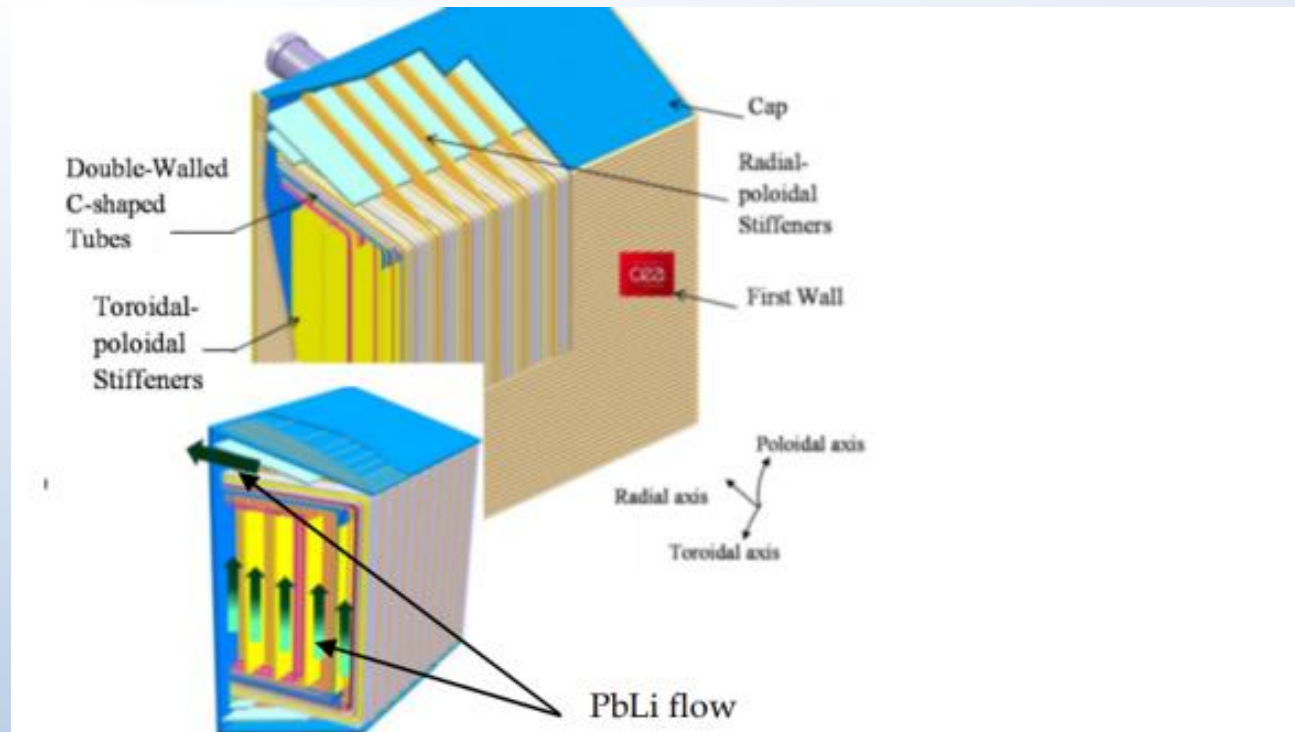


Figure 5. Schematics of the WCLL blanket. Shown is the CEA WCLL design for 2012 EU DEMO |



Течение жидких металлов в магнитных полях



Review

Physical Background, Computations and Practical Issues of the Magnetohydrodynamic Pressure Drop in a Fusion Liquid Metal Blanket

Sergey Smolentsev 

Обзор ранних и недавних исследований МГД-перепада давления в ЖМ blankets особое внимание уделяется:

- физике МГД-потоков в типичных конфигурациях blanket,
- разработке и тестированию компьютерных кодов для расчета МГД-потоков в blankets,
- практическим аспектам, связанным с прокачкой проводящего жидкого размножителя через сильное магнитное поле
- подходам к смягчению МГД-эффектов, падению давления в blanketе

Среди нескольких ограничений, связанных с осуществимостью ЖМ blanketа, МГД перепад давления часто рассматривается как наиболее серьезная проблема



Течения жидких металлов в магнитных полях

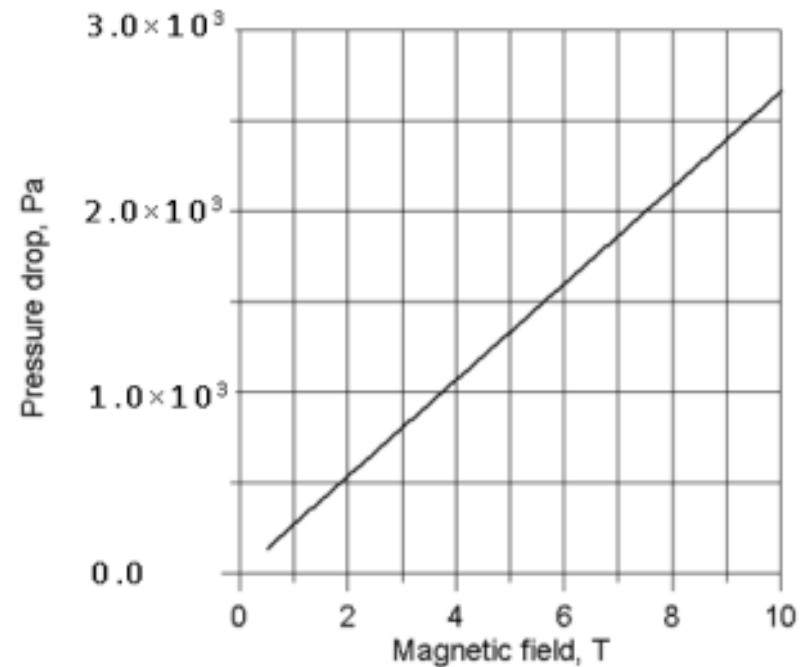
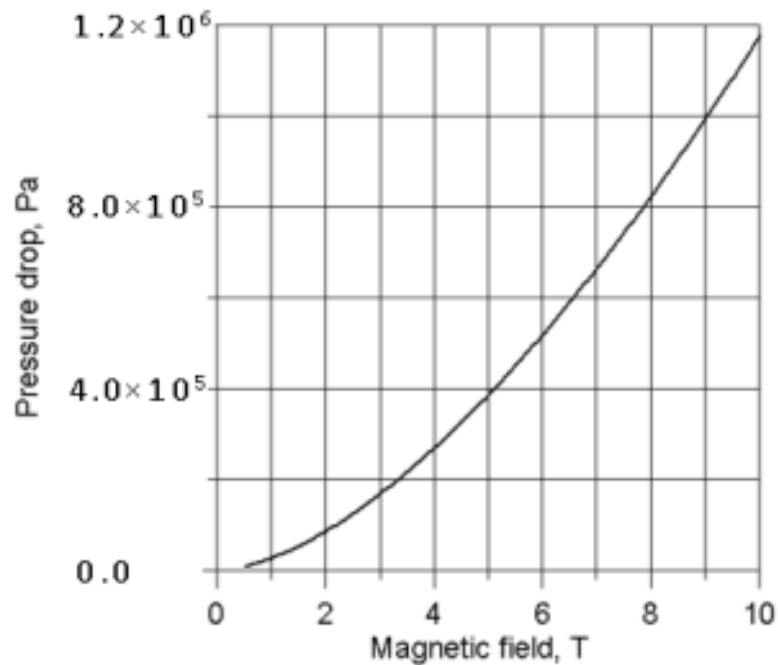
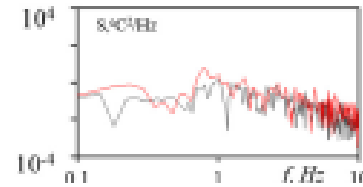
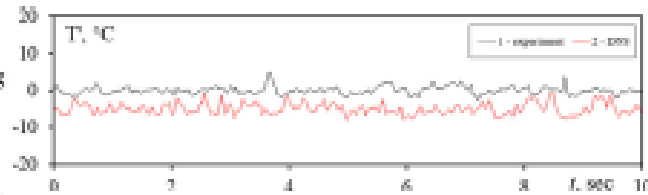
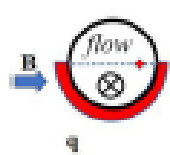


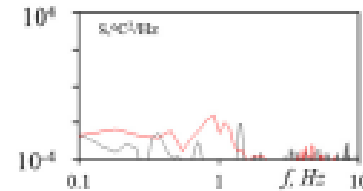
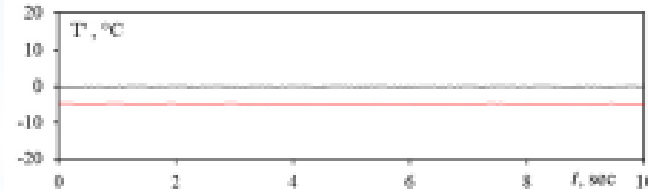
Figure 8. Effect of the magnetic field on the MHD pressure drop in the PbLi flow in a square duct at $b = 0.1$ m, $l = 10$ m, and $U_m = 0.1$ m/s: thin steel Hartmann walls with $t_w = 5$ mm (Hunt solution 2), and all walls are non-conducting (Shercliff flow).



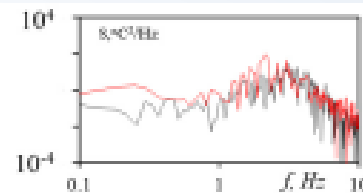
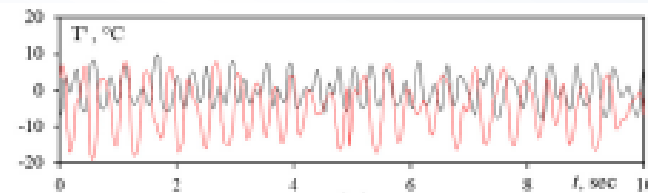
Течение ртути в горизонтальной трубе



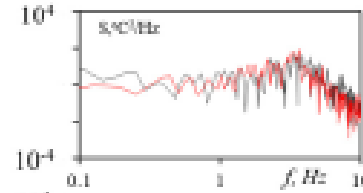
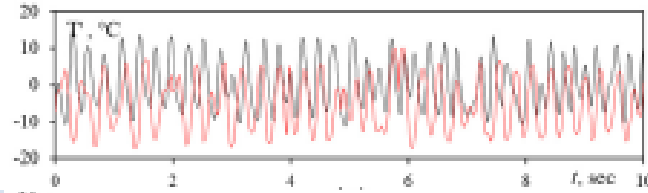
$Ha = 0$



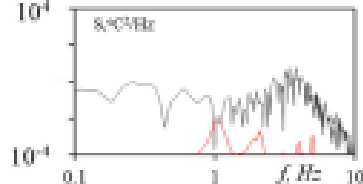
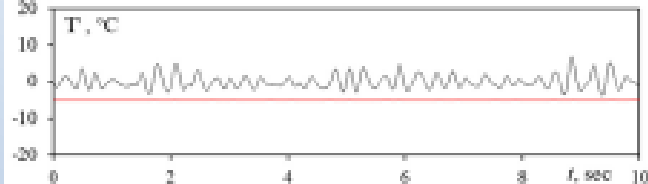
$Ha = 100$



$Ha = 300$



$Ha = 700$



$Ha = 1000$



Опускное течение ртути в круглой трубе

Теплообмен при течении жидкого металла в вертикальной трубе в поперечном магнитном поле

В. Г. Свиридов*, Н. Г. Разуванов, А. А. Шестаков

Вестник МЭИ. № 5. 2011 г.

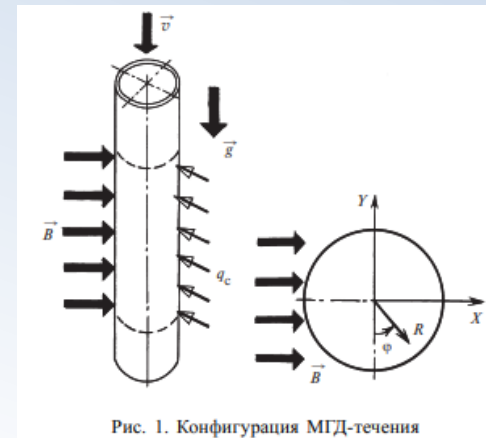
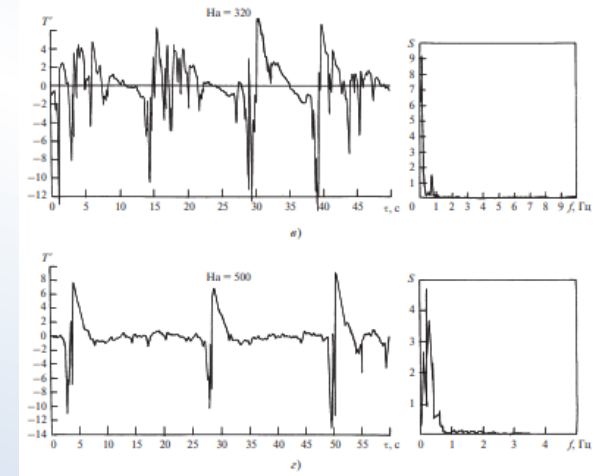
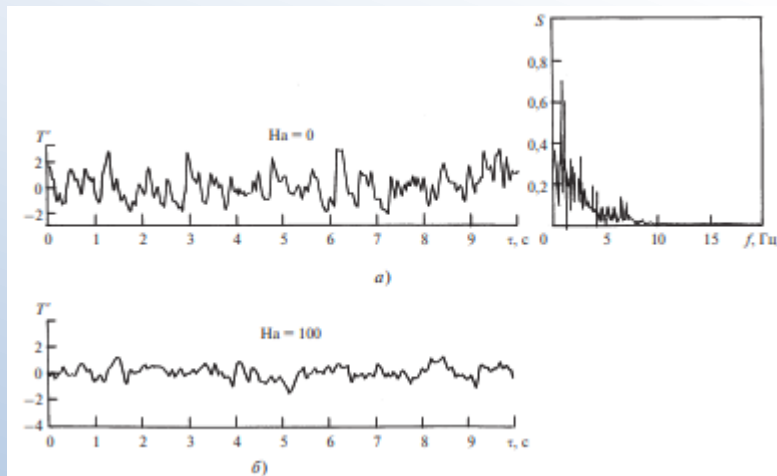


Рис. 1. Конфигурация МГД-течения

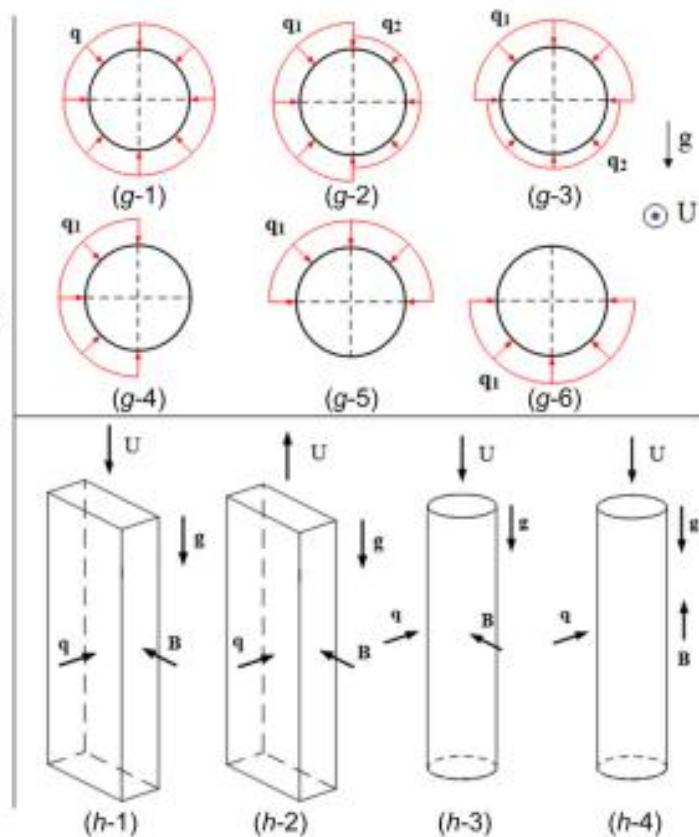
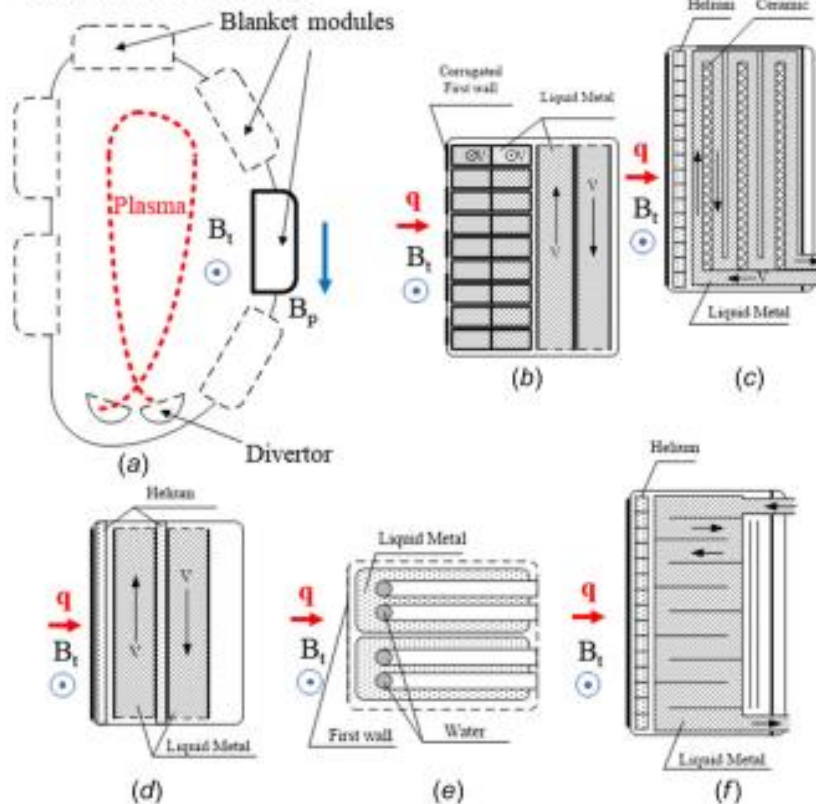


Осциллограммы и спектры температурных пульсаций S при $z/d = 37$, $q_c = 35 \text{ кВт/м}^2$ ($Gr_q = 0,8 \cdot 10^8$), $Re = 12\,000$, при наличии МП и разных значениях числа Гартмана в центре потока



Смешанная конвекция в каналах при воздействии магнитных полей

Tokamak cross-section





Смешанная конвекция в каналах при воздействии магнитных полей

Oleg Zikanov¹

University of Michigan – Dearborn,
Dearborn 48128-1491, MI
e-mail: zikanov@umich.edu

Ivan Belyaev

Joint Institute for High Temperatures Russian
Academy of Science,
Izhorskaya Street 13, Building 2,
Moscow 125412, Russia
e-mail: bia@ihed.ras.ru

Yaroslav Listratov

Moscow Power Engineering Institute,
National Research University,
Krasnokazarmennaya Street 14,
Moscow 111250, Russia
e-mail: yaroslav.listratov@gmail.com

Peter Frick

Institute of Continuous Media Mechanics,
Russian Academy of Science,
Ac. Korolev Street 1,
Perm 614013, Russia;
Moscow Power Engineering Institute,
Krasnokazarmennaya Street 14,
Moscow 111250, Russia
e-mail: frick@icmm.ru

Nikita Razuvanov

Joint Institute for High Temperatures Russian
Academy of Science,
Izhorskaya Street 13, Building 2,
Moscow 125412, Russia
e-mail: nikita.razuvanov@mail.ru

Valentin Sviridov

Moscow Power Engineering Institute,
National Research University,
Krasnokazarmennaya Street 14,
Moscow 111250, Russia

Mixed Convection in Pipe and Duct Flows With Strong Magnetic Fields

An imposed strong magnetic field suppresses turbulence and profoundly changes the nature of the flow of an electrically conducting fluid. We consider this effect for the case of mixed convection flows in pipes and ducts, in which unique regimes characterized by extreme temperature gradients and high-amplitude fluctuations (the so-called magneto-convective fluctuations) have been recently discovered. The configuration is directly relevant to the design of the liquid-metal components of future nuclear fusion reactors. This review presents the general picture of the flow transformation emerging from the recent studies, illustrates the key known facts, and outlines the remaining open questions. Implications for fusion reactor technology and novel experimental and numerical methods are also discussed. [DOI: 10.1115/1.4049833]

Applied Mechanics Reviews

Transactions of the ASME

JANUARY 2021, Vol. 73 / 010801-1



Опускное течение ртути в круглой трубе

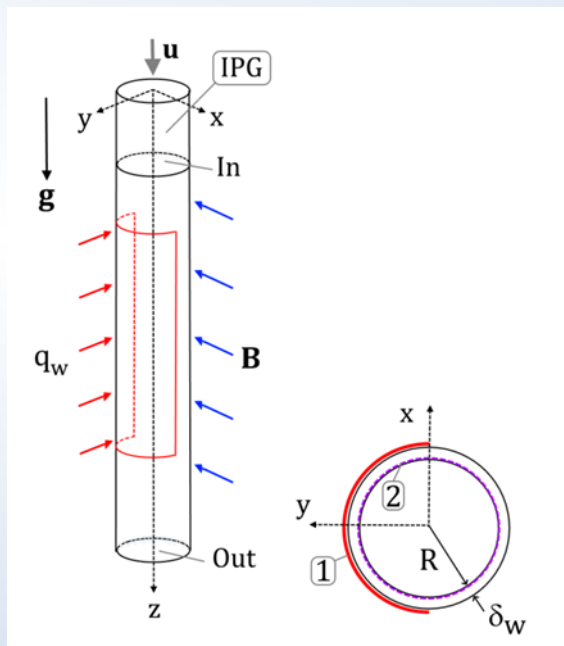
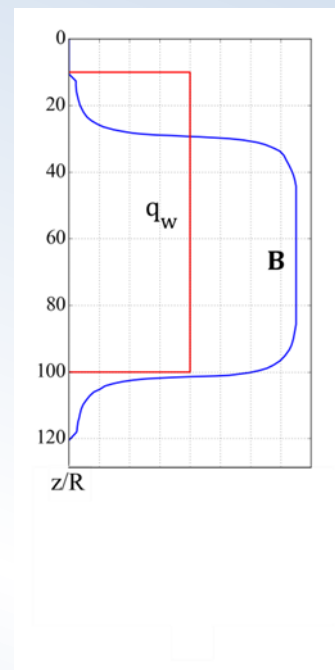


Рис. 1. Схема расчетной области,
1 – нагреватель, 2 – пленка загрязнений

$L_{IPG} = 10R$ – зона генератора входной турбулентности;
 $L_q = 90R$ – зона обогрева;
 $L_{ad_out} = 30R$ – выходная адиабатная зона;
 $R = 9,5$ мм – внутренний радиус трубы;
 $\delta_w = 0,5$ мм – толщина стенки;
 $q_w = 55$ кВт/м² – плотность теплового потока;
 $u_0 = 0,059$ м/с – средняя скорость.



Обозначения режимов:

NoSW – отсутствие стенки;

IsolW – электроизолированная стенка;

SW – «чистая» стенка;

K10W – учет свойств стенки и пленки загрязнений;



Течения жидких металлов в магнитных полях

Обычно используются два основных приближения:

- безиндукционное приближение - пренебрежение индуцированным магнитным полем $\mathbf{B}'$ по сравнению с приложенным $\mathbf{B}^0$ при

$\text{Re}_m \ll 1$, $\nu_m = \frac{1}{\mu\sigma}$ - магнитная кинематическая вязкость;

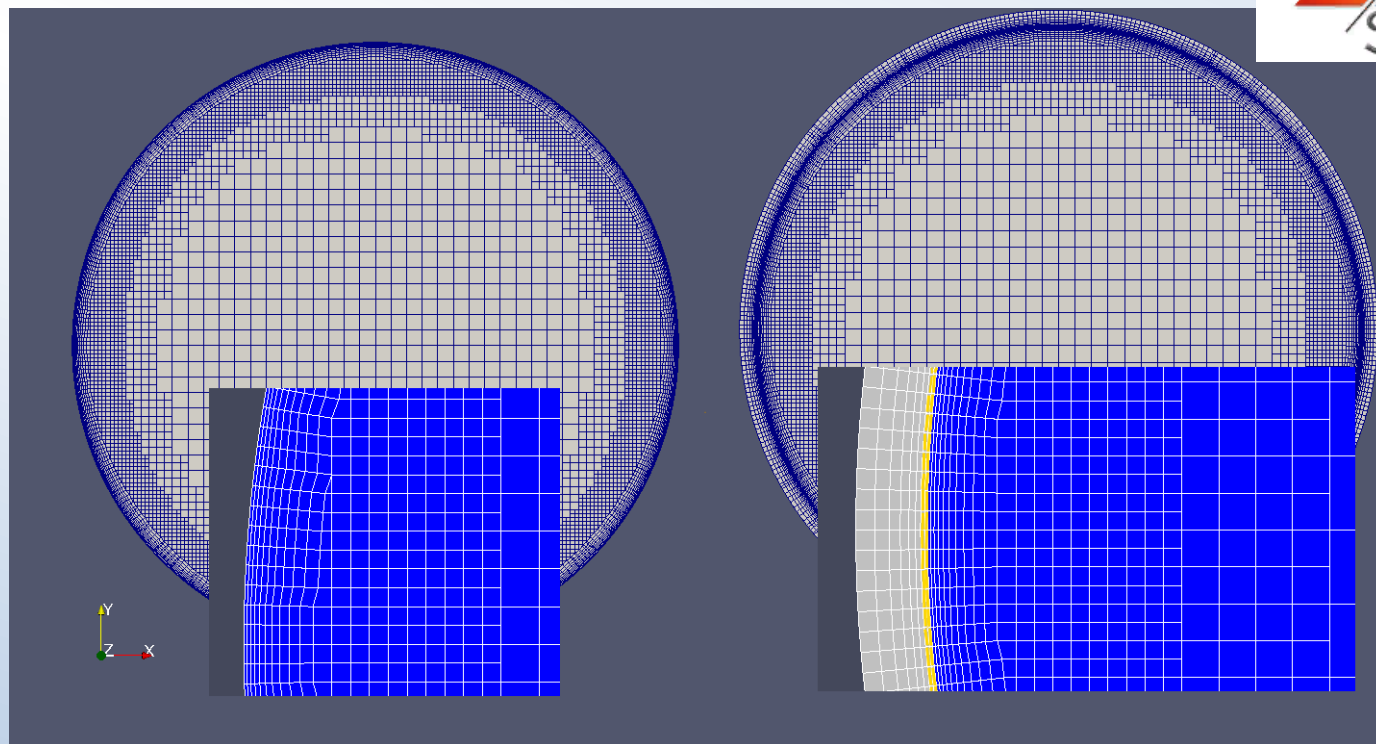
- приближение Буссинеска для учета сил плавучести

$$\mathbf{j} = \sigma \left(-\nabla \varphi + \mathbf{u} \times \mathbf{B}^0 \right), \quad \text{div}(\mathbf{j}) = 0$$



Опускное течение ртути в круглой трубе

Число ячеек в сечении (x,y) $N_{xy} = 9949$ для NoSW и $N_{xy} = 12\,688$ для сопряженной постановки SW и K10W.
 $N_z = 1312$. Общее число ячеек N_{cv} : от 8,8 до 17,07 млн

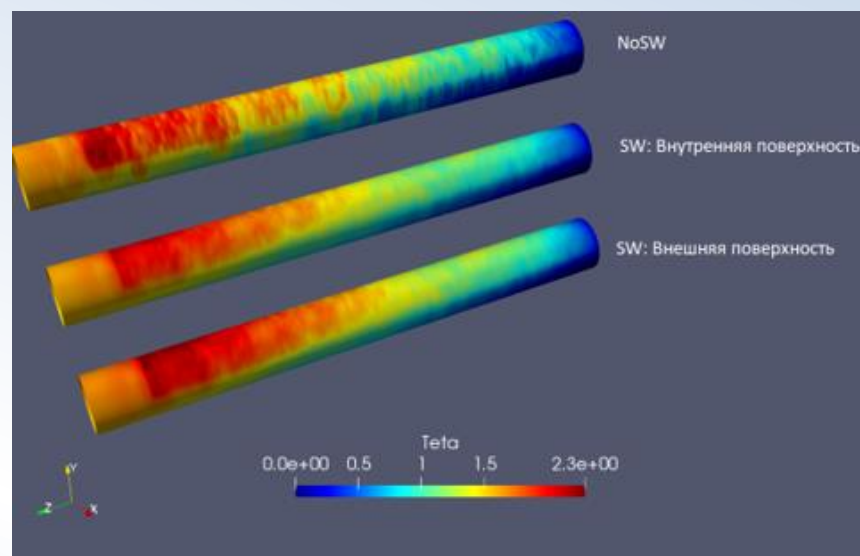
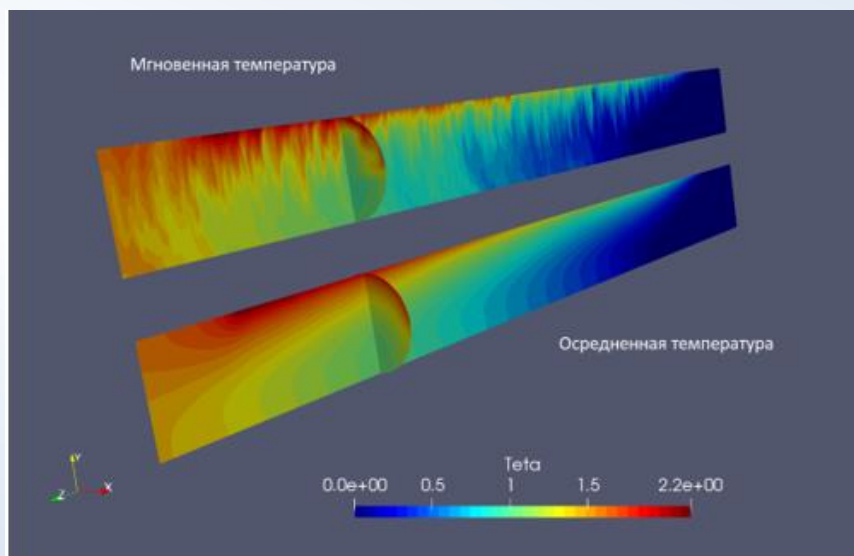


Сетка КО в сечении ХУ для варианта без стенки (слева) и со стенкой (справа)

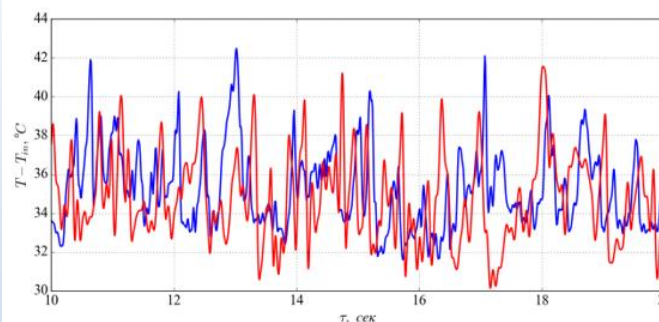


Опускное течение ртути в круглой трубе

$Ha = 0$ $Re = 10\,000$



$$Gr_q = 6 \cdot 10^7$$

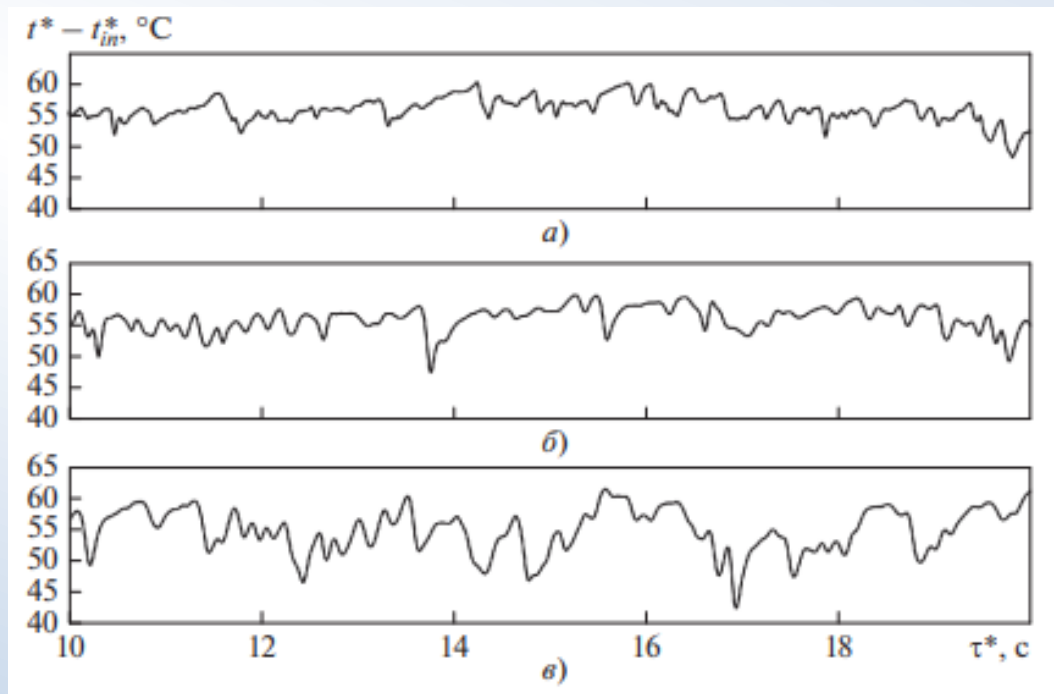


V.I. Artemov, M.V. Makarov, G.G. Yan'kov, K.B. Minko, LES Simulation of Mixed Convection for Downward Mercury Flow in a Nonuniformly Heated Vertical Pipe Using Conjugate Problem Statement, Therm. Eng. 69 (2022) 875–885, <https://doi.org/10.1134/S0040601522110015>.



Опускное течение ртути в круглой трубе

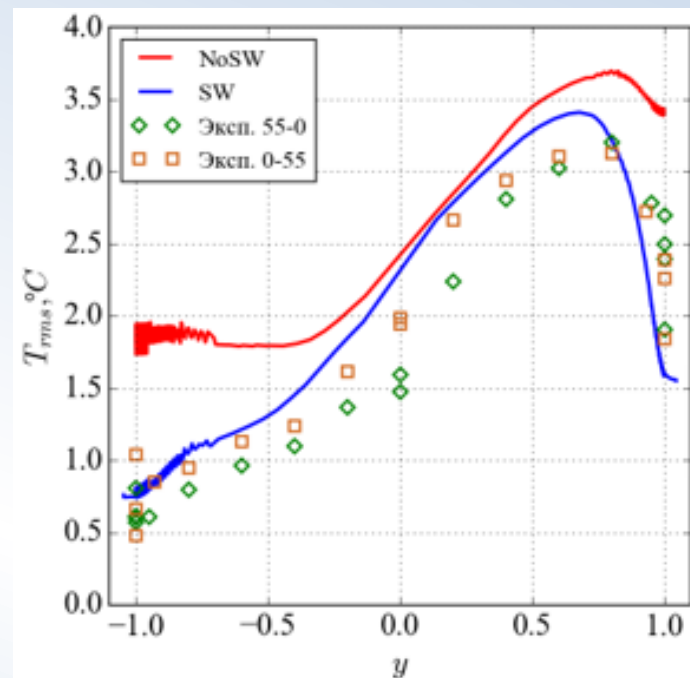
$Na = 0 \quad Re = 10\,000$



Временные сигналы пульсаций температуры вблизи горячей поверхности стенки
в сечении измерений при $x = 0, y = 0.95$

а – экспериментальные данные б – SW; в – NoW

Для рассматриваемой задачи $K = 0.51, \delta^{**} = 17$



$$\delta_w^{++} = \frac{u_{t0}^* \delta_w^*}{v^*} \sqrt{\frac{a^*}{a_s^*}}; \quad K = \frac{\rho^* c_p^*}{(\rho^* c_p^*)_s} \sqrt{\frac{a^*}{a_s^*}};$$

$$a^* = \frac{\lambda^*}{\rho^* c_p^*}; \quad a_s^* = \frac{\lambda_s^*}{\rho_s^* c_{ps}^*}.$$

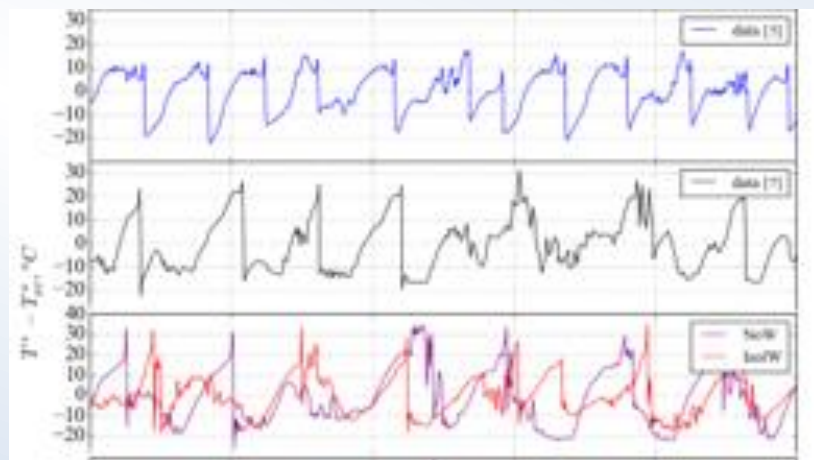


РОСАТОМ

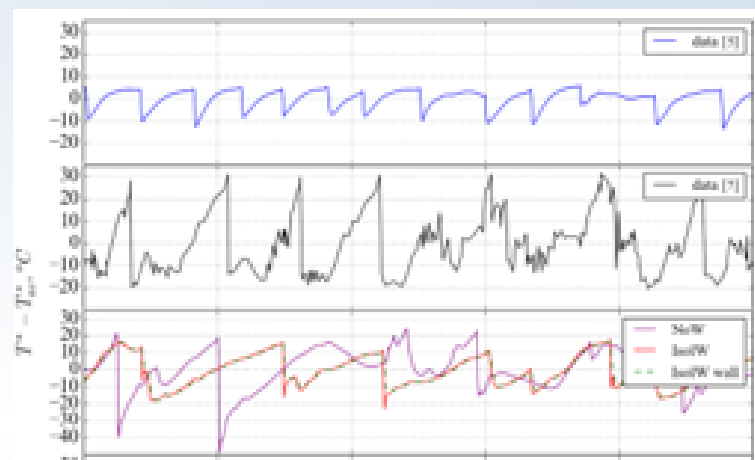
ЯО России

Опускное течение ртути в круглой трубе

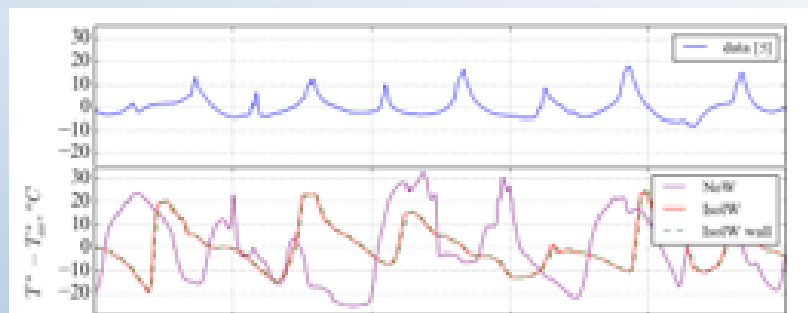
$Na = 300$ $Re = 10\ 000$



а)



б)



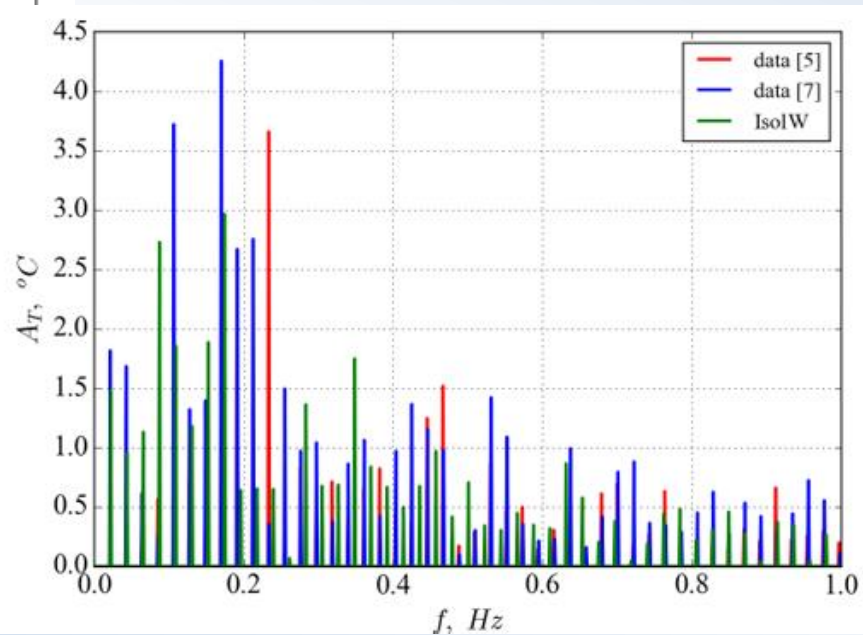
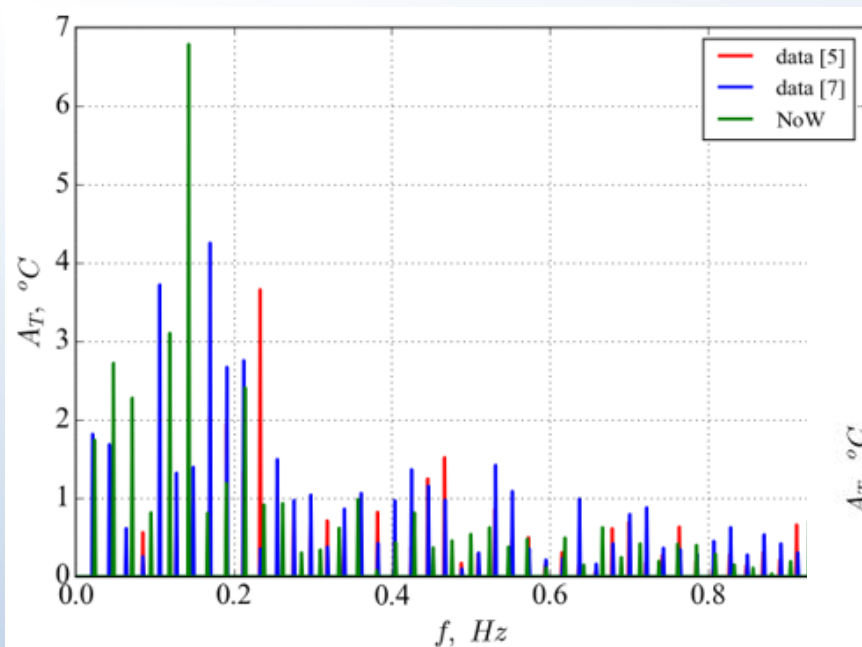
в)

Температурные пульсации (а) в центре сечения измерения ($x=0, y=0$), (б) возле горячей поверхности стенки ($x=0, y=0.95$), (в) возле холодной поверхности стенки ($x=0, y=-0.95$)



Опускное течение ртути в круглой трубе

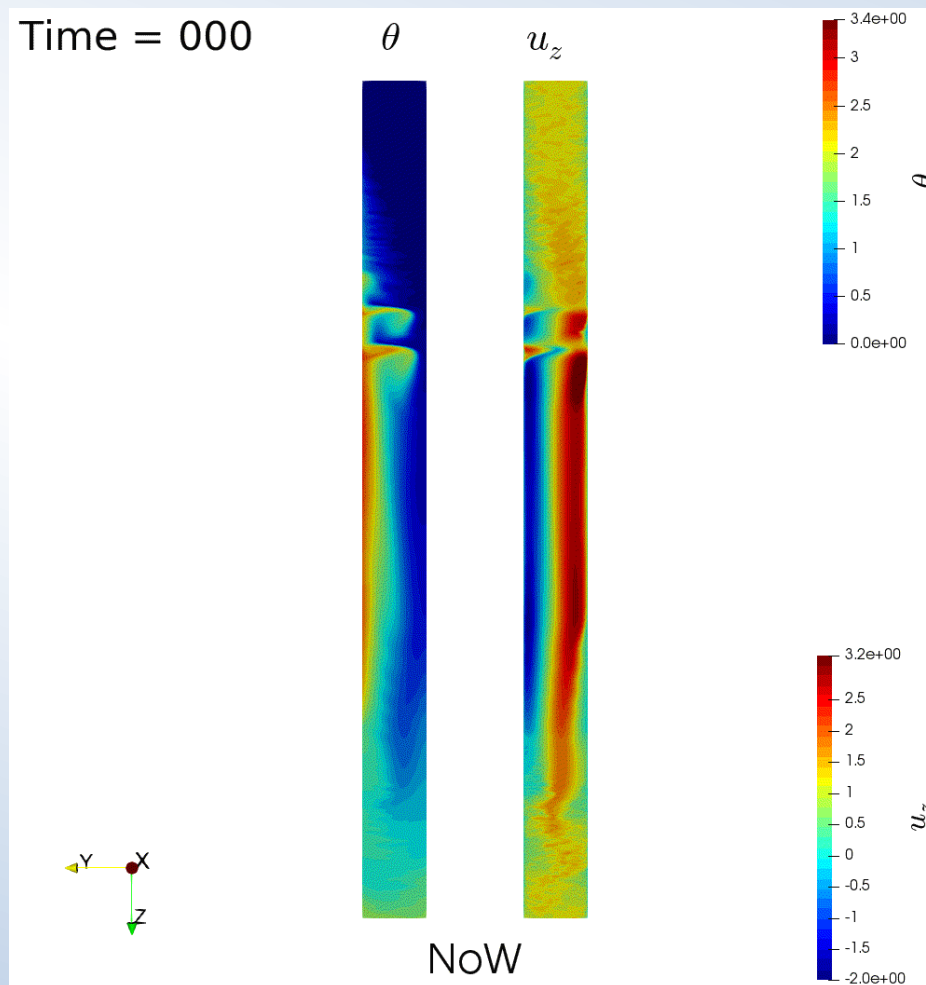
$Ha = 300$ $Re = 10\,000$





Опускное течение ртути в круглой трубе

$Ha = 300$ $Re = 10\,000$



NoW Мгновенные поля безразмерной температуры и безразмерной продольной скорости



Опускное течение ртути в круглой трубе

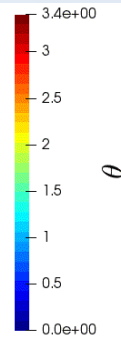
$Na = 300$ $Re = 10\ 000$

18

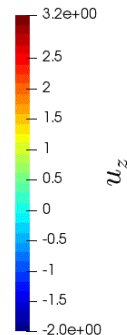
Time = 000

θ

u_z



θ



u_z

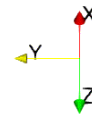


IsolW

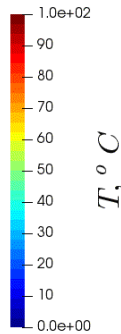
Time = 000

in

out



IsolW



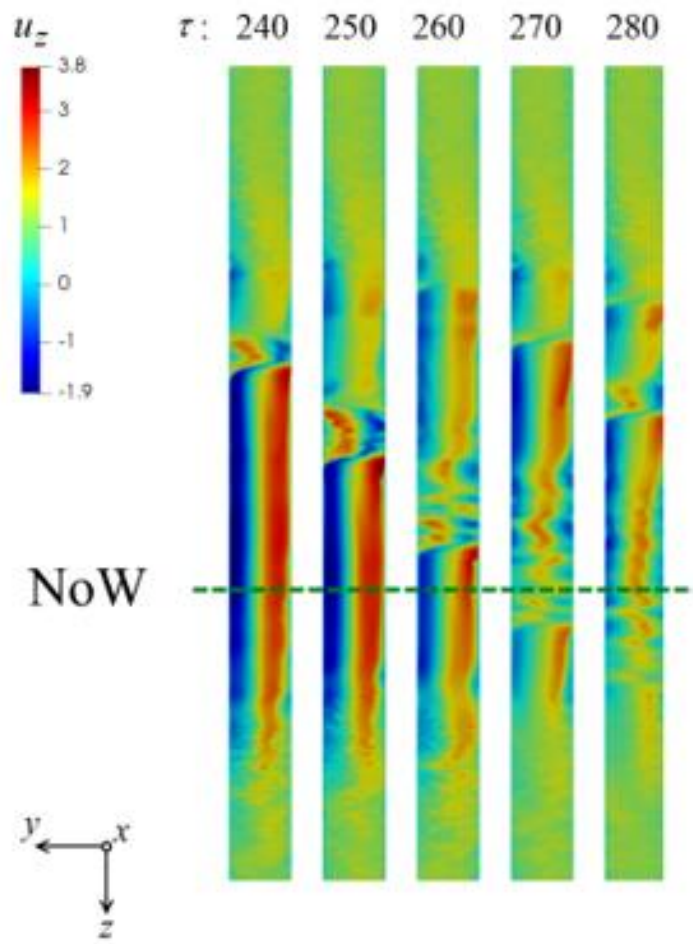
$T, ^\circ C$

IsolW Мгновенные поля безразмерной температуры и безразмерной продольной скорости

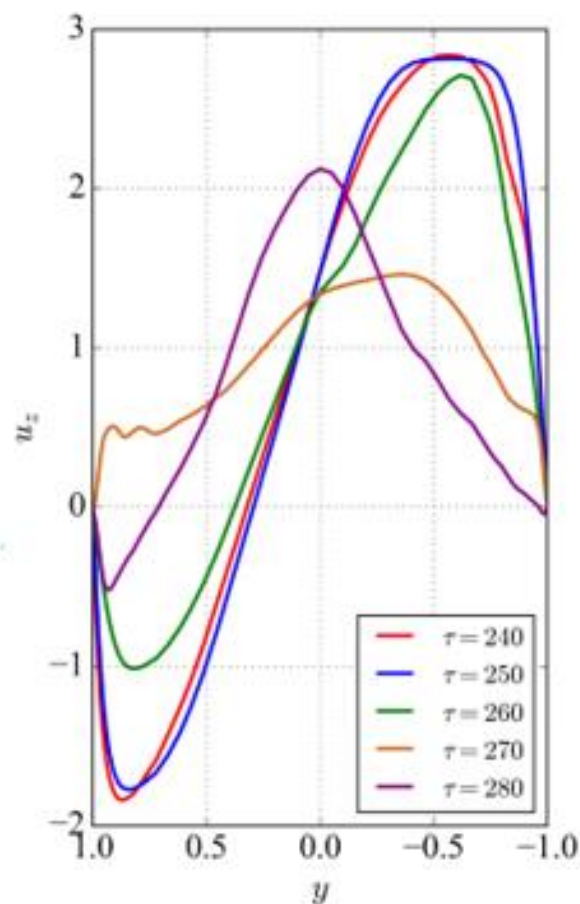
Опускное течение ртути в круглой трубе

$Ha = 300$ $Re = 10\,000$

VI Международная научно-техническая конференция
«Инновационные проекты и технологии
ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ-2023)



(a)

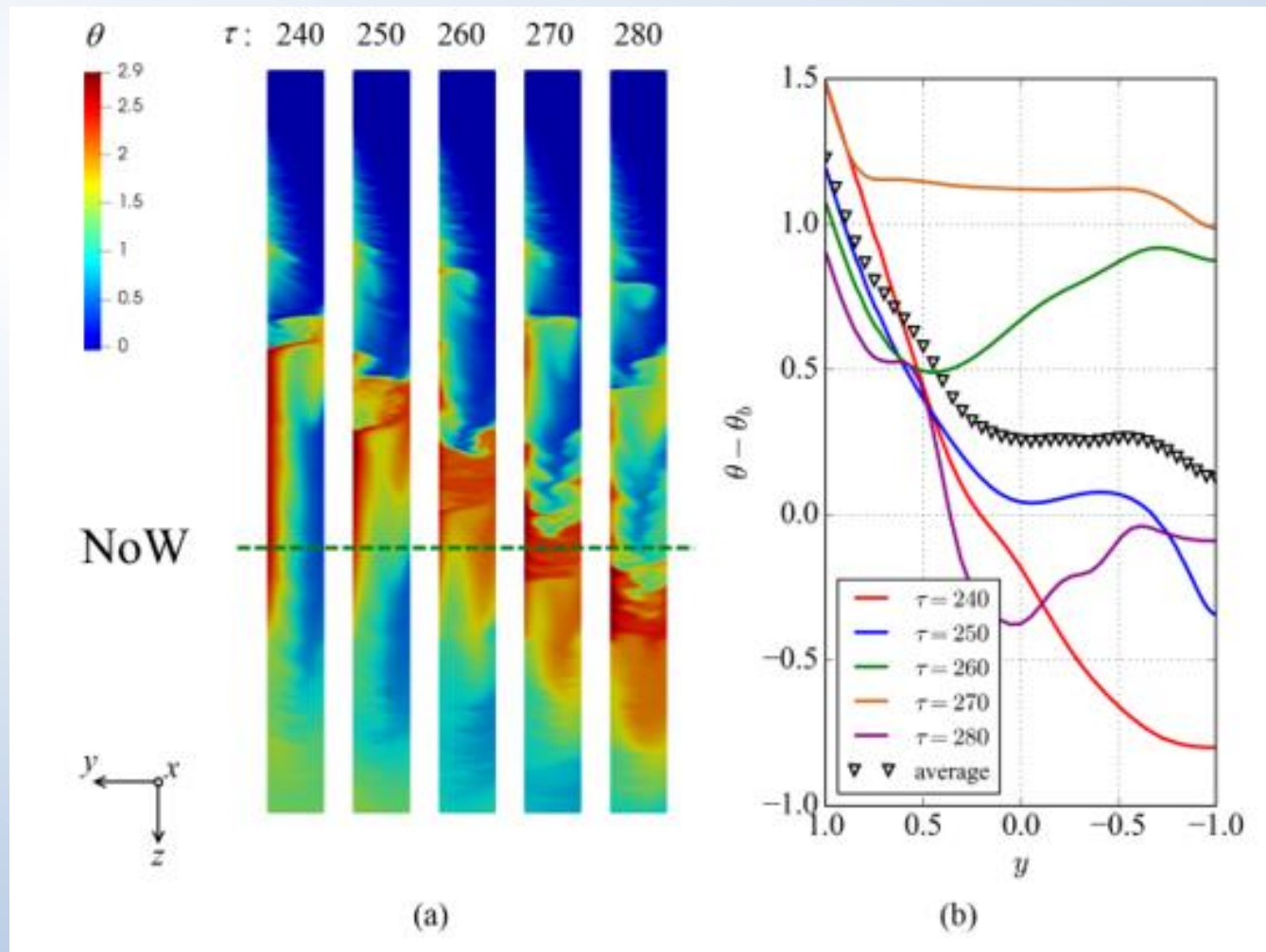


(b)



Опускное течение ртути в круглой трубе

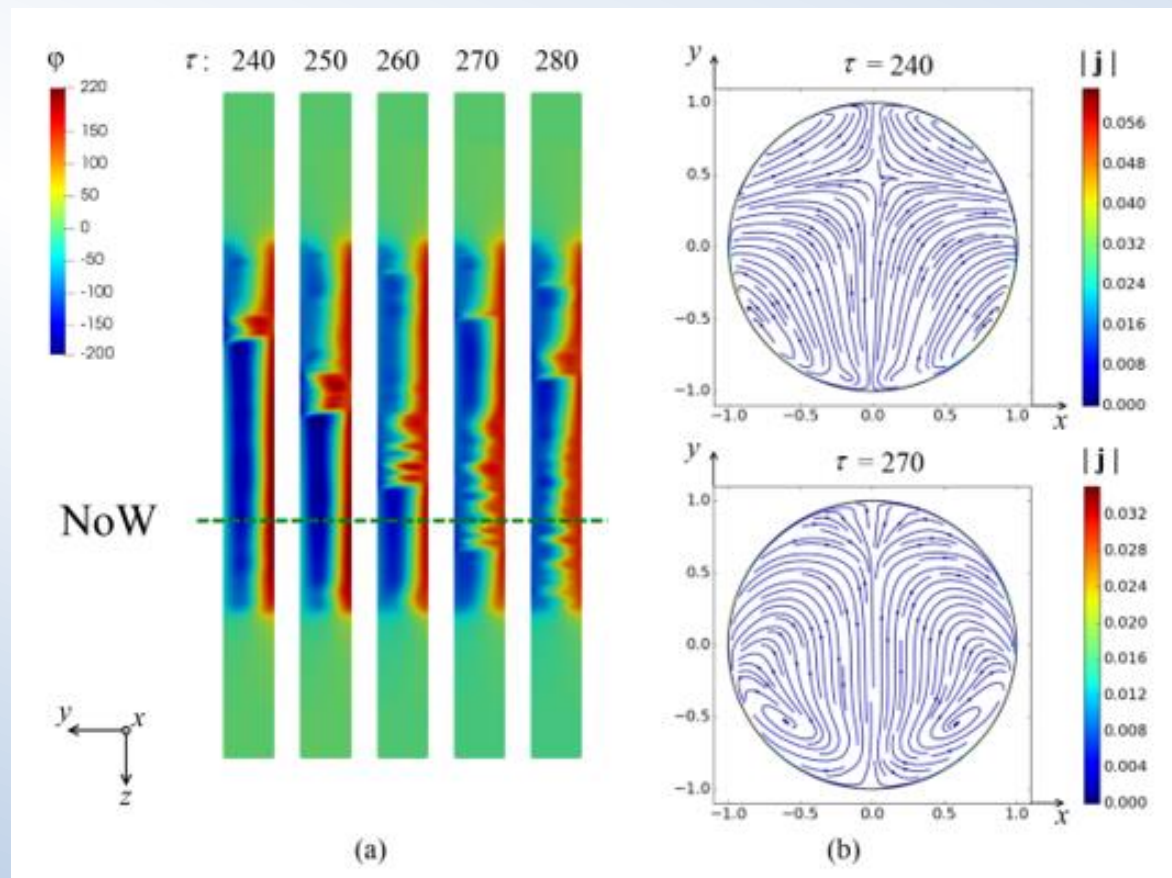
$Na = 300$ $Re = 10\,000$





Опускное течение ртути в круглой трубе

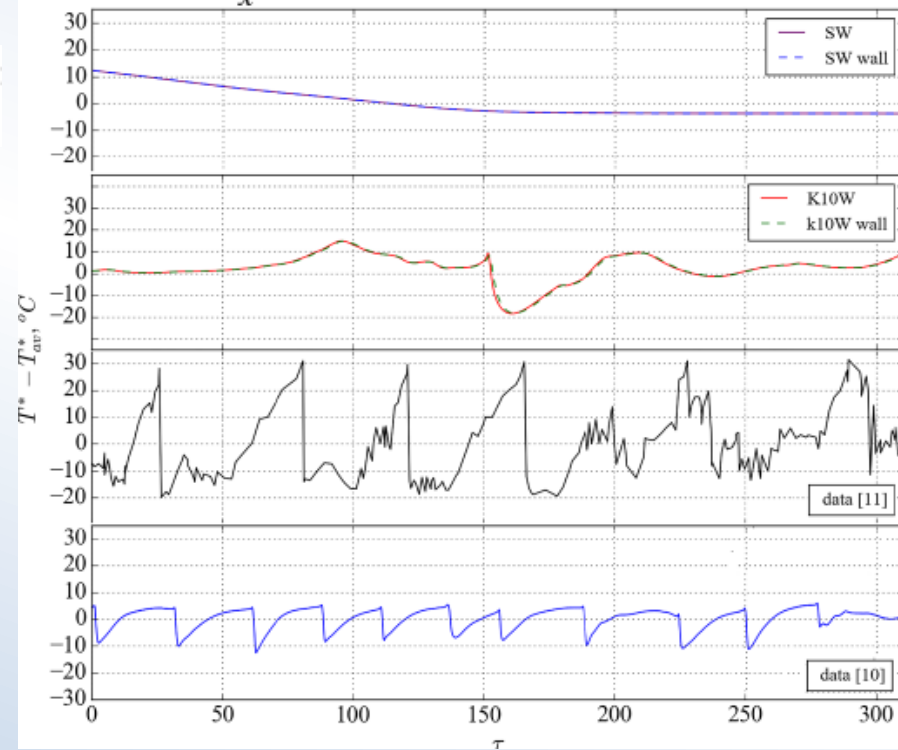
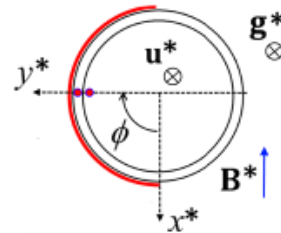
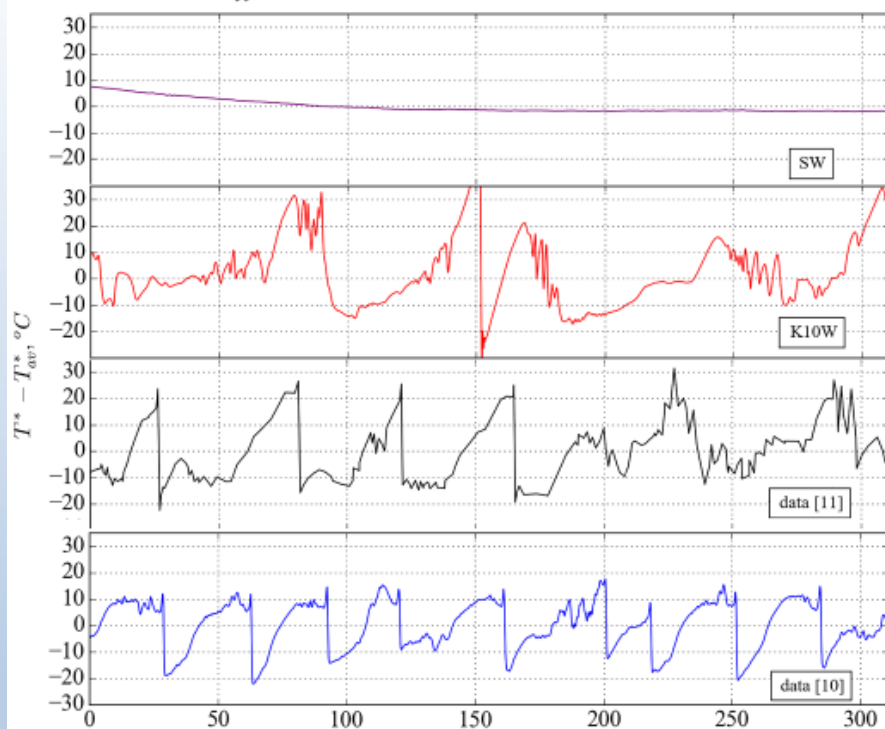
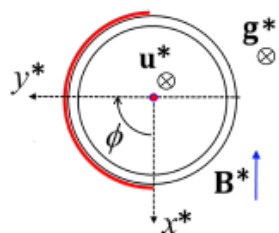
$Ha = 300$ $Re = 10\,000$





Опускное течение ртути в круглой трубе

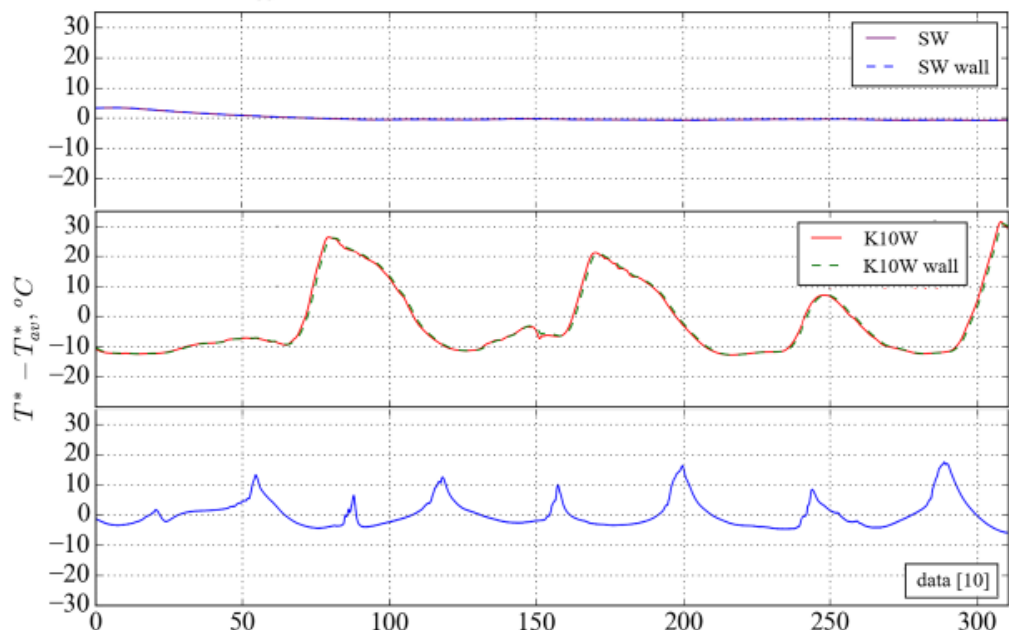
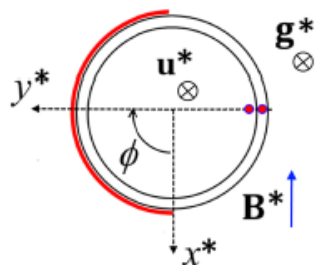
$Ha = 300$ $Re = 10\ 000$





Опускное течение ртути в круглой трубе

$Ha = 300$ $Re = 10\,000$



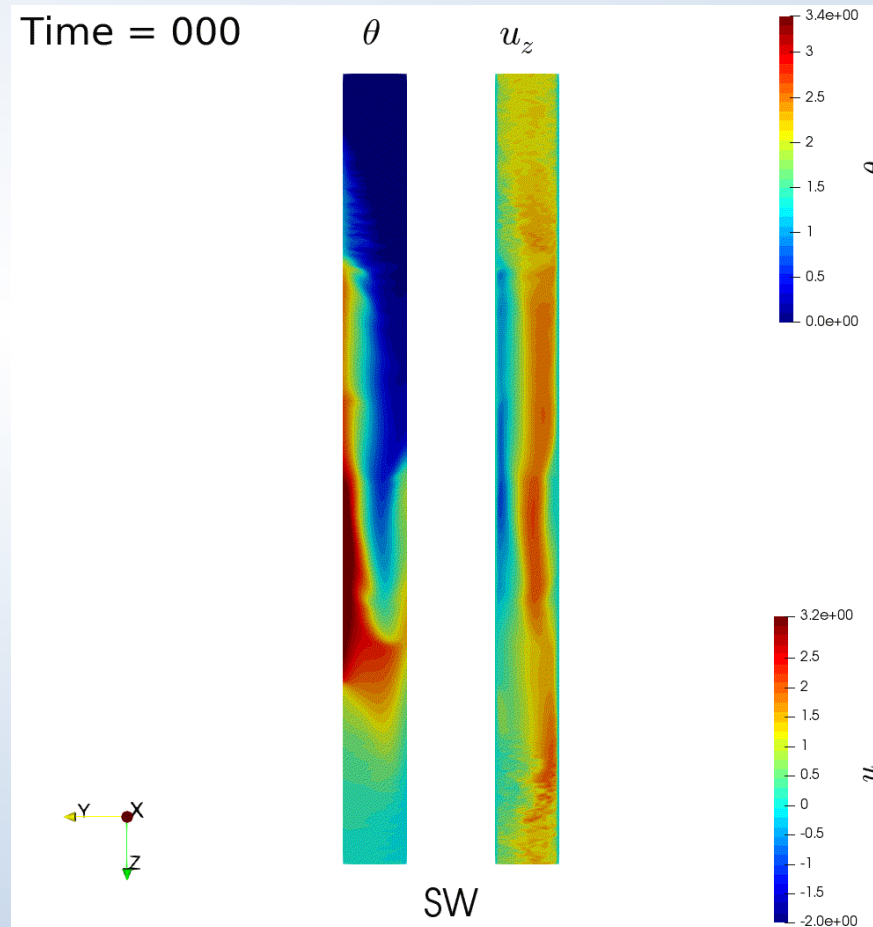


РОСАТОМ

ЯО России

Опускное течение ртути в круглой трубе

$Ha = 300$ $Re = 10\,000$



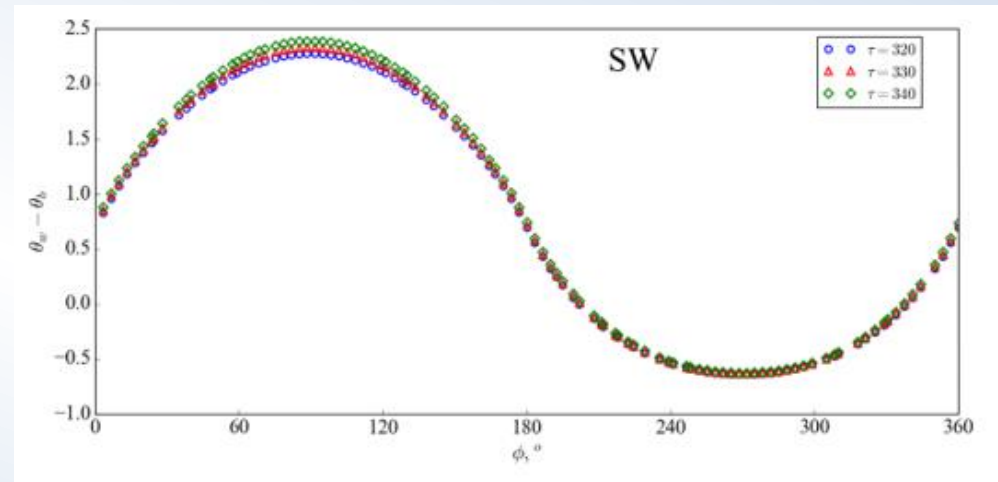
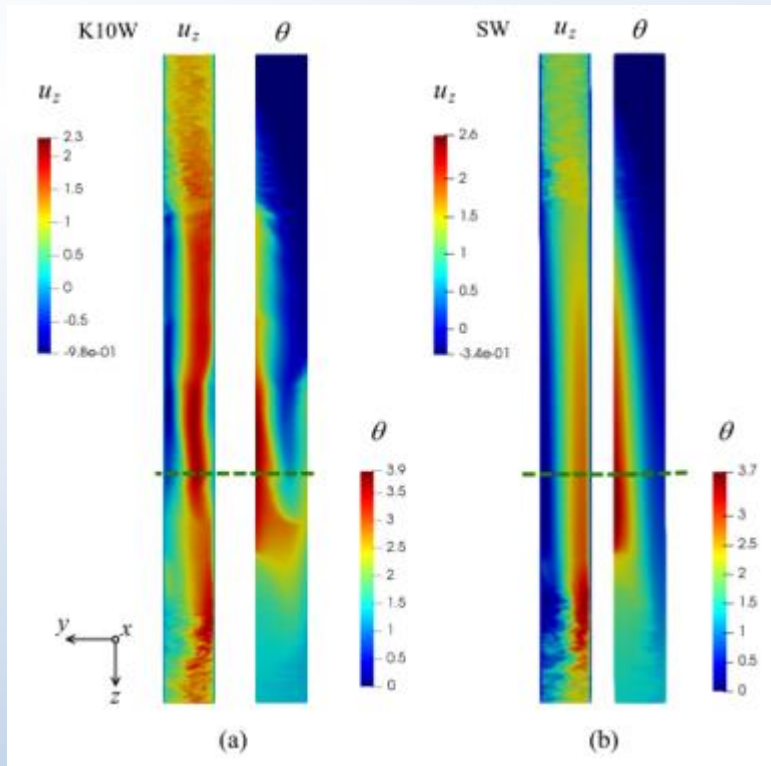
SW Мгновенные поля безразмерной температуры и безразмерной продольной скорости



Опускное течение ртути в круглой трубе

$Ha = 300$ $Re = 10\ 000$

25





Опускное течение ртути в круглой трубе

$Ha = 300$ $Re = 10\,000$

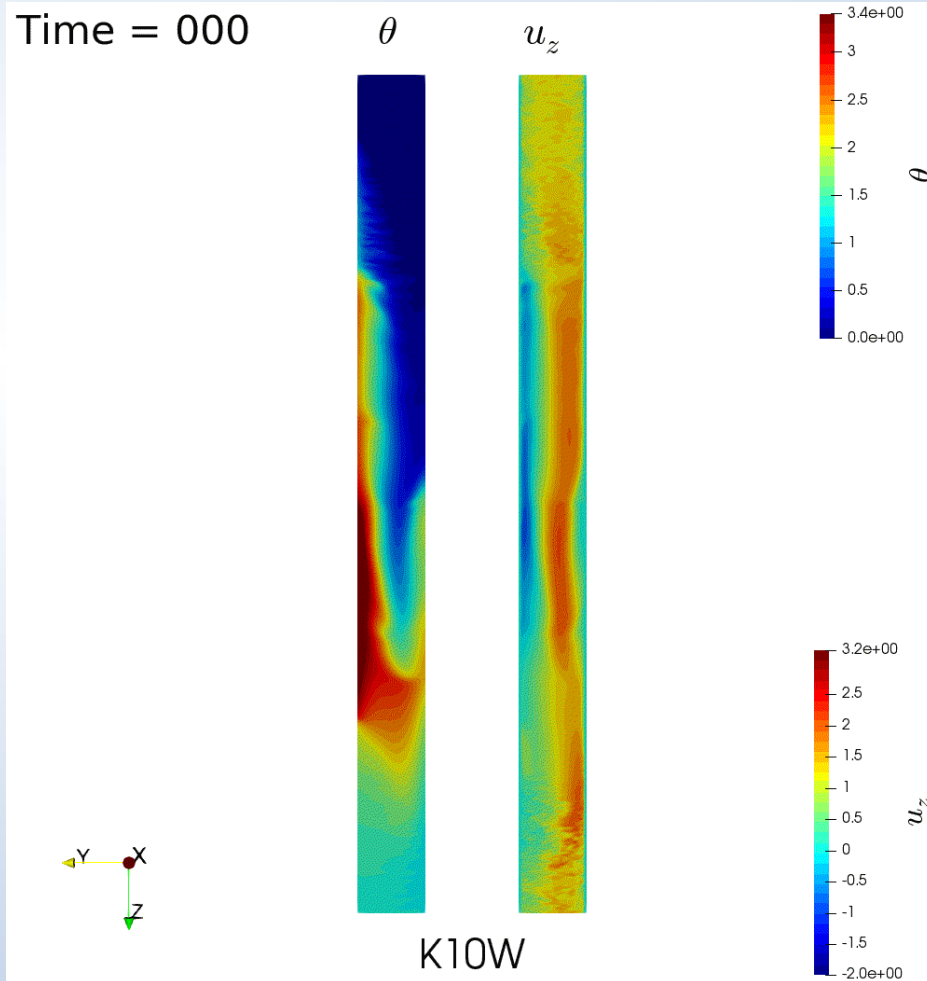


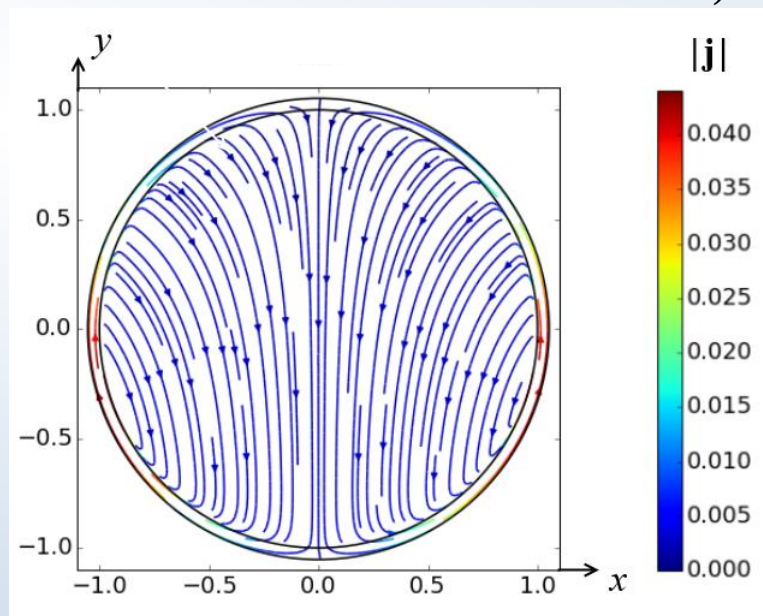
Рис.8. **K10W** Мгновенные поля безразмерной температуры и безразмерной продольной скорости $Pr = 0.025$, $Gr = 6 \cdot 10^7$



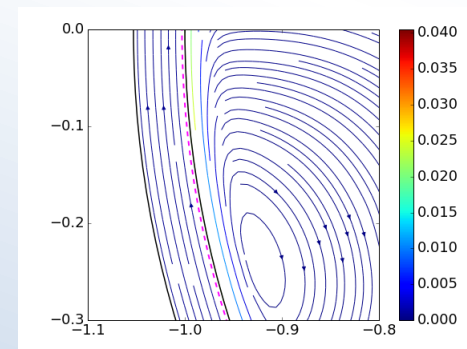
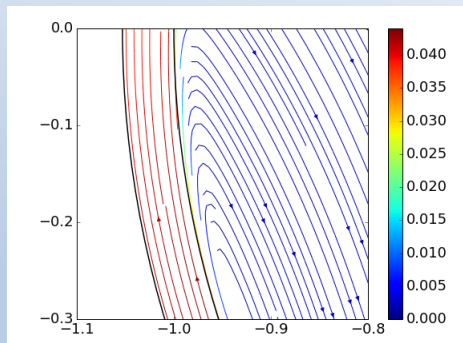
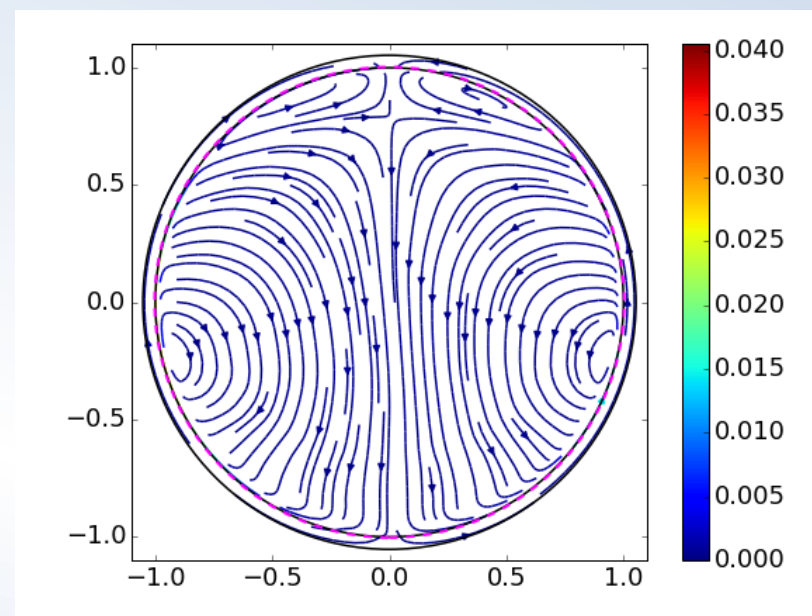
Опускное течение ртути в круглой трубе

$Ha = 300$ $Re = 10\ 000$

SW



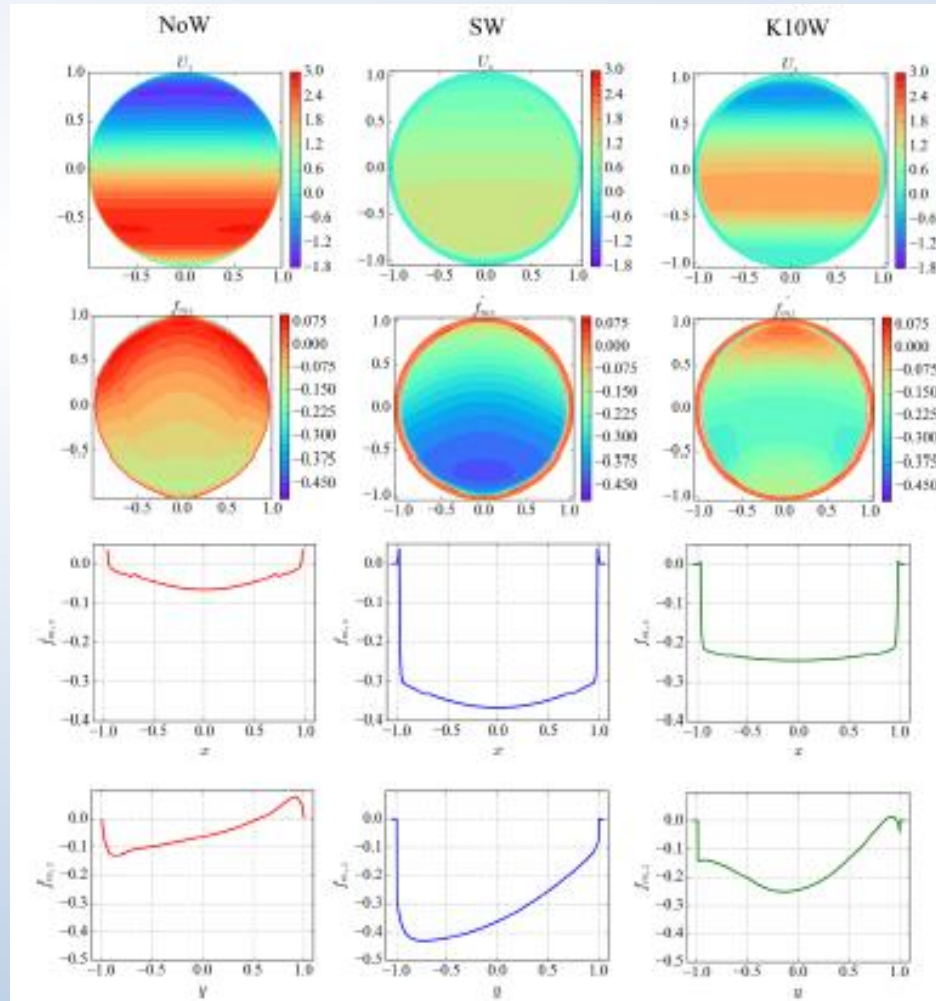
IsolW





Опускное течение ртути в круглой трубе

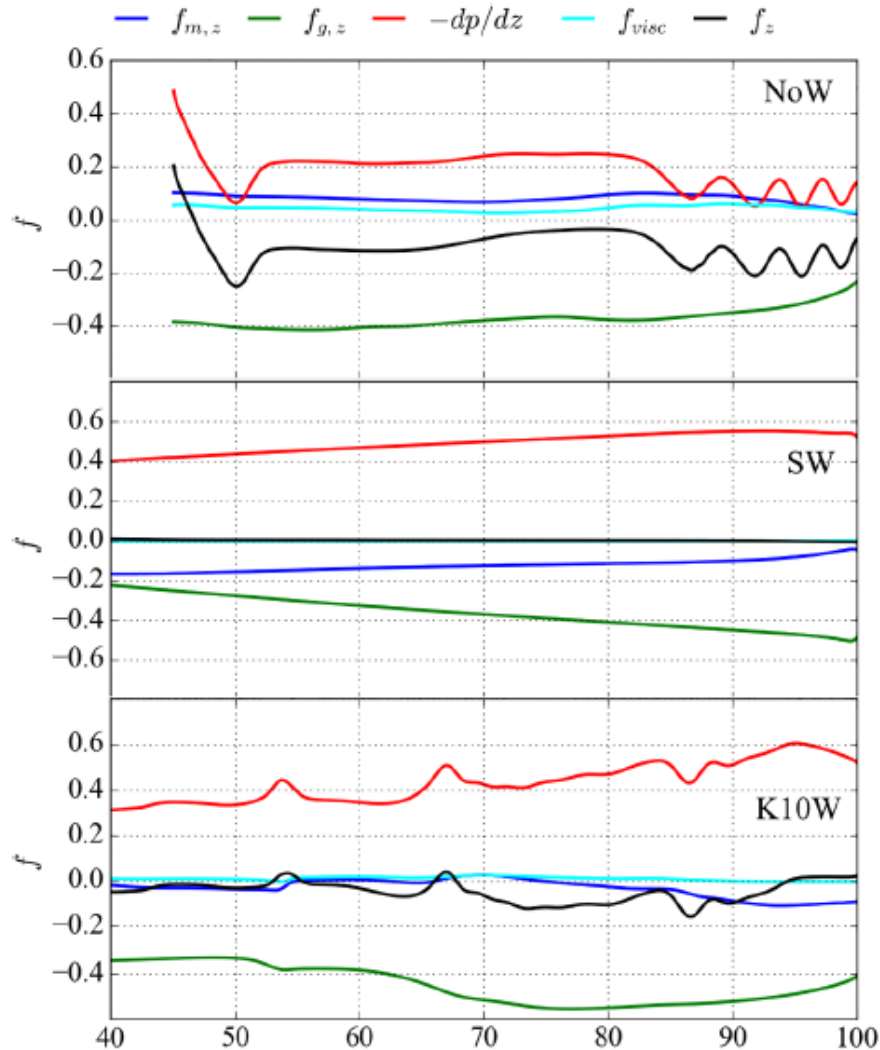
$Na = 300$ $Re = 10\ 000$





Опускное течение ртути в круглой трубе

$$Na = 300 \quad Re = 10\,000$$



Коэффициент гидравлического сопротивления

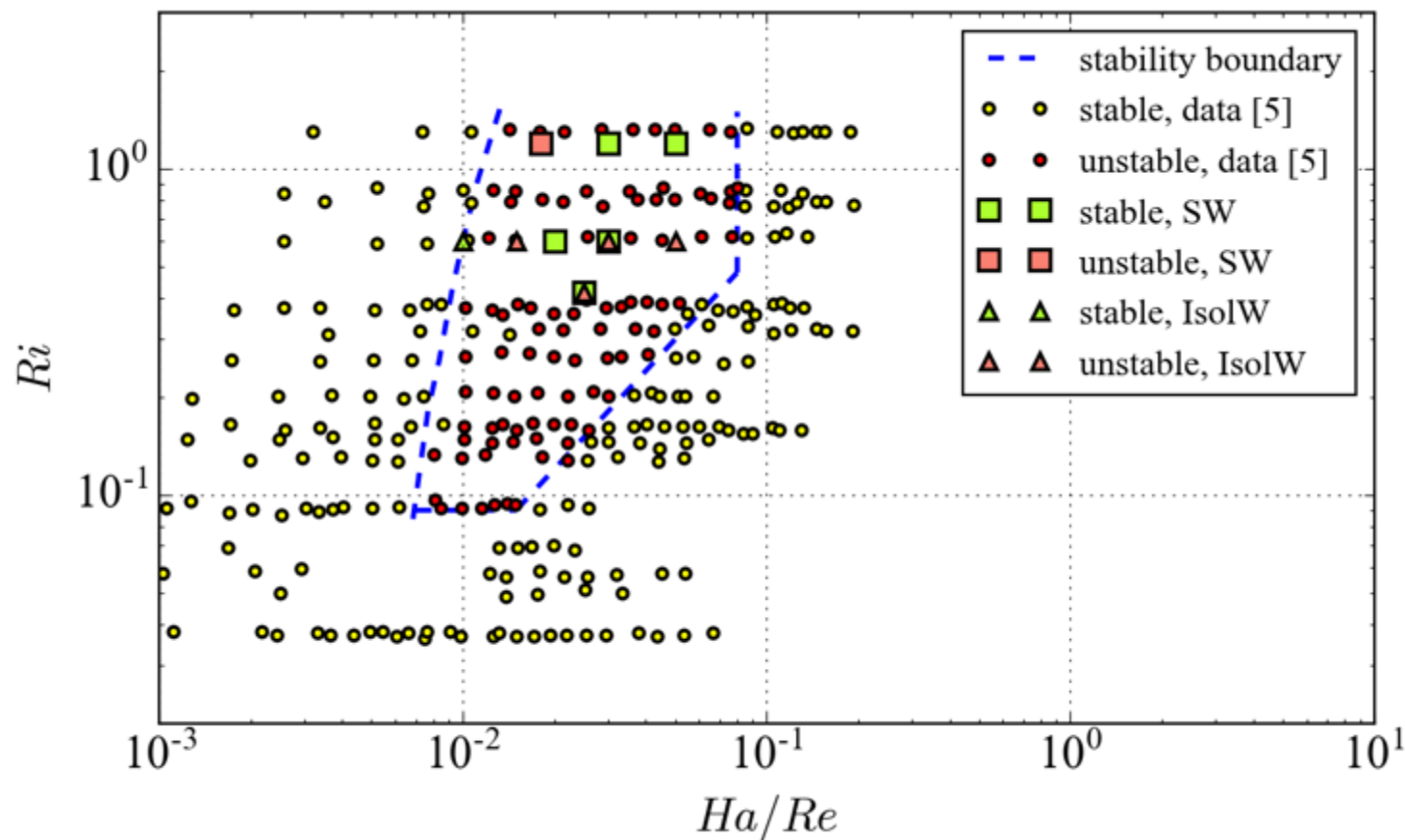
Режим	$\Delta p^*, Pa$	ζ
NoW	740,3	0,882
IsolW	753,3	0,898
K10W	1369,7	1,632
SW	1635,1	1,948

$$\xi = \frac{\Delta p^*}{L^*} \frac{2D^*}{\rho u_0^2} = \frac{4\Delta p}{L}$$



Опускное течение ртути в круглой трубе

$$Ha = 300 \quad Re = 10\,000$$

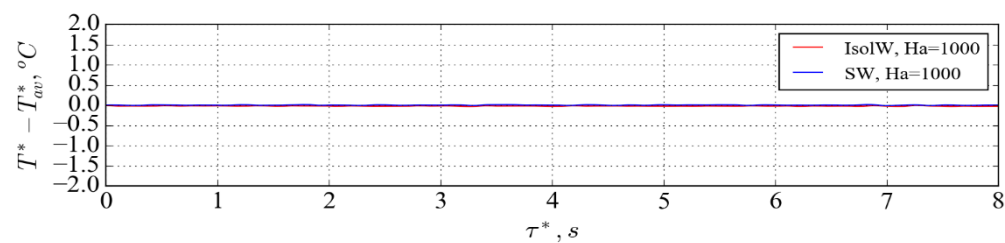
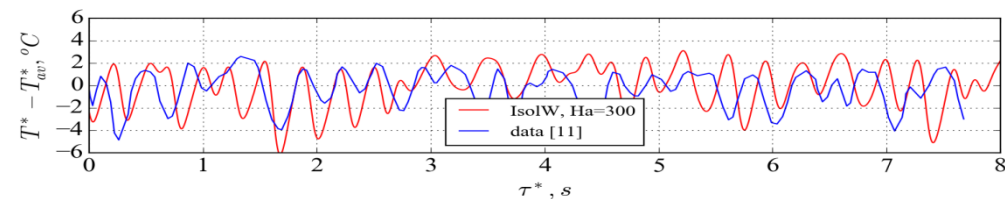
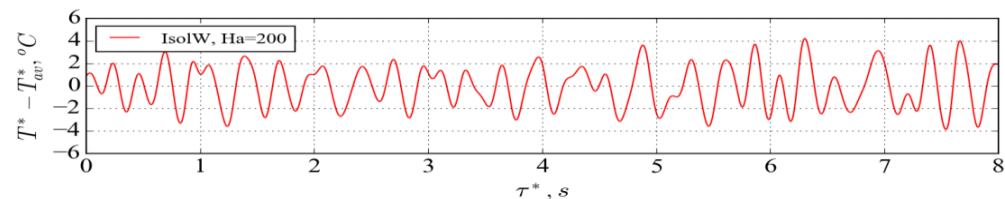
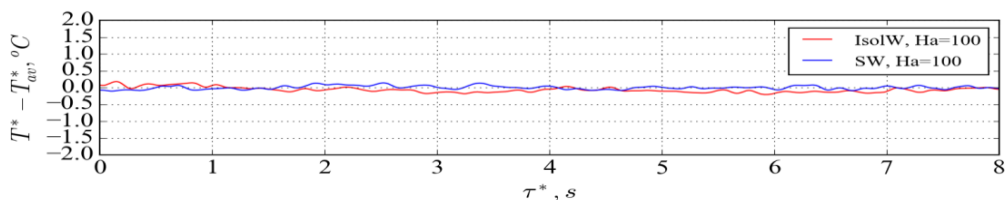
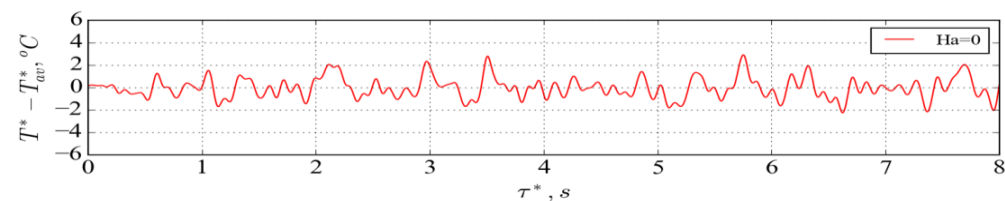


Numerical Investigation of the Effect of the Wall Properties on Downward Mercury Flow and Temperature Fluctuations in a Vertical Heated Pipe under a Transverse Magnetic Field. V.I. Artemov, M.V. Makarov, G.G. Yankov, K.B. Minko *International Journal of Heat and Mass Transfer* 218 (2024) 124746

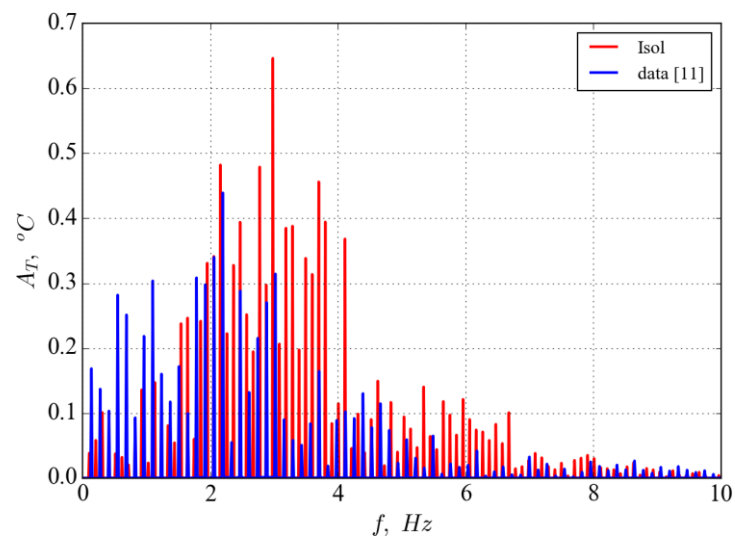
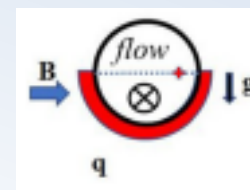


Течение ртути в горизонтальной трубе

$Re = 10\,000$



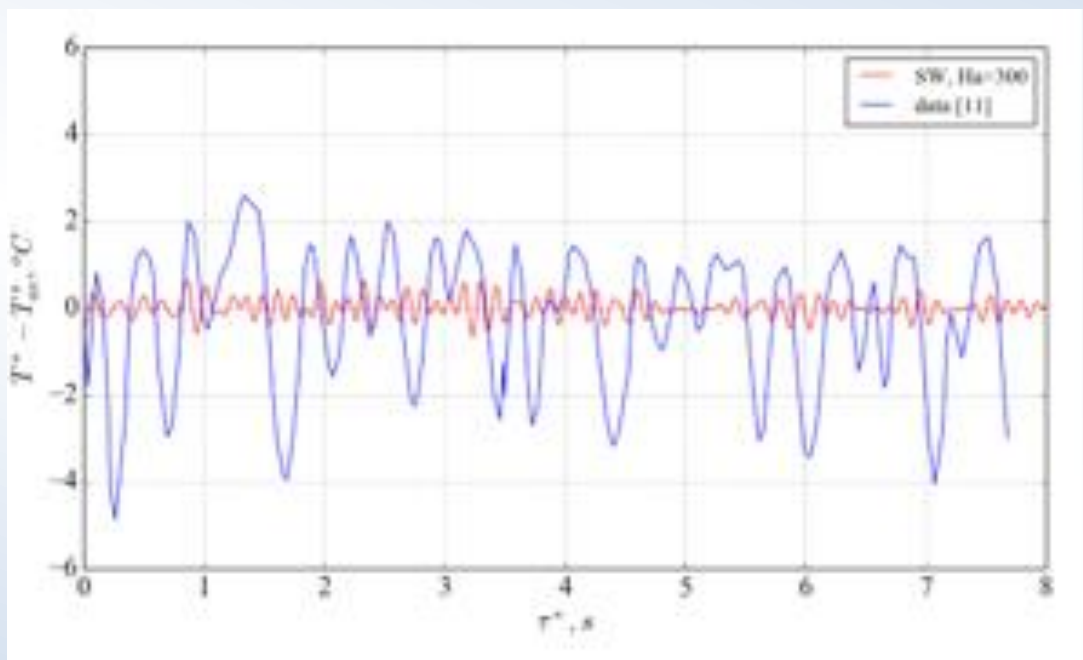
Температурные пульсации в контрольном сечении $37D^*$ от начала обогрева в точке $x = 0,75R, y = 0$.





Течение ртути в горизонтальной трубе

$Ha = 300$ $Re = 10\,000$



SW



РОСАТОМ

ЯО России

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ



Опускное течение ртути в круглой трубе

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0,$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u} - \left(\frac{1}{Re_0} + \nu_{sgs} \right) \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p + \beta_p + \mathbf{f}_g + \mathbf{f}_m,$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\theta - \left(\frac{1}{Pe_0} + \frac{\nu_{sgs}}{Pr_{sgs}} \right) \nabla \theta) = 0, \quad (\rho c)_s \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - \nabla \cdot \left(\frac{\Lambda_s}{Pe_0} \nabla \theta \right) = 0,$$

$$\nabla \cdot (\partial \varphi) = \nabla \cdot (\partial [\mathbf{u} \times \mathbf{e}_b]), \quad \partial = \begin{cases} 1/Re_0, & \text{в жидкости} \\ \sigma_s / (Re_0 \sigma), & \text{в стенке} \end{cases}$$

$$\mathbf{f}_m = \frac{Ha_0^2}{Re_0} \left\{ -\frac{1}{Ha_0} [\nabla \partial \times \mathbf{e}_b] + (\mathbf{u} \cdot \mathbf{e}_b) \cdot \mathbf{e}_b - \mathbf{u} \right\}, \quad \mathbf{e}_b = (-1, 0, 0),$$

$$\left\{ -\frac{\partial \theta}{\partial n} \right\} \Big|_{r=1} = \begin{cases} 2, & 10 + L_{ad_in} < z < L_q \text{ and } y \geq 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad \left\{ \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial n} \right\} \Big|_{r=1} = 0 \quad \text{без стенки};$$

$$\left\{ -\Lambda_s \frac{\partial \theta}{\partial n} \right\} \Big|_{r=1+\delta_w} = \begin{cases} 2/(1+\delta_w), & 10 + L_{ad_in} < z < L_q \text{ and } y \geq 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad \left\{ \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial n} \right\} \Big|_{r=1+\delta_w} = 0 \quad \text{со стенкой}$$