

**ИССЛЕДОВАНИЕ МГД ТЕПЛООБМЕНА ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ПРИ ТЕЧЕНИИ В  
ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ.**

**Л.Г. Генин<sup>1</sup>, И.А.Мельников<sup>1</sup>, Ю.П. Ивочкин<sup>2</sup>, В.Г. Свиридов<sup>1</sup>, Н.Г. Разуванов<sup>2</sup>,  
Е.С. Чекменева<sup>1</sup>, Шашурин А.Д.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Московский энергетический институт, 111250, Москва, Красноказарменная, 14*

<sup>2</sup> *Объединенный институт высоких температур РАН, 125412, Москва,*

*Ижорская ул., 13.*

**АННОТАЦИЯ**

Проведены экспериментальные исследования теплообмена при опускном течении жидкого металла (ЖМ) в вертикальной трубе с однородным обогревом в поперечном магнитном поле (МП). Эксперимент приближен к условиям blankets термоядерного реактора (ТЯР) типа токамак. Измерены профили осредненной температуры, распределения локальных и средних коэффициентов теплоотдачи (чисел Нуссельта), интенсивности и спектры пульсаций температуры.

Поперечное МП подавляет турбулентность и вызывает эффект Гартмана [1]. Вследствие этого, числа Нуссельта в среднем снижаются с турбулентных до ламинарных значений. При этом распределение температуры стенки по периметру трубы становится неоднородным, с появлением максимумов и минимумов. В некоторых режимах в поперечном МП наблюдается появление низкочастотных пульсаций, интенсивность которых в несколько раз превышает уровень турбулентных пульсаций. Эти пульсации вызваны вторичными вихревыми структурами, с осями параллельными МП, инфицированными силами плавучести.

## ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования гидродинамики и теплоотдачи при течении ЖМ в трубе проводятся на ртутных стендах МГД-комплекса МЭИ-ИВТ РАН. Предыдущие исследования МГД-теплообмена в потоке ртути в горизонтальной трубе в *поперечном* магнитном поле выполнены [2, 3]. Наблюдалось значительное влияние термогравитационной конвекции (ТГК) на поля температуры и распределения коэффициентов теплоотдачи в случае однородного и неоднородного обогревов. Вторичные течения ТГК приводили к закрутке потока и к интенсификации теплоотдачи в горизонтальной обогреваемой трубе. Распределение температуры стенки становилось неоднородным по периметру сечения трубы. В поперечном МП подавлялась турбулентность, ТГК в общем ослаблялась и эффекты, связанные с ней уменьшались. Средние по периметру сечения трубы числа Нуссельта снижались до значений  $Nu_{л,на}=7$ , соответствующих ламинарному течению при наличии эффекта Гартмана. При обогреве только нижней стороны трубы в МП было обнаружено появление низкочастотных, почти монохроматических пульсаций температуры аномально высокой интенсивности [2]. Возникновение этого эффекта связано, предположительно, с формированием периодических вторичных вихревых структур с осями, параллельными МП.

Исследования при опускном течении ЖМ в вертикальной трубе первоначально проводились на МГД-стенде в МЭИ в *продольном* МП [4]. При однородном обогреве трубы в некоторых режимах в МП наблюдался ряд неожиданных эффектов, вызванных ТГК: возникновение низкочастотных пульсаций температуры и связанная с ними интенсификация теплоотдачи. Такая конфигурация течения не характерна для теплообменных каналов ТЯР. В практических приложениях к токамаку наиболее вероятно вертикальное расположение каналов в поперечном МП, что и является предметом настоящего исследования.

## 1. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследуемая схема течения жидкометаллического теплоносителя в трубе и система координат показаны на рис. 1. В данной работе рассматривается опускное течение ртути в прямой вертикальной трубе с электропроводной стенкой. Участку однородного обогрева ( $q_c = \text{const}$ ) предшествует необогреваемый участок гидродинамической стабилизации. Участок МП совпадает с участком обогрева.

Вид реконструированного стенда ИВТ РАН, на котором проводятся экспериментальные исследования, показан на рис. 2., схема установки - на рис. 3.

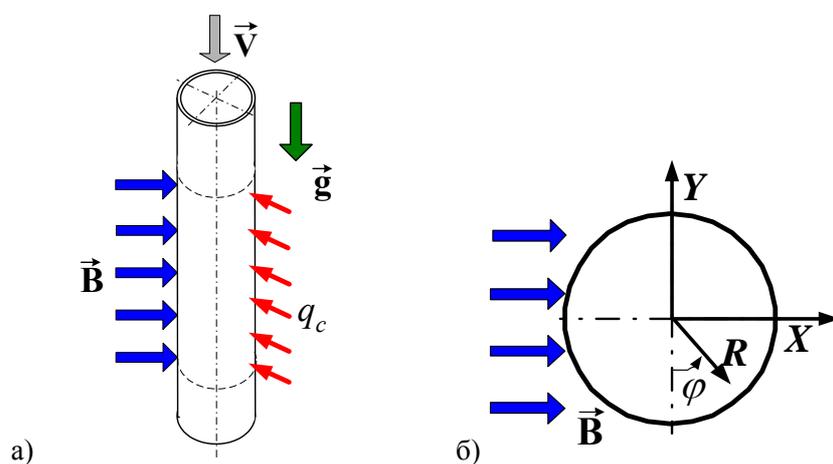


Рис. 1. Исследуемая конфигурация МГД-теплообмена (а) и система координат (б).

Ряд параметров экспериментальной установки:

- Внутренний диаметр рабочего участка  $d$ , мм 19
- Длина рабочего участка, м 2.005 (106  $d$ )
- Материал рабочего участка нержавеющая сталь
- Плотность теплового потока ( $q_c$ ), кВт/м<sup>2</sup> 0...55
- Длина обогреваемого участка, м 0.85 (45  $d$ )
- Индукция магнитного поля (В), Т 0...1.0

- Длина электромагнита (обмоток), м 0.7 (37 *d*)
- Длина однородного магнитного поля, м 0.5 (26 *d*)

Числа Рейнольдса, Гартмана и Рэлея в экспериментах имели следующие значения:

$$Re = 5000 \div 100000;$$

$$Ha = 0 \div 500, \text{ индукция МП } B = 0 \div 1 \text{ Тл};$$

$$Gr_q = (g \beta q d^4 / \lambda v^2) = 0 \div 1.3 \cdot 10^8, \text{ плотность теплового потока на стенке } q_c = 0 \div 55 \text{ кВт/м}^2.$$

Исследования проводились зондовым методом с использованием микротермопар. Зонд рычажного типа применялся для подробных измерений в сечении трубы, удаленном от входа в зону обогрева на расстоянии 37 *d*, в области однородного МП - на расстоянии 25 *d*. Температура стенки для определения коэффициентов теплоотдачи (чисел Нуссельта) определялась «из потока», то есть экстраполяцией на стенку измеренного профиля температуры в потоке.

Такой способ дает большую точность по сравнению с использованием термопар, заделанных в стенку. Эксперимент был полностью автоматизирован.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При течении электропроводной среды – жидкого металла – в поперечном МП вследствие электромагнитного взаимодействия гидродинамика потока сильно изменяется, МП подавляет турбулентность. Поперечное МП приводит к возникновению вихревых электрических токов в поперечном сечении потока в трубе в соответствии с законом Ома:  $\mathbf{j} = \sigma_e(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B})$ , где  $\mathbf{j}$  – вектор плотности электрического тока,  $\mathbf{E}$  – напряженность электрического поля,  $\sigma_e$  – электропроводность среды. Взаимодействие токов с внешним магнитным полем приводит к появлению тормозящей силы, увеличению гидравлического сопротивления и уплощению профилей скорости преимущественно в направлении индукции МП – эффект Гартмана [1]. Соответственно, поле температуры в МП теряет осевую симметрию.

На рис. 4 показаны измеренные профили безразмерной осредненной температуры в двух взаимно перпендикулярных плоскостях для разных чисел Гартмана. Безразмерная температура определяется величиной  $\Theta = \frac{T - T_{жс}}{q_c d / \lambda}$ , где  $T_{жс}$  – среднemasсовая температура жидкости в данном сечении трубы,  $\lambda$  – теплопроводность среды. Ось  $X$  направлена вдоль МП (рис. 1), где профиль скорости уплощается, соответственно профиль температуры – более ровный и менее вытянут по сравнению с профилем по оси  $Y$ .

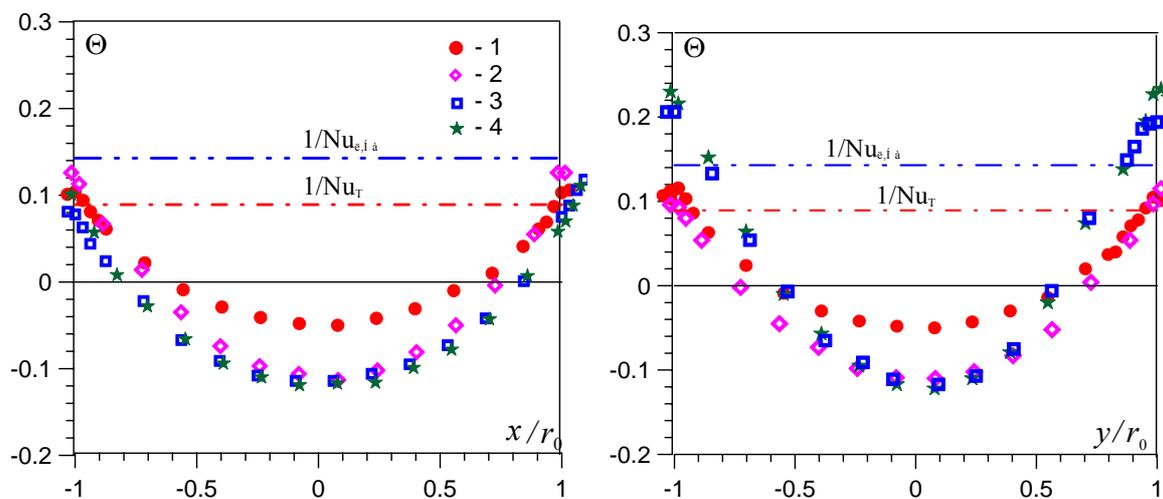


Рис. 4 Профили безразмерной температуры стенки в сечении трубы  $37d$ ,

$$q_c = 55 \text{ кВт/м}^2 \text{ (Gr}_q = 0.8 \cdot 10^8 \text{), Re} = 20000,$$

в поперечном МП: 1)  $Ha=0$ ; 2) 100, 3) 300, 4) 500.

Соответственно распределение температуры стенки, а значит и локальных коэффициентов теплоотдачи (чисел Нуссельта), становится неоднородным по периметру, с образованием двух максимумов и минимумов. На рис. 5 показаны эти графики, где выше представлена зависимость величины  $\Theta_c = \frac{T_c(\varphi) - T_{жс}}{q_c d / \lambda}$  от угла  $\varphi$ , а ниже – величина, обратная ей  $Nu = 1 / \Theta_c(\varphi)$ . Для сравнения на графиках также показаны значения числа Нуссельта: для развитого турбулентного течения, рассчитанные по формуле Лайона:

$$\text{Nu}_T = 7 + 0.025\text{Pe}^{0.8}; \quad (1)$$

для стабилизированного ламинарного течения  $\text{Nu}_L = 4.36$ , а также в МП с учетом эффекта Гартмана  $\text{Nu}_{L, \text{Ha}} = 7$ . Локальные значения теплоотдачи в двух точках сечения трубы в поперечном МП достигают минимальных значений на уровне  $\text{Nu}_L = 4.36$ , а в некоторых режимах - и ниже, то есть наблюдается зона ухудшенной теплоотдачи.

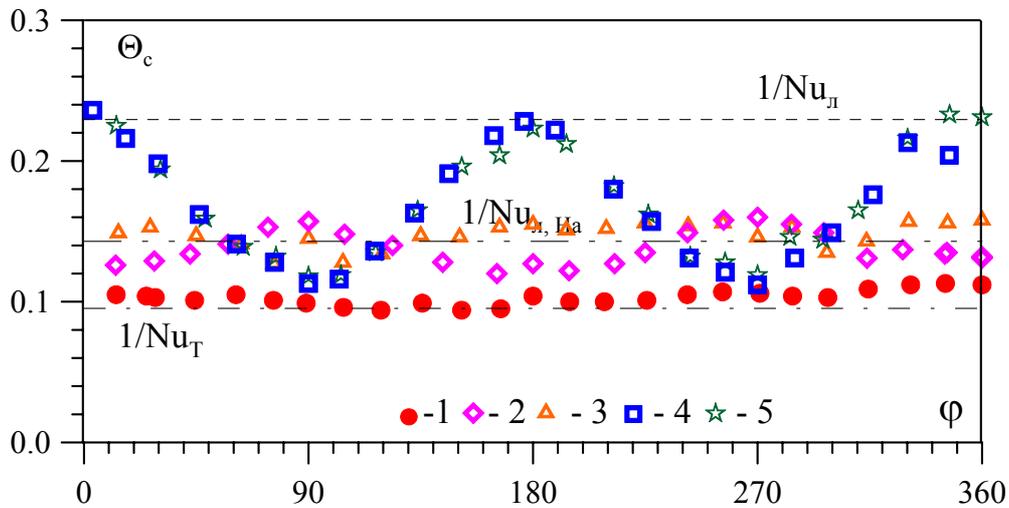


Рис. 5 Распределение безразмерной температуры стенки  $\Theta_c = \frac{(T_c - T_w)\lambda}{q_c d}$  и числа Нуссельта

$\text{Nu} = 1/\Theta_c$  по периметру в сечении трубы  $z/d = 37$ ,  $q_c = 55 \text{ кВт/м}^2$  ( $\text{Gr}_q = 1.25 \cdot 10^8$ ),  $\text{Re} = 20000$ , в поперечном МП: 1)  $\text{Ha} = 0$ ; 2) 100, 3) 200, 4) 300, 4) 500.

На рис. 6 показана зависимость среднего по сечению числа Нуссельта от числа Пекле  $\text{Pe} = \text{Re} \text{Pr}$  (число Прандтля  $\text{Pr}$  для ртути  $\sim 0.025$ ). Хорошо видно, что без МП средние числа Нуссельта оказываются вблизи зависимости Лайона (1), с ростом числа Гартмана теплоотдача снижается в среднем до значений  $\text{Nu}_{L, \text{Ha}} = 7$ . При этом числа Нуссельта при малых числах  $\text{Pe}$  оказываются несколько ниже этого значения. Это можно объяснить влиянием сил плавучести, которые препятствуют течению нагретых слоев жидкости вблизи стенки и в поперечном МП могут

привести к возвратным течениям ТК. Однако по данным температурных измерений об этом трудно судить.

Локальные значения числа Нуссельта, как мы видели раньше, могут заметно отличаться от средних. Говоря о локальных характеристиках теплоотдачи, мы рассматриваем безразмерную разность температур стенки и среднемассовой температуры в данном сечении. На рис. 7 показаны эти значения в зависимости от числа Пекле для двух углов  $\varphi$ . Этот факт необходимо учитывать в инженерных расчетах

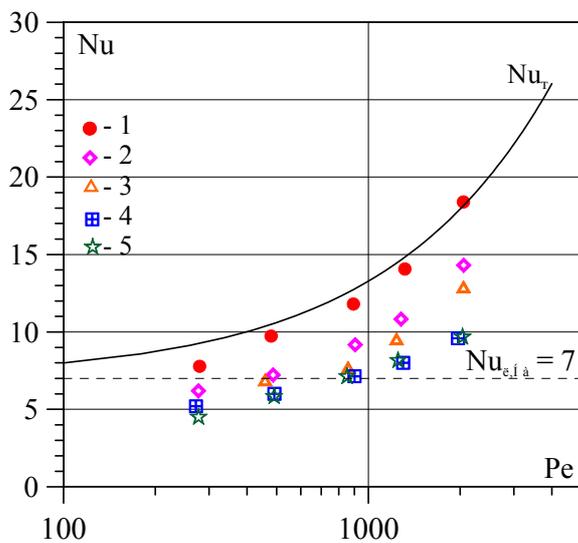


Рис. 6 Средние числа Нуссельта

$$q_c = 35 \text{ кВт/м}^2 \text{ (Gr}_q = 0.8 \cdot 10^8 \text{):}$$

1)  $Ha=0$ ; 2) 100, 3) 300, 4) 500.

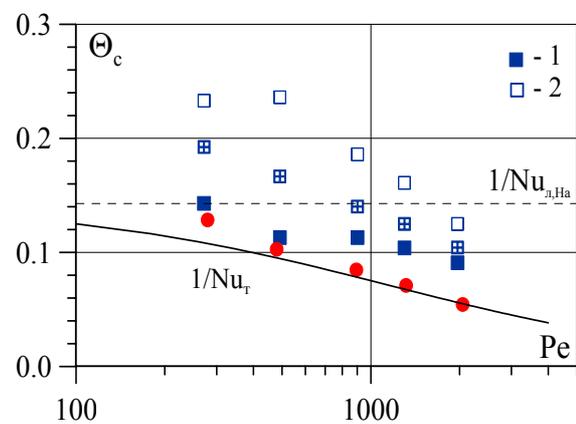


Рис. 7 Безразмерная температура стенки

$\Theta_c$  в отсутствие МП (круг) и в МП с  $Ha=300$

(квадрат): 1)  $\varphi=0$ ; 2)  $\varphi=90$

Рассмотрим теперь данные по пульсационной составляющей температуры. Хорошо известно, что МП подавляет турбулентность и повышает критическое число Рейнольдса. По опытным данным о коэффициентах гидравлического сопротивления [5] критическое число Рейнольдса в магнитном поле можно оценить выражением  $Re_{кр} \sim 900Ha$ . То есть при значении числа Гартмана  $Ha=100$ ,  $Re_{кр} \sim 90000$  и почти во всем диапазоне режимных параметров в эксперименте мы ожидали полного подавления турбулентности. В общем, в большинстве режимов это и наблюдается: с ростом числа Гартмана интенсивность пульсаций температуры снижается практически до нулевого значения. Однако в некоторых режимах с достаточно

большими соотношениями  $Gr_q/Re^2$  этого не происходит, интенсивность пульсаций при небольших значениях числа Гартмана ( $Ha=100\div 200$ ) сначала снижается, а потом ( $Ha=300\div 500$ ) значительно вырастает, как показано на рис. 8. При этом осевая симметрия в распределении интенсивности температурных пульсаций нарушается. Как видно на рис. 9, в поперечном МП наблюдаются два симметричных максимума вблизи образующих трубы с углами  $\varphi=0$  и  $180^\circ$ .

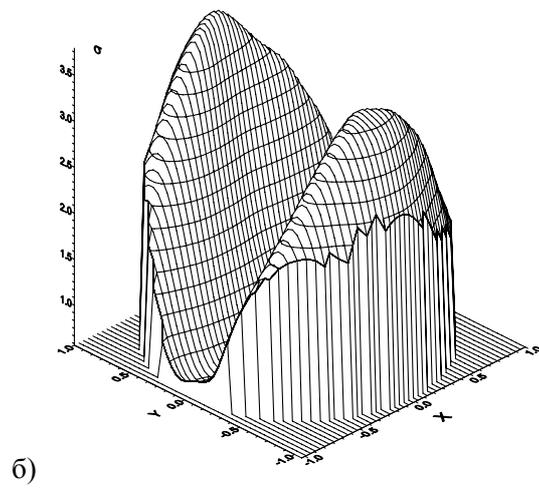
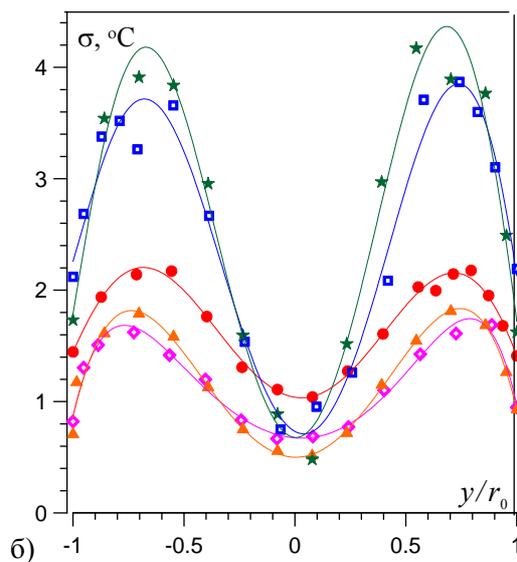
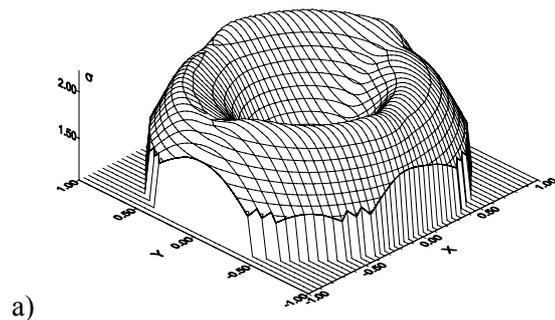
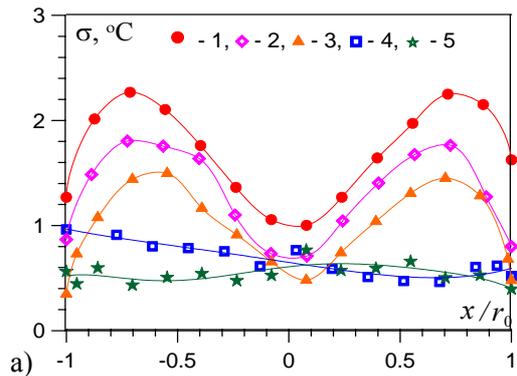


Рис. 8 Профили интенсивности

температурных пульсаций в сечении трубы  $z/d$

$$= 37, q_c = 55 \text{ кВт/м}^2$$

( $Gr_q = 1.25 \cdot 10^8$ ),  $Re = 20000$ , в поперечном МП:

- 1)  $Ha=0$ , 2) 100, 3) 200, 4) 300, 5) 500.

Рис. 9 Распределение интенсивности

температурных пульсаций в сечении трубы

$$z/d=37, q_c = 55 \text{ кВт/м}^2 (Gr_q = 1.25 \cdot 10^8), Re$$

$=20000$ : а)  $Ha=0$ ; б) 300,

Характерные осциллограммы пульсаций и спектры в районе максимума интенсивности показаны на рис. 10.

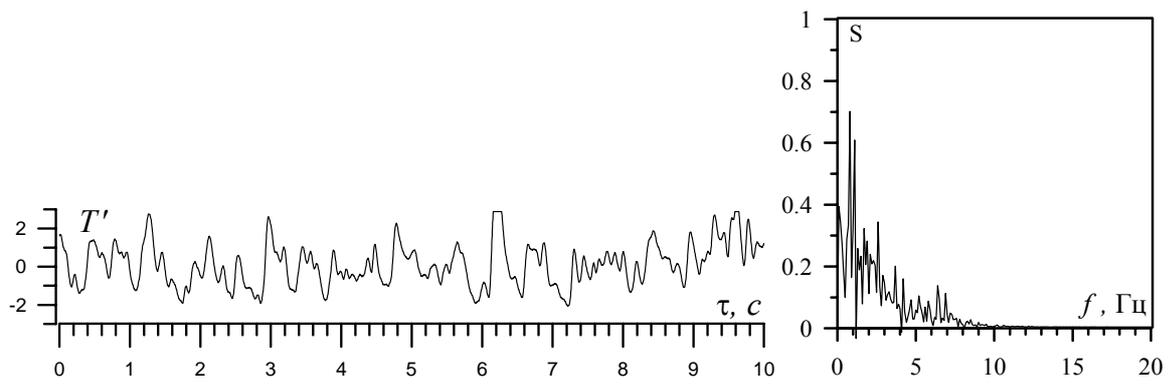
В отсутствие МП в режиме течения  $q_c = 35 \text{ кВт/м}^2$  ( $Gr_q = 0.8 \cdot 10^8$ ),  $Re = 12000$  амплитуда пульсаций не превышает двух градусов, а спектр 10 Гц.

При больших значениях МП ( $Ha = 300$ ) при больших значениях  $q_c$  наблюдаются низкочастотные всплески с амплитудой выше  $10^\circ \text{C}$ . Спектр сужается до 1 Гц. С дальнейшим ростом числа Гартмана наблюдаются редкие, но очень интенсивные низкочастотные всплески с периодом 25-40 с. Эти пульсации температуры непосредственно вблизи стенки оказываются по амплитуде выше, чем при турбулентном течении в отсутствие МП. Учитывая их низкочастотный характер, они легко проникают в стенку, что весьма опасно для материала стенки.

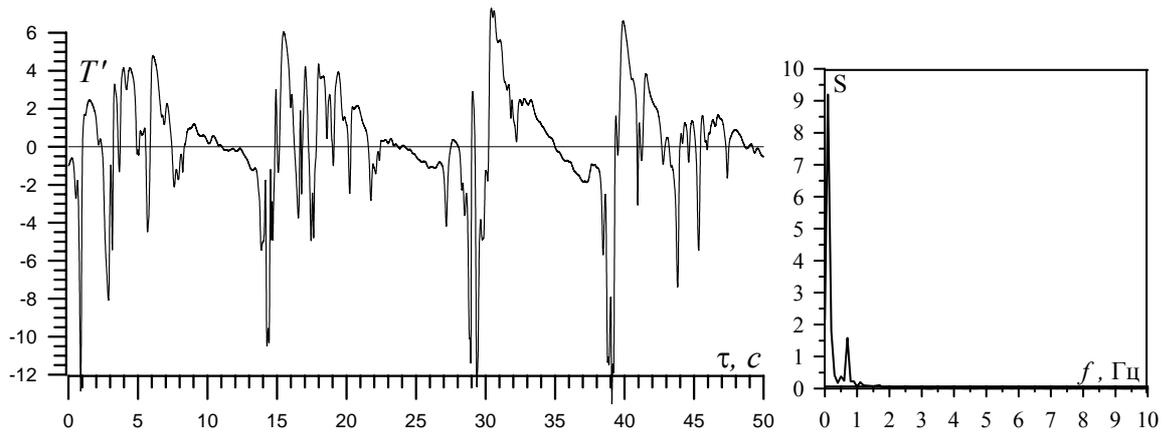
Причина этого эффекта в развитии ТГК в поперечном МП. Силы плавучести действуют на нагретые слои жидкости вблизи стенки и приводят к их отрыву с формированием периодических крупномасштабных вихревых структур. Опытные данные, полученные нами в других конфигурациях течения в МП, например, в горизонтальной трубе при обогреве только нижней половины периметра трубы [4,5], подтверждают существование в потоке вихревых образований с осями параллельными индукции МП. Также подобные структуры были обнаружены и подробно исследовались в работах других авторов [6,7].

Переход к неустойчивости с появлением аномальных пульсаций достаточно резкий (рис 11), что позволяет определить границы проявления этого МГД-эффекта. Предельное число Грасгофа  $Gr_n(Re)$  для учета этого эффекта для разных чисел Гартмана показано на рис. 12.

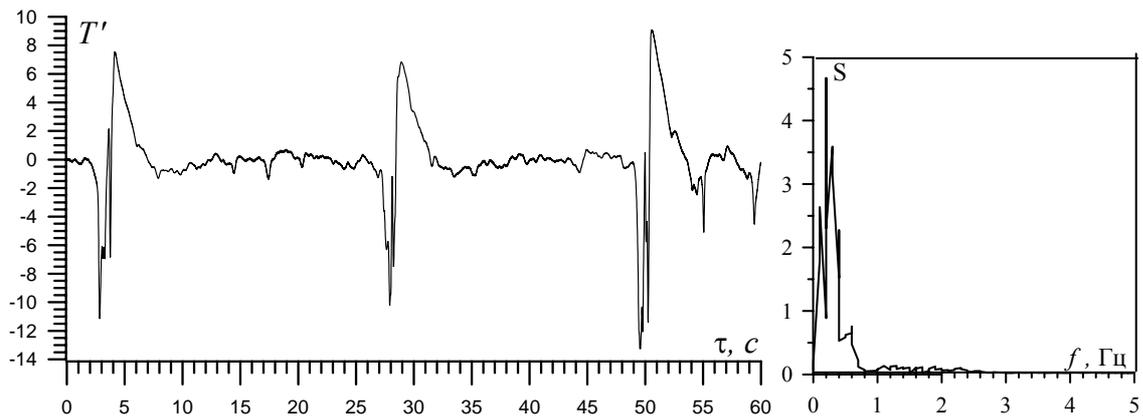
Данные по температурным пульсациям имеют значение для расчета теплообменных каналов, так как, проникая в стенку, они приводят к дополнительным напряжениям, вызывают преждевременное усталостное разрушение материала. Из результатов видно, что магнитное поле в некоторых случаях приводит к увеличению интенсивности пульсаций температуры вблизи стенки. Поэтому пульсации необходимо учитывать в любом случае, тем более что в теплообменнике реактора они могут достигать десятков градусов.



а)  $Ha=0$



б)  $Ha=300$



в)  $Ha=500$

Рис. 10 Характерные пульсации температуры и спектры:  $z/d=37$ ,  $q_c=35$  кВт/м<sup>2</sup> ( $Gr_q=0.8 \cdot 10^8$ ),  $Re=12000$ , в поперечном МП в ядре потока.

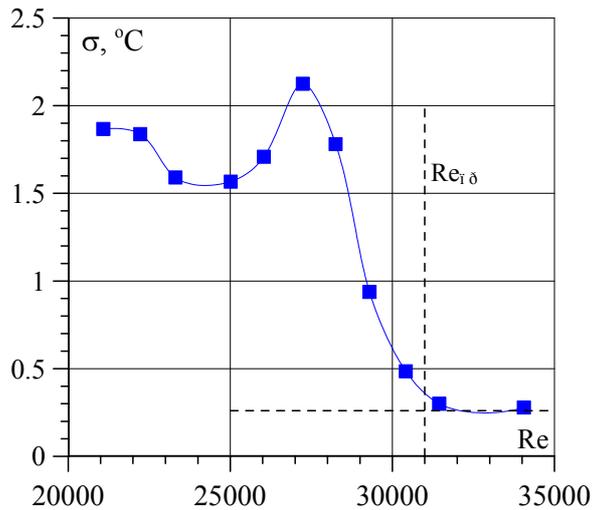


Рис. 11. Определение границы эффекта появления пульсаций температуры аномальной интенсивности в режиме течения  $q_c=55 \text{ кВт/м}^2$ ,  $Na = 320$ .

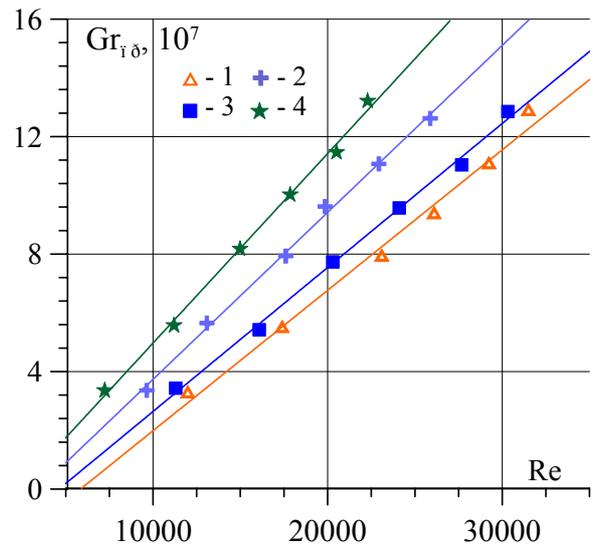


Рис. 12. Границы проявления аномальных пульсаций  $Re_n(Gr_n)$ :  
1)  $Na = 210$ , 2)  $320$ , 3)  $410$ , 4)  $500$ .

Работа поддержана грантами Минобрнауки РФ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Брановер Г.Г., Цинобер А.Б. Магнитная гидродинамика несжимаемых сред. М.: Наука, 1970, 379 с.
- [2] Генин Л.Г., Жилин В.Г., Ивочкин Ю.П., Листратов Я.И., Разуванов Н.Г., Свиридов В.Г. Экспериментальное исследование развития теплообмена по длине трубы при течении жидкометаллического теплоносителя в поперечном магнитном поле/ Теплоэнергетика – 2004. - № 3.- С. 17-29.
- [3] Ковалев С. И., Муравьев Е.В., Свиридов В.Г., Новые аспекты теплообмена при течении жидкого металла в магнитном поле термоядерного реактора/ Вопросы атомной науки и техники, сер. Термоядерный синтез,-1990, -вып.1, -с.32-37.

[4] В.Г. Свиридов, Н.Г. Разуванов, В.Г. Жилин, Ю.П. Ивочкин, Я.И. Листратов, Е.В. Свиридов, И.А. Беляев, Влияние вторичных течений на теплообмен жидкого металла в горизонтальной трубе при неоднородном обогреве в магнитном поле. / Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках. Материалы третьей международной конференции. – Москва, МЭИ(ТУ), 2008.

[5] V.G. Sviridov, N.G. Razuvanov, Yu.P. Ivotchkin, Ya.I. Listratov, E.V. Sviridov., L.G.Genin, V.G. Zhilin, I. A. Belyaev. Liquid Metal Heat Transfer Investigations Applied to Tokamak Reactor/ Proceeding of the International Heat Transfer Conference IHTC14, August 8-13, 2010, Washington, DC, USA, p.1-8.

[6] Magnetic Convection. Hiroyuki Ozoe, Imperial College Press 230 p. 2005

[7] Numerical simulation of magnetic control of heat transfer in thermal convection  
S.Kenjeres, K.Hanjalic. International Journal of Heat and Fluid Flow, Volume 25, Issue 3, June 2004, Pages 559-568, Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-3)