

УДК 621.039.6.536.24

## ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В УСЛОВИЯХ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

*И.И. Поддубный<sup>1</sup>, Н.Ю. Пятницкая<sup>2</sup>, Н.Г. Разуванов<sup>2</sup>, В.Г. Свиридов<sup>2</sup>, Е.В. Свиридов<sup>2</sup>,  
А.Ю. Лешуков<sup>1</sup>, К.В. Алесковский<sup>3</sup>, Д.М. Обухов<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Акционерное общество «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежалая» (АО «НИКИЭТ»), Москва, Россия

<sup>2</sup>Объединённый институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

<sup>4</sup>Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова» (АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»), Санкт-Петербург, Россия

Исследуется эффект, обнаруженный при опускном течении жидкого металла (ЖМ) в вертикальной трубе и канале прямоугольного сечения в поперечном и компланарном магнитном поле (МП) соответственно. В испытательных модулях blankets (ИМБ) — прототипах blankets демонстрационного термоядерного реактора (ТЯР ДЕМО), предназначенных для экспериментального исследования в ИТЭР, жидкие металлы одновременно выполняют следующие функции: воспроизводство трития (бриддер); теплоноситель; замедлитель и размножитель нейтронов. Указанный подход к экспериментальной отработке конструкторских решений продиктован тем, что в большинстве разрабатываемых в настоящее время проектов blankets ТЯР ДЕМО планируется использование жидких металлов, прокачиваемых по трубам и/или прямоугольным каналам в поперечном магнитном поле. Постановка экспериментов, напрямую моделирующих течение ЖМ в условия работы ИМБ ИТЭР и/или blankets ДЕМО (облучение термоядерными нейтронами, циклический температурный режим и магнитное поле порядка 4—10 Тл), в настоящее время не реализуема из-за отсутствия оборудования, способного воспроизвести одновременно перечисленные факторы воздействия термоядерной плазмы. По этой причине используется итерационный подход к экспериментальной оценке работоспособности конструкторских решений для трактов ЖМ — моделирование одного или двух одновременно указанных факторов. Таким образом, исследования, результаты которых изложены в данной статье, являются достаточно актуальными. Эксперименты выполнены на базе ртутного магнитогидродинамического (МГД) стенда, входящего в состав объединённого МГД — комплекса МЭИ—ОИВТ РАН. Проведены измерения полей температур в условиях двухстороннего и одностороннего обогрева, получены данные по полям осреднённой температуры, распределениям температуры стенки, статистическим пульсационным характеристикам. Обнаружено существенное влияние встречной термогравитационной конвекции (ТГК) на осреднённые и пульсационные величины. Развитие ТГК в условиях МП приводит к появлению низкочастотных пульсаций аномально высокой интенсивности, в несколько раз превышающей турбулентный уровень. Этот эффект проявляется в широкой области режимных параметров. Подтверждено, что низкочастотные пульсации легко проникают в стенку, поэтому требуется дальнейшее исследование обнаруженного эффекта, в частности, с точки зрения усталостной прочности стенок тракта ЖМ.

**Ключевые слова:** жидкий металл, магнитная гидродинамика, теплообмен, термогравитационная конвекция, пульсации температуры.

## HEAT TRANSFER INVESTIGATION AT LIQUID METAL FLOWING IN FUSION REACTOR CONDITIONS

*I.I. Poddubnyi<sup>1</sup>, N.Yu. Pyatnitskaya<sup>2</sup>, N.G. Razuvanov<sup>2</sup>, V.G. Sviridov<sup>2</sup>, E.V. Sviridov<sup>2</sup>,  
A.Yu. Leshukov<sup>1</sup>, K.V. Aleskovskiy<sup>3</sup>, D.M. Obukhov<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering», Moscow, Russia

<sup>2</sup>Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia

<sup>3</sup>National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

<sup>4</sup>Joint Stock Company «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», St. Petersburg, Russia

This article investigates the phenomenon which was found out in the conditions of liquid metal (LM) downward flow of in vertical pipe and rectangular duct in transversal and coplanar magnetic field respectively. In some projects of ITER test blanket modules (TBM) and corresponding DEMO blanket concepts the LMs are planned to be used for the following functions: 1) tritium breeding, 2) coolant, 3) neutrons multiplier and moderator. In the most TBM projects liquid metals flow through tubes and rectangular ducts in transversal magnetic field. However the experiments simulating the LM flow in TBM and/or DEMO blanket conditions (simultaneous exposure by neutrons, magnetic field of 4—10 T and thermal cycling) are impossible due to the absence of capable equipment. For this reason only one or two factors of fusion environment could be simulated simultaneously in order to investigate the LM flow in breeding blanket-relevant conditions. For this reason the considered investigation results are of current concern. The experiments have been performed on the mercury magneto hydrodynamic (MHD) loop which is included in a structure of MHD — experimental facility MPEI—JIHT. The temperature field measurements have been performed in one and two wall heating conditions. The averaged temperature fields, wall temperature distributions and statistical characteristics of temperature fluctuation have been obtained. The significant influence of counter thermo gravitational convection (TGC) on average and fluctuation parameters has been observed. The TGC developing under magnetic field causes the low-frequency fluctuations of temperature with anomalously high magnitude, which in several times higher of turbulence

level. This effect has been revealed in a wide range of operating conditions. It is shown that low frequency temperature fluctuations penetrate through the structural walls and for this reason it is necessary to perform the further investigation of the detected phenomenon in particular from the fatigue strength point of view for LM circuit walls.

**Key words:** liquid metal, magneto hydrodynamic, heat transfer, thermo gravitational convection, temperature fluctuation.

## ВВЕДЕНИЕ

В качестве теплоносителя в ряде проектов ИМБ международного термоядерного реактора ИТЭР рассматриваются ЖМ, главным образом это литий-свинцовая эвтектика Pb—Li, которая одновременно выполняет функции размножителя, замедлителя термоядерных нейтронов и тритийвоспроизводящего материала [1—4]. В Российской Федерации предложена концепция термоядерного источника нейтронов (ТИН) [5], в котором высокоэнергетические (14 МэВ) нейтроны используются для наработки ядерного топлива для реакторов деления. В концепции ТИН также рассматривается применение ЖМ для отведения тепла от blankets, где размещается делящийся материал, и наработки трития. В большинстве конструкций blankets с ЖМ-теплоносителем используются круглые трубы или каналы прямоугольного сечения [6]. В табл. 1 и 2 представлены характерные безразмерные критерии — числа Гартмана, Рейнольдса, Грасгофа и Стюарта, определяющие гидродинамику и теплообмен течения ЖМ в трактах охлаждения ИМБ ИТЭР и blankets реактора ДЕМО [7—13]. Стоит отметить, что в большинстве работ подробно не рассматривается влияние ТГК на осреднённые величины и практически отсутствует информация о влиянии на пульсационные характеристики. Согласно исследованиям [14, 15] результат влияния ТГК в трубах и каналах МП весьма значительный, неоднозначный и зависит от конфигурации течения по отношению к векторам ускорения свободного падения  $\mathbf{g}$  и индукции магнитного поля  $\mathbf{B}$ , а также от распределения теплового потока в сечении канала  $q_c$  (однородный, односторонний, двухсторонний).

Таблица 1. Безразмерные параметры, характерные для трактов охлаждения ИМБ ИТЭР

№	Ha	Re	Gr	$N = \text{Ha}^2/\text{Re}$	Источник
1	$6,5 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^4$	$7,0 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^3$	[7]
2	$1,1 \cdot 10^4$	$0,7 \cdot 10^2$	—	$1,8 \cdot 10^5$	[9]
4	$2,1 \cdot 10^3$	—	—	$< 0,1 \cdot 10^2$	[11]
5	$2,0 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^5$	—	$3,0 \cdot 10^3$	[12]
6	$1,7 \cdot 10^4$	$3,0 \cdot 10^4$	—	$1,0 \cdot 10^4$	[13]

Таблица 2. Безразмерные параметры, характерные для трактов охлаждения blankets ДЕМО

№	Ha	Re	Gr	$N = \text{Ha}^2/\text{Re}$	Источник
1	$1,2 \cdot 10^4$	$6,0 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^{12}$	$2,4 \cdot 10^3$	[7]
2	$5,1 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^9$	$5,8 \cdot 10^3$	[8]
3	$4,5 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^{12}$	$6,0 \cdot 10^4$	[10]
4	$1,0 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$	—	$1,0 \cdot 10^5$	[13]

Моделированием теплообмена при течении ЖМ в трубах и каналах применительно к тракту охлаждения термоядерного реактора-токамака уже много лет занимается научный коллектив МЭИ—ОИВТ РАН. Экспериментальные исследования гидродинамики и теплообмена при течении ЖМ проводились на магнитно-гидродинамическом комплексе: два ртутных стенда, на которых реализуется течение ЖМ как в продольном, так и в поперечном МП [16]. В исследованиях [17] последовательно рассматривались различные конфигурации течения и теплообмена в трубе:

- в вертикальной трубе при опускном течении в продольном МП;
- в горизонтальной трубе в продольном и поперечном МП;
- в наклонной трубе в продольном МП.

Детальные измерения полей температуры и скорости проводились зондовыми методами как в поперечном сечении, так и по длине обогреваемой зоны трубы. При проведении экспериментов обнаружено сильное совместное влияние МП и ТГК на характеристики МГД-теплообмена, которое проявляется в ранее неизвестных эффектах, в том числе неблагоприятных, которые необходимо учитывать проектировщикам. Среди этих эффектов — существование в некоторых режимах МГД-теплообмена зон ухудшенной теплоотдачи, крайне неравномерного распределения коэффициентов теплоотдачи по периметру трубы, возникновение вблизи стенки низкочастотных пульсаций температуры аномально высокой интенсивности.

В последнее время аналогичные исследования проведены в вертикальной трубе и канале прямоугольного сечения (соотношение сторон 3/1) в поперечном и компланарном МП соответственно. Эффект, связанный с появлением низкочастотных пульсаций температуры аномально высокой интенсивности, проявлялся наиболее сильно и в широком диапазоне режимных параметров именно для указанных конфигураций тракта ЖМ-теплоносителя. Данная конфигурация представляет наибольший практический интерес, поэтому обнаруженный и исследованный эффект роста пульсаций температуры необходимо учитывать при проектировании трактов охлаждения термоядерных установок.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследуемая схема течения ЖМ в полях массовых сил представлена на рис. 1. Рассматриваются стационарное течение ртути и теплообмен в вертикальной круглой трубе и прямоугольном канале при действии поперечного и компланарного (вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}$  направлен вдоль длинной стороны поперечного сечения канала  $B_x \neq 0$ ) МП. Характеристики исследуемых каналов: круглая труба (сталь марки 12X18H10T) с внутренним диаметром  $d = 19$  мм, толщина стенки  $d_w = 0,5$  мм; прямоугольный канал с соотношением сторон в поперечном сечении прямоугольного канала  $a/b = 56/17$  мм/мм, толщина стенки  $d_w = 2,5$  мм. Течение ртути опускное — по направлению ускорения свободного падения  $\mathbf{g}$  — случай так называемой встречной ТГК. В качестве характерного размера для трубы принимается диаметр  $d = 19$  мм, а для прямоугольного канала — удвоенная ширина сечения канала  $d = 2b$ .

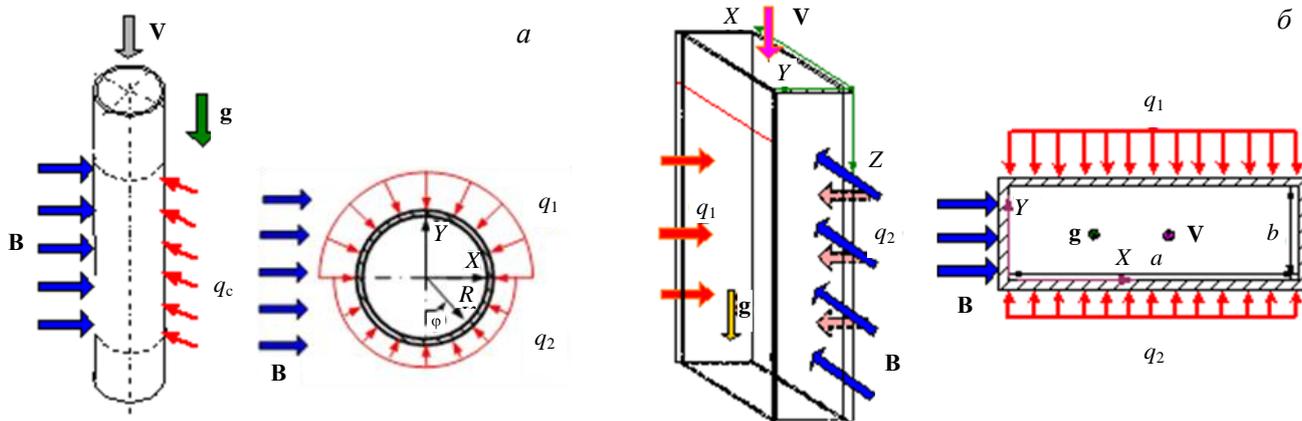


Рис. 1. Исследуемые схемы течения: *a* — круглая труба; *б* — канал прямоугольного сечения

Рассматривается однородный по длине и неоднородный по периметру сечения обогрев для круглой трубы (двусторонний с различной плотностью теплового потока (рис. 1, *a*)) и для прямоугольного канала (двусторонний  $q_1$  и  $q_2$ , по длинным сторонам сечения (рис. 1, *б*)).

Следующие безразмерные критерии определяют гидродинамику и теплообмен в задачах магнитной гидродинамики: число Рейнольдса  $Re = V_0 d / \nu$ ; число Гартмана  $Ha = B_0 d (\sigma / \nu)^{0.5}$ ; модифицированное число Грасгофа  $Gr = (g \beta q_c d^4 / \lambda \nu^2)$ , определённое через среднюю по периметру плотность теплового потока  $q_c = 0,5(q_1 + q_2)$ ; число Пекле  $Pe = Re Pr$ ; число Нуссельта  $Nu = 1 / \Theta_c = q_c d / (\lambda \Delta T)$ , где  $\Theta_c$  — безразмерная температура стенки. При определении безразмерных критериев были использованы следующие параметры:  $V_0$  — средняя скорость;  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости;  $B_0$  — индукция внешнего МП;  $\sigma$  — электропроводность ртути;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\beta$  — коэффициент температурного расширения;  $\lambda$  — теплопроводность;  $\Theta$  — безразмерная температура стенки;  $Pr$  — число Прандтля для ртути  $\sim 0,025$ .

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка представляет собой замкнутый ртутный контур. На входе в трубу (канал) имеется участок гидродинамической стабилизации около 1 м, затем ЖМ попадает в обогреваемый участок длиной 810 мм с двухсекционным нагревателем. Участок МП совпадает с участком обогрева, длина области однородного МП  $\sim 500$  мм. Индукция МП достигала 1 Тл.

Для круглой трубы длина зоны обогрева и области однородного МП  $42d$  и  $29d$  соответственно. Диапазоны значений критериев Рейнольдса, Гартмана и Грасгофа составили  $Re = 5 \cdot 10^3 - 1,2 \cdot 10^5$ ,  $Ha = 0 - 500$ ,  $Gr = 0 - 10^8$ , для прямоугольного канала  $Re = (1,0 - 5,5)10^4$ ,  $Ha = 0 - 800$ ,  $Gr = 0 - 10^8$  соответственно.

Измерения поля температуры в поперечном сечении трубы на расстоянии  $37d$  от входа в зону обогрева и в канале на расстоянии  $20d$  выполнялись с помощью зонда рычажного типа (рис. 2), расположенного на торце рабочего участка. На конце зонда установлена медно-константановая микротермопара (погрешность измерения  $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) с размером спая  $0,25 \text{ мм}$ . Координаты зонда определяются по индикаторам перемещения часового типа с точностью  $0,03 \text{ мм}$ . Температура стенки трубы измерялась при касании термопарой зонда с последующей экстраполяцией на стенку измеренного профиля температуры в потоке. Указанный способ обеспечивает более высокую точность по сравнению с использованием термопар, заделанных в стенку. Эксперимент проведён с применением современной аппаратуры стандартов VXI, PXI и программных сред LabVIEW, CVI [11].

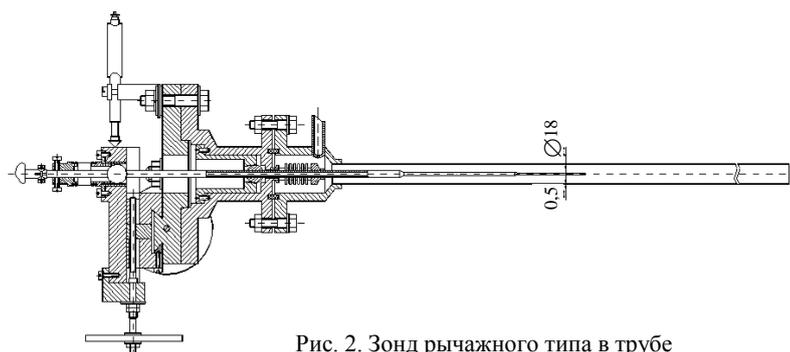


Рис. 2. Зонд рычажного типа в трубе

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При течении электропроводной среды — ЖМ 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:  $\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B})$ , где  $\mathbf{j}$  — плотность электрического тока;  $\mathbf{E}$  — напряжённость электрического поля. Взаимодействие токов с внешним магнитным полем приводит к появлению тормозящей пондеромоторной силы  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ , уплощению профиля скорости преимущественно в направлении индукции МП (эффект Гартмана), увеличению гидравлического сопротивления.

Рассмотрим случай неоднородного обогрева, когда обогревается только половина периметра сечения трубы ( $q_1 > q_2 = 0$ ). Похожая конфигурация МГД-теплообмена может присутствовать, например, в каналах blankets вблизи первой стенки.

На рис. 3 показаны поля осреднённой температуры в сечении круглой трубы в отсутствие и при наличии поперечного МП. Хорошо видно, что в МП с числом Гартмана  $Ha = 300$  изотермы сгущаются вследствие подавления турбулентности и ламинаризации потока.

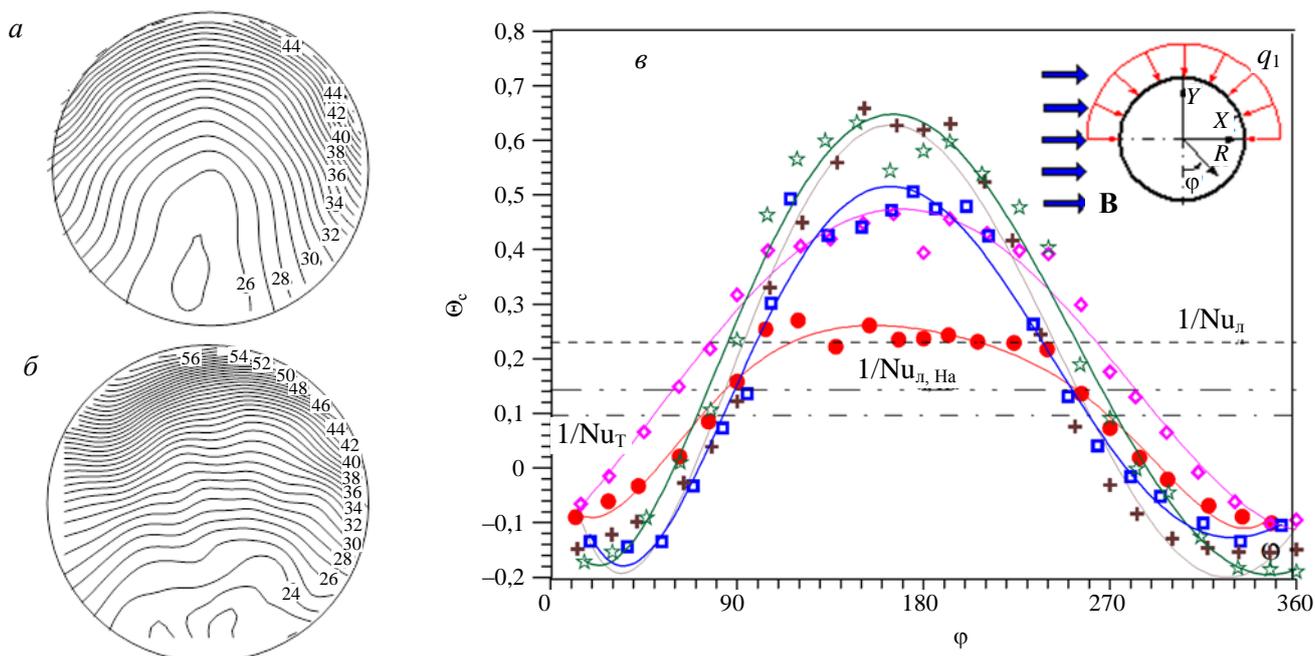


Рис. 3. Изотермы осреднённой температуры в сечении трубы,  $Re = 20 \cdot 10^3$ ,  $q_1/q_2 = 35/0 \text{ кВт/м}^2$ : а —  $Ha = 0$ ; б —  $300$ ; в — распределение безразмерной температуры стенки  $\Theta_c$  по периметру трубы:  $Ha = 0$  (●),  $120$  (◆),  $310$  (■),  $420$  (⊕),  $550$  (☆)

Распределение температуры стенки неоднородно по периметру сечения трубы. На рис. 3, в показан график, где представлена зависимость безразмерной температуры стенки  $\Theta_c = \frac{T_c(\varphi) - T_{ж}}{q_c d / \lambda}$  от угла  $\varphi$ , где  $T_{ж}$  —

среднемассовая температура жидкости в данном сечении. Для сравнения также показаны значения  $\Theta_c$  для стабилизированных течений: турбулентного без МП (по формуле Лайона  $Nu_T = 7 + 0,025 Re^{0,8}$ ), ламинарного без МП ( $Nu_{л} = 4,36$ ), ламинарного в поперечном МП при наличии эффекта Гартмана ( $Nu_{л,Ha} = 7$ ) [19].

В МП с ростом числа Гартмана неоднородность в распределении температуры стенки возрастает, при этом максимум температуры обогреваемой части стенки монотонно растёт. Заметим, что локальные числа  $Nu$  в зоне максимума температуры существенно ниже  $Nu = 4,36$  (обычно считается минимальным).

Аналогичные результаты по полям осреднённой температуры для канала прямоугольного сечения в случае обогрева только одной из сторон представлены на рис. 4. В компланарном МП (рис. 4, б) изотермы также сгущаются. Распределение температуры стенки также неравномерно по периметру сечения. На рис. 4, в показан график распределения безразмерной температуры стенки  $\Theta_c$  в виде развёртки по периметру сечения канала. Для сравнения также показаны значения, известные для плоского щелевого канала, равные обратному числу Нуссельта для стабилизированных течений: турбулентного без МП ( $Nu_T = 10 + 0,025 Re^{0,8}$ ), ламинарного без МП ( $Nu_{л} = 8,24$ ) [19].

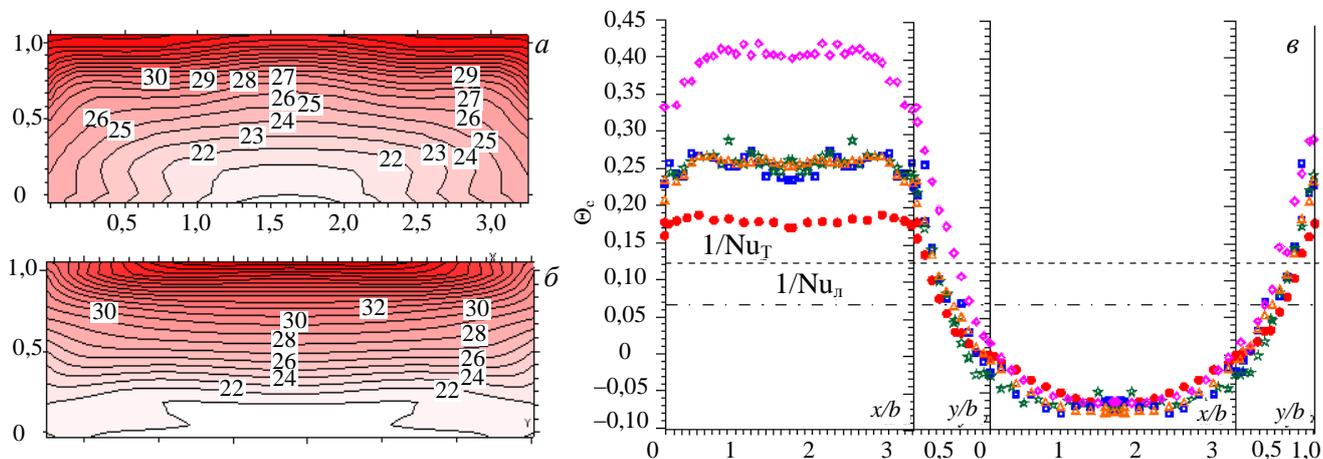


Рис. 4. Изотермы осреднённой температуры в сечении прямоугольного канала ( $Re = 30 \cdot 10^3$ ,  $q_1/q_2 = 35/0$  кВт/м<sup>2</sup>): а —  $Ha = 0$ ; б — 500; в — распределение безразмерной температуры стенки  $\Theta_c$  по периметру канала на длине  $20d$ ,  $q_c = 35/0$  кВт/м<sup>2</sup>,  $Re = 30 \cdot 10^3$ :  $Ha = 0$  (●), 120 (◆), 300 (▲), 500 (■), 800 (★)

Распределение температуры стенки неравномерно вследствие неоднородности обогрева. В МП с ростом числа Гартмана температура на обогреваемой стороне стенки сначала увеличивается при  $Ha = 120$  и  $300$ , а потом заметно снижается ( $Ha = 500$ ) и в дальнейшем не меняется ( $Ha = 800$ ). Такое немонокотное поведение  $\Theta_c$  связано с исследуемым явлением.

Рассмотрим данные по пульсационной составляющей температуры. Как уже упоминалось, поперечное МП эффективно подавляет изотермическую турбулентность в каналах и повышает критическое число Рейнольдса, которое при достаточно больших числах Гартмана может быть оценено для круглой трубы в поперечном МП по формуле  $Re_{кр, Ha} \sim 900Ha$  [19], а для прямоугольного канала  $Re_{кр, Ha} \sim 130Ha$  [20] в компланарном МП. Согласно этой оценке большинство режимов течения в диапазонах изменения критериев  $Ha$  и  $Re$ , исследованных в данной работе, должны быть режимами полного подавления турбулентности и полной ламинаризации потока. При этом интенсивность  $I$  (квадратный корень из дисперсии — среднеквадратичного отклонения от среднего) турбулентных пульсаций температуры также должна снизиться практически до нуля, что и наблюдалось в экспериментах при определённых соотношениях  $Ha$ ,  $Re$  и  $Gr_q$ . Однако в некоторых режимах МГД-течения с достаточно большими соотношениями  $Gr_q/Re^2$  этого не происходит, в данном режиме интенсивность пульсаций с ростом числа Гартмана не снижается, а наоборот, существенно возрастает. Этот эффект был обнаружен ранее в аналогичной конфигурации МГД-течения в трубе с однородным по периметру обогревом [21]. В рассматриваемом случае одностороннего обогрева эффект возрастания температурных пульсаций проявляется ещё сильнее и в более широком диапазоне чисел  $Gr$  и  $Re$ . При этом возрастание (пятикратное!) интенсивности температурных пульсаций сопровождается изменением характера их распределения по радиусу

трубы: максимум интенсивности смещается к необогреваемой стороне стенки (рис. 5). Однако интенсивность пульсаций температуры у стенки тоже существенно (в несколько раз) возрастает по сравнению со случаем отсутствия МП. Изометрическая картина распределения интенсивности температурных пульсаций представлена на рис. 6, а осциллограммы пульсационной составляющей температуры, наблюдавшиеся непосредственно в ходе эксперимента, — на рис. 7. Рис. 7, а — типичная осциллограмма турбулентных пульсаций при отсутствии МП. Ширина спектра пульсаций составляет 10 Гц с максимумом в районе 1—2 Гц, что характерно для числа  $Re = 20 \cdot 10^3$ .

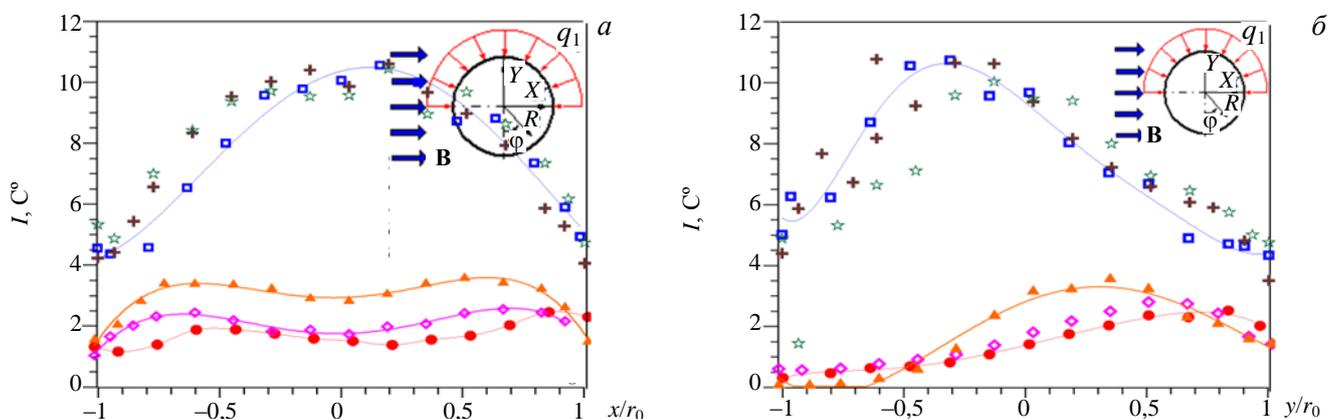


Рис. 5. Профили интенсивности пульсаций температуры в осевых плоскостях  $X$  (а) и  $Y$  (б),  $q_1/q_2 = 35/0$  кВт/м<sup>2</sup>,  $Re = 20 \cdot 10^3$ :  $Na = 0$  (●), 120 (◆), 220 (▲), 300 (■), 420 (+), 550 (☆)

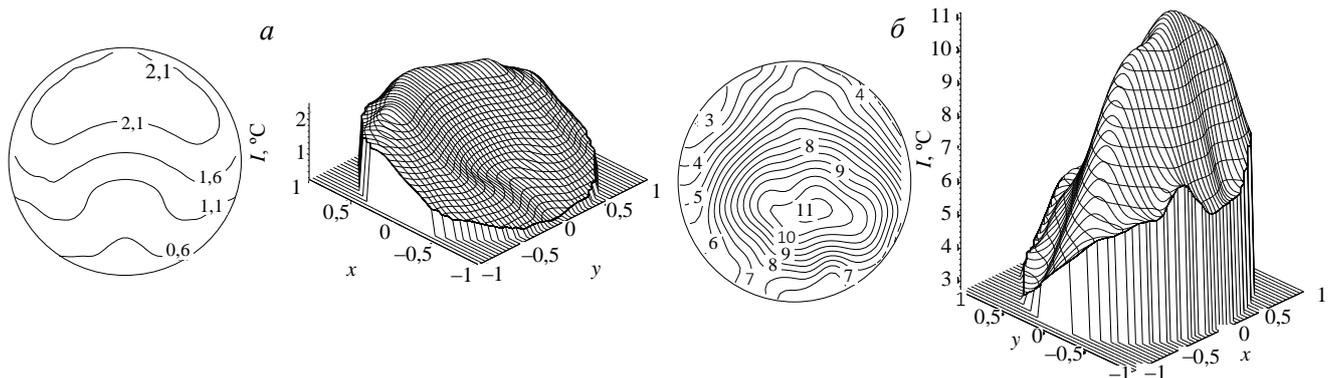


Рис. 6. Распределение интенсивности пульсаций температуры в сечении трубы,  $q_1/q_2 = 35/0$  кВт/м<sup>2</sup>,  $Re = 20 \cdot 10^3$ :  $Na = 0$  (а), 300 (б)

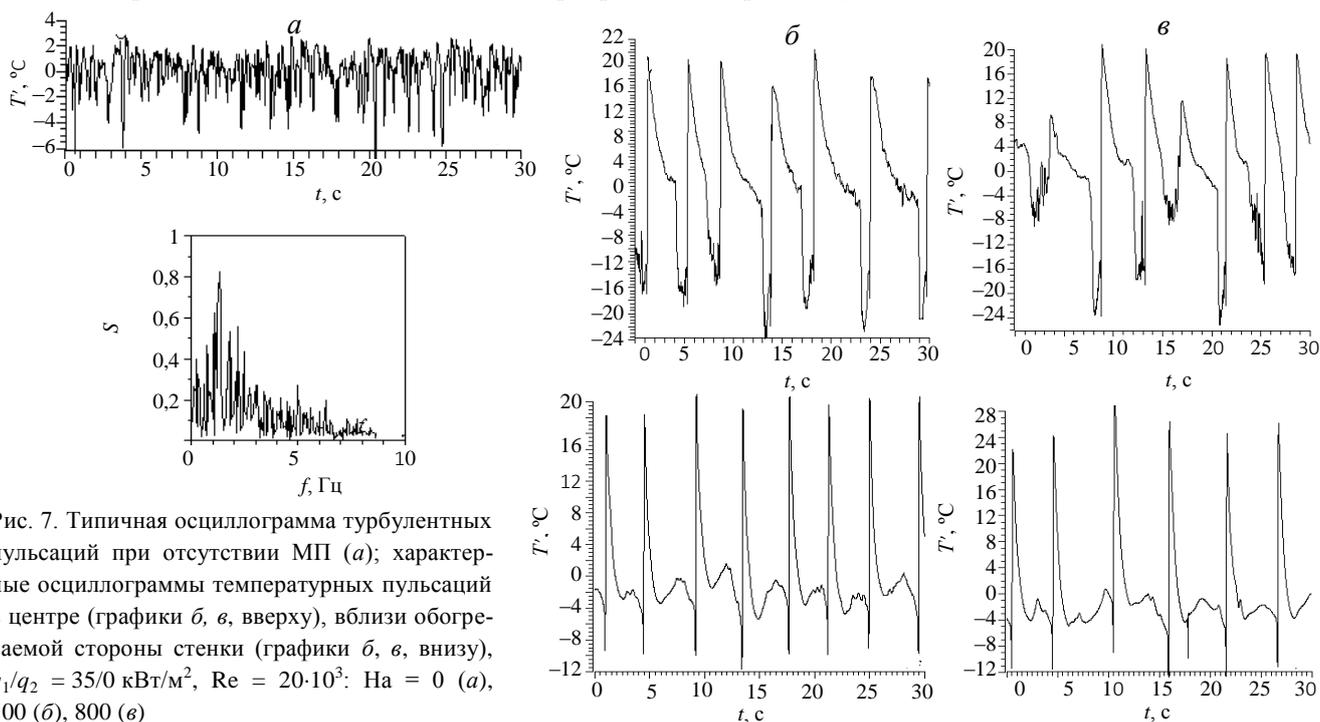


Рис. 7. Типичная осциллограмма турбулентных пульсаций при отсутствии МП (а); характерные осциллограммы температурных пульсаций в центре (графики б, в, сверху), вблизи обогреваемой стороны стенки (графики б, в, внизу),  $q_1/q_2 = 35/0$  кВт/м<sup>2</sup>,  $Re = 20 \cdot 10^3$ :  $Na = 0$  (а), 500 (б), 800 (в)

При наложении МП (рис. 7, б, в) наблюдается почти периодический характер пульсаций температуры очень низкой частоты, квазипериод которых составляет для данного режима около 5 с.

Размах пульсаций около  $30^\circ$  в условиях экспериментов при числе Грасгофа  $\sim 10^8$ , согласно табл. 2 в проектах бланкетов ДЕМО число Грасгофа находится в диапазоне от  $10^9$  до  $10^{12}$ , следовательно, размах пульсаций может быть в несколько раз выше и быть сопоставимым с перепадом температуры в тракте охлаждения. Полученные результаты можно объяснить следующим образом. При подавленной магнитным полем турбулентности в ламинаризованном потоке развиваются вторичные течения термогравитационного происхождения. Таким образом, в условиях совместного воздействия на поток ЖМ сил различной природы (электромагнитной, силы инерции и Архимедовой силы) в потоке формируются крупномасштабные вихревые структуры, захватывающие всю область течения в сечении трубы. Упорядоченный, почти периодический характер осциллограмм свидетельствует о том, что эти структуры зарождаются у обогреваемой стенки. Силы Архимеда действуют на нагретые слои жидкости вблизи стенки, что в условиях неустойчивой стратификации плотности приводит к их отрыву с почти постоянной частотой и формированию в потоке когерентных вихревых структур. Поперечное МП не препятствует, а напротив, способствует их развитию, стабилизируя вихри и разворачивая их оси параллельно вектору индукции МП.

Опытные данные и результаты численного моделирования, полученные в других конфигурациях течения в МП, например, в горизонтальной трубе при обогреве только нижней половины периметра [14, 15], подтверждают устойчивое существование в потоке вихревых образований с осями, параллельными вектору индукции МП. Подобные структуры были обнаружены и подробно исследовались в работах [22, 23].

Такая же картина наблюдается в канале прямоугольного сечения. Результаты, аналогичные рассмотренным для трубы, показаны на рис. 8—10. На рис. 10 рядом с осциллограммами пульсаций температуры показаны их спектральные плотности. Как и для круглой трубы, максимум находится в области низких частот — от 0 до 1 Гц. Стоит отметить, что с увеличением числа Гартмана высокочастотные составляющие пульсаций температуры пропадают, что подтверждает ламинаризацию потока и переход к упорядоченным структурам.

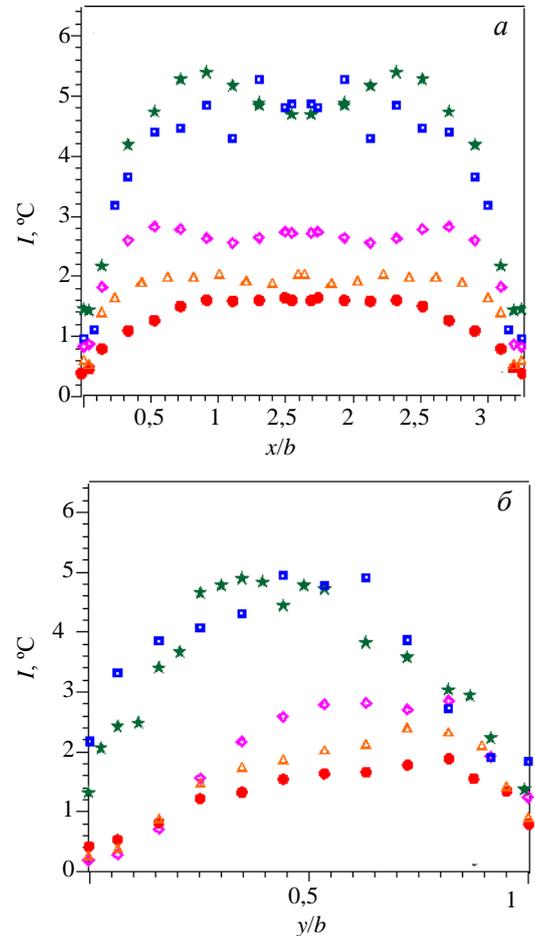


Рис. 8. Профили интенсивности пульсаций температуры в осевых плоскостях X (а) и Y (б) для прямоугольного канала,  $q_1/q_2 = 35/0$  кВт/м<sup>2</sup>,  $Re = 30 \cdot 10^3$ :  $Na = 0$  (●), 120 (▲), 300 (◆), 500 (■), 800 (★)

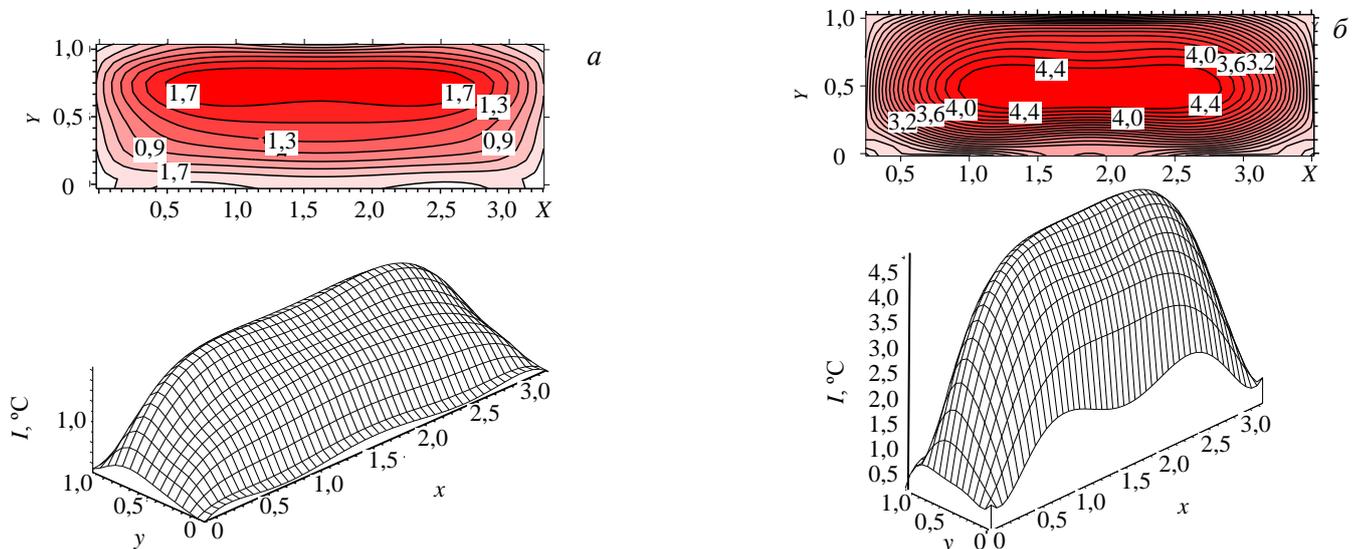


Рис. 9. Распределение интенсивности пульсаций температуры в сечении канала,  $q_1/q_2 = 35/0$  кВт/м<sup>2</sup>,  $Re = 30 \cdot 10^3$ :  $Na = 0$  (а), 300 (б)

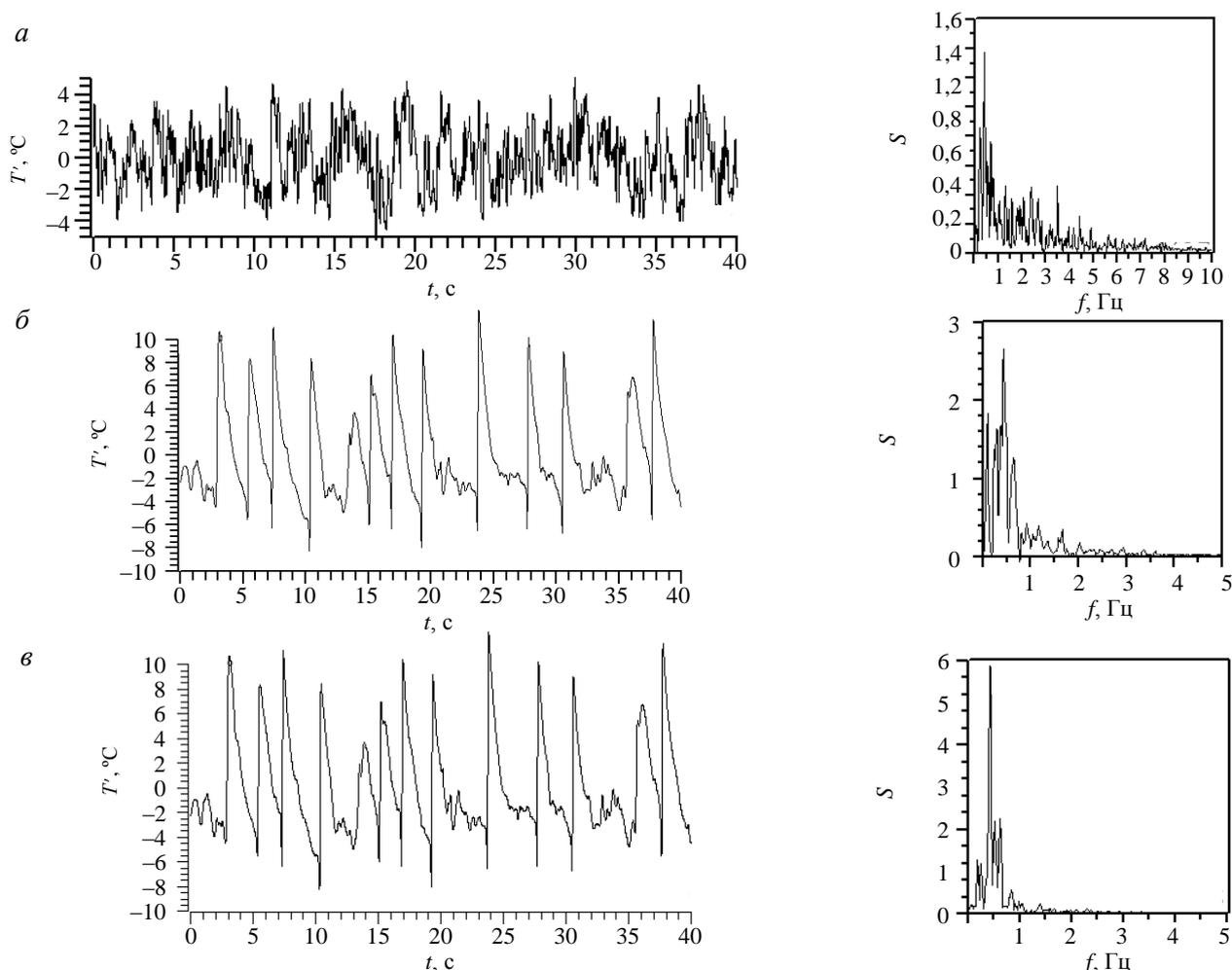


Рис. 10. Характерные осциллограммы температурных пульсаций в центре потока в канале,  $q_1/q_2 = 35/0$  кВт/м<sup>2</sup>,  $Re = 30 \cdot 10^3$ :  $Na = 0$  (а), 500 (б), 800 (в)

Обнаруженные в данной конфигурации МГД-теплообмена эффекты значительной неравномерности температуры стенки по периметру сечения трубы и интенсивных температурных пульсаций в поперечном МП представляют, как уже отмечалось, опасность для стенок тракта охлаждения реактора-токамака. Поскольку характер пульсаций низкочастотный, они легко проникают в стенку. Прямые измерения температуры на внешней поверхности стенки с помощью заложенных термопар подтверждают этот вывод.

На рис. 11 показаны осциллограммы пульсаций температуры в точках на внутренней и внешней поверхностях стенки вблизи центральной оси канала ( $X = x/b = 2$ ). Несмотря на довольно толстую стенку  $dw/b = 2,5/17$  мм/мм, низкочастотные колебания температуры пронизывают её насквозь. При этом ос-

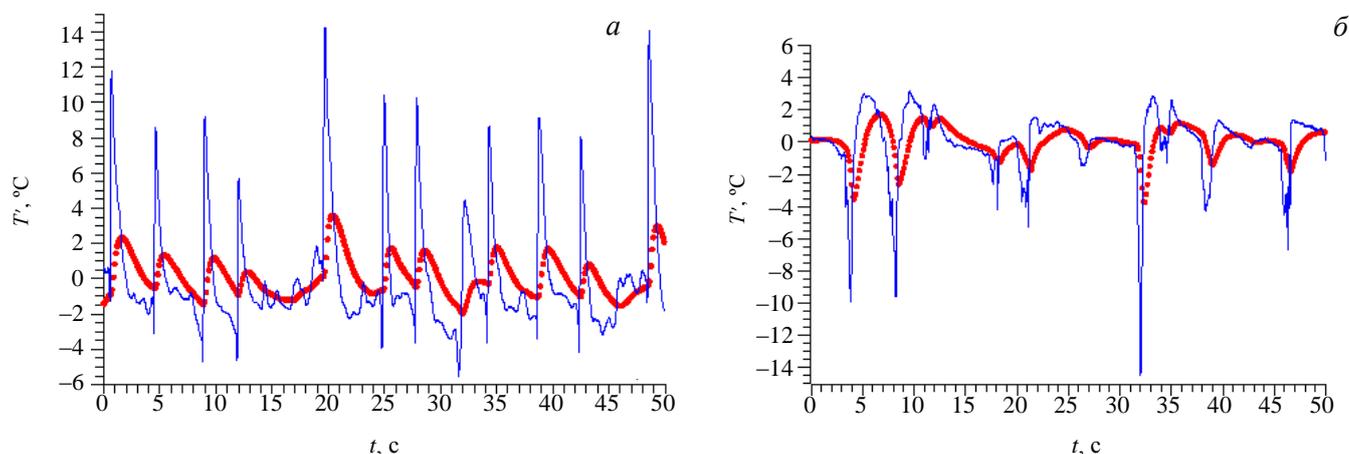


Рис. 11. Характерные осциллограммы температурных пульсаций на обогреваемой (а) и не обогреваемой (б) стенке канала,  $q_1/q_2 = 35/0$  кВт/м<sup>2</sup>,  $Re = 30 \cdot 10^3$ ,  $Na = 500$ : • — внешняя поверхность; — внутренняя поверхность

лабленные (в 3—4 раза по отношению к пульсациям на внутренней стороне стенки), но довольно интенсивные пульсации наблюдаются не только на внешней поверхности обогреваемой стенки, но и на противоположной адиабатической стенке (рис. 11, б). В этой связи представляет интерес прочностной анализ конструкции ИМБ при наличии пульсаций температуры подобной интенсивности в каналах с ЖМ.

Подробные исследования в различных режимах течения и обогрева в МП позволили выявить «запрещённые» области режимных параметров, в которых данные эффекты могут проявиться в реальных конструкциях трактов охлаждения.

Для примера на графике на рис. 12 показана граница проявления рассматриваемого эффекта при одностороннем обогреве в канале прямоугольного сечения в компланарном МП. На данном графике по оси абсцисс отложено число Рейнольдса  $Re$ , а по оси ординат — предельное число Грасгофа  $Gr_{qnp}$ , при котором уровень пульсаций температуры совпадает с турбулентным. Символами для каждого числа Гартмана в координатах  $Gr_{qnp}$ — $Re$  обозначены точки, где интенсивность температурных пульсаций достигает уровня турбулентных пульсаций, соответствующих данному режиму течения в отсутствие МП. Видно, что опытные точки, за исключением числа Гартмана 300, концентрируются вблизи некоторой прямой в логарифмических координатах на графике, которую условно можно принять за границу аномального роста пульсаций температуры в области слева от неё.

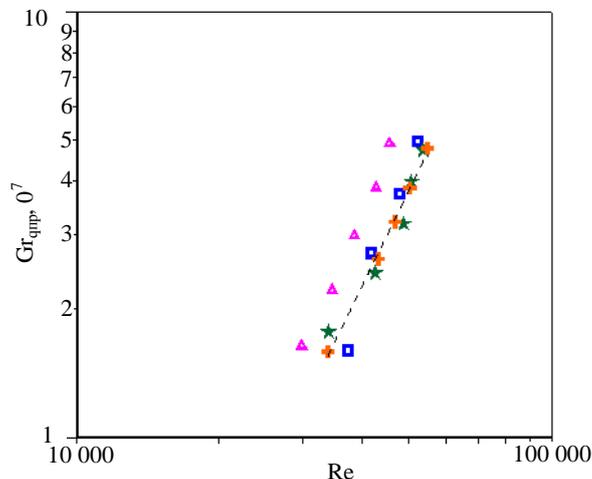


Рис. 12. Границы появления аномальных пульсаций температуры  $Re(Gr_{qnp})$  при одностороннем обогреве прямоугольного канала в компланарном МП:  $Na = 300$  ( $\blacktriangle$ ),  $500$  ( $\blacksquare$ ),  $650$  ( $+$ ),  $800$  ( $\star$ )

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследуемой конфигурации течения и обогрева как в круглой трубе, так и в канале прямоугольного сечения обнаруживается резкая неравномерность в распределении температуры стенки по периметру сечения канала, которая возрастает в поперечном и компланарном магнитном поле.

При исследованиях течения ЖМ наблюдается МГД-эффект, связанный с возникновением пульсаций температуры высокой амплитуды. Указанные пульсации возникают вследствие развития в потоке ЖМ вторичных крупномасштабных структур, являющихся результатом совместного воздействия на течение сил электромагнитной и гравитационной природы. Низкочастотные пульсации благодаря теплопроводности легко проникают в стенку и приводят к дополнительным термическим напряжениям. В условиях высоких тепловых нагрузок в ТЯР и ТИН это явление может представлять опасность для тонких стенок ЖМ-трактов охлаждения с точки зрения усталостной прочности.

В работе выявлены области режимных параметров для исследованных диапазонов безразмерных критериев, где проявляется эффект появления пульсаций температуры аномально высокой интенсивности.

Учитывая тот факт, что значения безразмерных критериев, в первую очередь, числа  $Na$  (индукции магнитного поля) в каналах ТЯР будут существенно выше реализованных в эксперименте, сделанные выводы требуют дальнейшего подтверждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-50-00124.

## REFERENCES

1. **Kulygin V.M.** Prospects of nuclear fusion energy development. — In coll. : Vestnik MEI (Herald of MEI). — M.: Pub. house of MEI, 2009, pp. 16—20 (in Russian).
2. **Chaudhuri P., Ranjithkamur S., Sharma D., Danani C.** Progress in engineering design of Indian LLCB TBM set for testing in ITER. — Fusion Engineering and Design, 2014, vol. 89, pp. 1362—1369.
3. **Bhattacharyay R., Indian TBM Team.** Status of Indian LLCB TBM program and R&D activities. — Ibid., pp. 1107—1112.

4. **Leshukov A.Yu., Kapyshev V.K., Kartashev I.A., Kovalenko V.G. et al.** Design development and analytical assessment of LLCB TBM in Russian Federation during 2012—2013. — *Ibid.*, pp. 1232—1240.
5. **Kuteev B.V., Khripunov V.I.** Current view on the hybrid fusion reactor. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2009, issue 1, p. 3. (in Russian).
6. **Giancarli L.M., Abdou M., Campbell D.J., Chuyanov V.A. et al.** Overview of the ITER TBM Program. — *Fusion Engineering and Design*, 2012, vol. 87, pp. 395—402.
7. **Smolentsev S., Moreau R., Abdou M.** Characterization of key magnetohydrodynamic phenomena in PbLi flows for the US DCLL blanket. — *Ibid.*, 2008, vol. 83, pp. 771—783.
8. **Mas de les Valls E., Batet L., de Medina V., Fradera J., Sanmartí M., Sedano L.A.** Influence of thermal performance on design parameters of a He/LiPb dual coolant DEMO concept blanket design. — *Ibid.*, 2012, vol. 87, pp. 969—973.
9. **Poitevin Y., Boccaccini L.V., Zmitko M., Ricapito I., Salavy J.-F., Diegele E., Gabriel F., Magnani E., Neuberger H., Lässer R., Guerrini L.** Tritium breeder blankets design and technologies in Europe: development status of ITER test blanket modules, test & qualification strategy and roadmap towards DEMO. — *Ibid.*, 2010, vol. 85, pp. 2340—2347.
10. **Smolentsev S., Moreau R., Bühler L., Mistrangelo C.** MHD thermofluid issues of liquid-metal blankets: phenomena and advances. — *Ibid.*, pp. 1196—1205.
11. **Kirillov I.R., Obuchov D.M., Pertsev D.A.** MHD characteristics of test blanket modules elements. — In: *Proc. of 9th PAMIR Conf. Riga, Latvia, 2014*, vol. 1, pp. 346—350.
12. **Rajendra Kumar E., Jayakumar T., Suri A.K.** Overview of TBM R&D activities in India. — *Fusion Engineering and Design*, 2012, vol. 87, pp. 461—465.
13. **Morley N.B., Ni M.-J., Munipalli R., Huang P., Abdou M.A.** MHD simulations of liquid metal flow through a toroidally oriented manifold. — *Ibid.*, 2008, vol. 83, pp. 1335—1339.
14. **Sviridov V.G., Razuvanov N.G., Zhilin V.G., Ivochkin Yu.P., Listratov Ya.I., Sviridov E.V., Belyaev I.A.** Impact of the secondary flows on heat transfer of liquid metal in horizontal pipe at heterogeneous heat in magnetic field. — In coll.: *Hydrodynamics and heat and mass transfer in swirling flows. Materials of the 3-d International conference. Moscow, MEI (TU), 2008* (in Russian).
15. **Sviridov V.G., Razuvanov N.G., Ivotchkin Yu.P., Listratov Ya.I., Sviridov E.V., Genin L.G., Zhilin V.G., Belyaev I.A.** Liquid metal heat transfer investigations applied to tokamak reactor. — In: *Proc. of the Intern. Heat Transfer Conf. IHTC14. DC, USA, Washington, August 8—13, 2010*, pp. 1—8.
16. **Genin L.G., Listratov Ya.I., Sviridov V.G., Zhilin V.G., Ivochkin Yu.P., Razuvanov N.G.** MHD heat transfer investigation for a liquid metal flow. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2003, issue 4, pp. 35—44 (in Russian).
17. **Belyaev I.A., Genin L.G., Listratov Ya.I., Sviridov V.G. et al.** Liquid metal heat transfer in a tokamak reactor. — In: *Proc. of 9th PAMIR Conf. Riga, Latvia, 2014*, vol. 1, pp. 85—89.
18. **Vinogradov N.A., Gayduchenko V.V., Karyakin N.A.** Foundations of information-measuring systems construction. Manual on system integration. — M.: Pub. House of MEI, 2004. 268 p. (in Russian).
19. **Genin L.G., Sviridov V.G.** Hydrodynamics and heat transfer of MHD-flows in channels. — M.: Pub. House of MEI, 2001. 200 p. (in Russian).
20. **Branover G.G., Tsinober A.B.** Magnetic hydrodynamics of incompressible media. — M.: Nauka (Science), 1970. 379 p. (in Russian).
21. **Sviridov V.G., Razuvanov N.G., Shestakov A.A.** Heat transfer at liquid metal flowing in vertical pipe in transverse magnetic field. — *Vestnik MEI (Herald of MEI)*, 2011, № 5, pp. 32—40 (in Russian).
22. **Ozoe H.** *Magnetic Convection*. Imperial College Press, 2005, p. 230.
- Kenjeres S., Hanjalic K.** Numerical simulation of magnetic control of heat transfer in thermal convection. — *Intern. J. of Heat and Fluid Flow*, 2004, vol. 25, pp. 559—568.

#### AUTHORS

**Poddubnyi I.I.** Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering», ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; poddubnyii@nikiet.ru

**Pyatnitskaya N.Yu.** Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Science, ul. Izhorskaya 13 stroenie 2, 125412 Moscow, Russia

**Razuvanov N.G.** Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Science, ul. Izhorskaya 13 stroenie 2, 125412 Moscow, Russia; nikita.razuvanov@mail.ru

**Sviridov V.G.** Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Science, ul. Izhorskaya 13 stroenie 2, 125412 Moscow, Russia; SviridivVG@mpei.ru

**Sviridov E.V.** Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Science, ul. Izhorskaya 13 stroenie 2, 125412 Moscow, Russia; evsviridov@gmail.com

**Leshukov A.Yu.** Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering», ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; leshu@nikiet.ru

**Aleskovskiy K.V.** National Research University «Moscow Power Engineering Institute», ul. Krasnokazarmennaya 14, 111250 Moscow, Russia; kirill.aleskovsky@cati.ru

**Obukhov D.M.** Joint Stock Company «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; obukhov@sintez.niiefa.spb.su

Received 5 June 2015  
Problems of Atomic Science and Technology  
Ser. Thermonuclear Fusion, 2015, vol. 38, issue 3, pp. 5—15.