

УДК 621.396.6.019:536.5.001.24

## Экспериментальное исследование теплообмена при смешанной МГД-конвекции жидкого металла в наклонном канале\*

Д. Ю. Черныш, Н. А. Лучинкин, И. А. Беляев

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва;  
e-mail: chernyshdy@gmail.com

Поступила в редакцию 29.09.2017

Проведены экспериментальные исследования теплообмена при опускном течении ртути в трубе с различными углами наклона в поперечном магнитном поле с однородным по длине и по периметру обогревом. Зондовым методом с применением микротермопары измерены двумерные поля осредненной и пульсационной температуры. Используя эти данные, получены распределения безразмерных локальных коэффициентов теплоотдачи, чисел Нуссельта. Полученные данные обобщены в виде распределения перепада безразмерной температуры в сечении от угла наклона в поперечном сечении трубы и сопоставлены с имеющимися на сегодняшний день данными из других работ.

Изучалась область режимных параметров (Гартман, Рейнольдс, Грасгоф), в которой ранее в горизонтальной и вертикальной трубах не обнаруживались крупномасштабные пульсации температуры, обусловленные особенностями МГД-теплообмена.

Без влияния магнитного поля в исследованном диапазоне режимных параметров существенно влияние термогравитационной конвекции, которая приводит к потере симметрии полей температуры в сечении, образованию зон ухудшенного и улучшенного теплообмена. Поперечное магнитное поле существенно изменяет характеристики течения, приводя к образованию локальных максимумов температуры на стенке, обусловленных эффектом Гартмана, при этом влияние термогравитации невелико.

Ключевые слова: жидкий металл, МГД, зондовые измерения, наклонный канал, смешанная конвекция.

### Введение

Использование жидкометаллических теплоносителей в системах ядерных и термоядерных установок является перспективным направлением развития энергетической отрасли. Применение жидких металлов в термоядерных установках, где теплообменные каналы находятся в области сильных магнитных полей, сопряжено со значительными трудностями, связанными с обеспечением прокачки теплоносителя при больших сопротивлениях течению [1]. Минимизировать негативное воздействие магнитного поля возможно при оптимизации расположения

каналов теплообменных систем установки [2]. Воздействие магнитных полей на течение в условиях сильных тепловых потоков, порождающих силы плавучести, неоднозначно и не может быть сведено только к подавлению вторичных течений (свободноконвективных течений, возникающих вследствие существования градиента температуры) и турбулентности [3].

Воздействие массовых сил на поток жидких металлов в условиях существенных тепловых потоков и магнитных полей проявляется через подавление турбулентности, искажение профиля средней скорости и порождение специфических вторичных течений, существование которых возможно в магнитных полях [4, 5]. В данной работе, являющейся первым шагом к эксперимен-

\* Работа выполнена при поддержке гранта Президента МК-1133.2017.8.

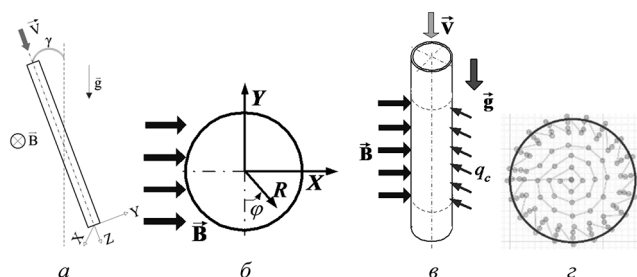


Рис. 1. Схема исследуемой конфигурации наклона (а). Схема поперечного сечения канала (б). Конфигурация рабочего участка (в). Схема поперечного сечения канала с сеткой точек, в которых проводятся измерения (г)

тальному исследованию особенностей смешанной конвекции в наклонных каналах при наличии поперечного магнитного поля, изучались первые два фактора. Для этого были выбраны умеренные тепловые потоки, которые заведомо не приводят к образованию в потоке крупномасштабных скачков скорости и, как следствие, температуры. Проведено экспериментальное исследование течения в наклонной трубе (углы наклона относительно вертикали:  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ) в поперечном магнитном поле (рис. 1).

Результаты, полученные в режимах без наложенного магнитного поля, важны для проектирования ядерных реакторов с жидкометаллическим охлаждением (БН, БРЕСТ).

## 1. Условия эксперимента

В данной работе исследовалось опускное течение ртути в прямой наклонной трубе с углами наклона относительно вертикали  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  и однородным по периметру обогревом (см. рис. 1). Участок действия магнитного поля охватывает участок гидродинамической стабилизации и участок обогрева. На входе в исследуемый канал течение имеет турбулентный профиль скорости. Участку однородного обогрева

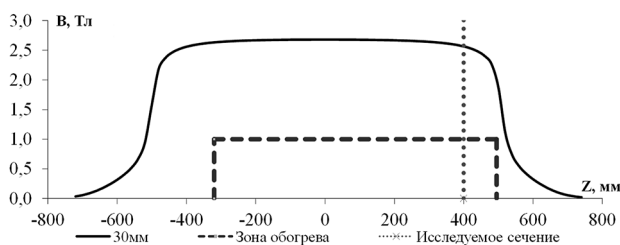


Рис. 2. Распределение индукции магнитного поля вдоль оси магнита с изображением зоны обогрева и сечением, в котором находится датчик измерительного зонда

( $q_c = \text{const}$ ) предшествует необогреваемый участок гидродинамической стабилизации длиной порядка 60 калибров.

Экспериментальные исследования проводятся на ртутном контуре замкнутого типа с использованием дипольного электромагнита ДЭМ-1, имеющего охлаждаемые обмотки. На установке

достижимы числа Рейнольдса  $Re = \frac{ud}{\nu}$  до  $3 \cdot 10^4$ ,

числа Грасгофа  $Gr = \frac{g\beta q_c d^4}{\nu^2 \lambda}$  до  $1.3 \cdot 10^8$ , числа

Гартмана  $Na = B_0 d \sqrt{\frac{\sigma}{\eta}}$  до 1300, где  $u$  – сред-

няя скорость потока. Для расчета безразмерных критериев подобия свойства ртути определены по средней температуре в экспериментальном участке по справочнику [6]. Число Прандтля для ртути в экспериментах варьируется в диапазоне  $0.023-0.025$  в соответствии со значением средней температуры экспериментального участка.

Экспериментальный участок представляет собой трубу из нержавеющей стали внутренним диаметром  $d=19$  мм, на внешней поверхности которой смонтирован нагреватель длиной  $L=804$  мм, длина однородного магнитного поля (95% от максимального значения) равна  $\sim 800$  мм.

Соотношение зон обогрева и влияния магнитного поля приведено на рис. 2. Исследования проводятся зондовым методом с помощью шарнирного микротермопарного зонда рычажного типа. Сечение, в котором произведены измерения, также показано на рис. 2.

Экспериментальный стенд полностью автоматизирован и оснащен автоматизированной системой научных исследований (АСНИ). Сбор и первичная обработка экспериментальных данных осуществляется под управлением персонального компьютера с использованием специально разработанного программного обеспечения, адаптированного авторами под проведение данной серии экспериментов. Подробное описание экспериментальной установки представлено в [7].

На основании данных о температуре и режимных параметрах рассчитаны безразмерные локальные коэффициенты теплоотдачи (числа Нуссельта  $Nu$ ), представленные в виде распределения безразмерной температуры.

Средняя температура в произвольной точке сечения трубы определялась как среднее массива значений температуры в выборке длиной 25 секунд с частотой 100 Гц:

$$\bar{T}_i = \frac{1}{N} \sum_N T_i,$$

где  $N$  – объем выборки значений температуры.

Безразмерные местные коэффициенты теплоотдачи определяются соотношением

$$\text{Nu} = \frac{q_c d}{(T_c - T_{\text{ж}})\lambda}.$$

Безразмерная температура стенки равна

$$\Theta_c = \frac{(T_c - T_{\text{ж}})\lambda}{q_c d},$$

где  $q_c$  – плотность теплового потока на стенке;  $T_{\text{ж}}$  – среднемассовая температура жидкости;  $T_c$  – температура стенки;  $d$  – внутренний диаметр рабочего участка;  $\lambda$  – теплопроводность ртути.

Допущение: в участках между тепломерами потери зависят от продольной координаты линейно, а за крайними тепломерами сохраняют постоянное значение. Средняя плотность теплового потока определяется по электрической мощности обогрева односекционного нагревателя с учетом тепловых потерь:

$$q_c = \frac{UI}{\pi dL} - \frac{1}{L} \int_0^L q_{\text{пот}}(z) dz,$$

где  $I$ ,  $U$  – ток нагревателя и напряжение на нагревателе;  $q_{\text{пот}}(z)$  – плотность теплового потока потерь;  $L$  – длина зоны обогрева;  $z$  – расстояние от начала обогрева.

Температура стенки определяется в месте касания термопарой стенки экстраполяцией показаний по формуле:

$$T_c = T_{\text{кас}} + \frac{q_c \delta / 2}{\lambda},$$

где  $\delta = 0.3$  мм – толщина королька термопары;  $\lambda$  – теплопроводность ртути.

Такой способ определения температуры стенки исключает погрешность, связанную с термическим контактным сопротивлением на границе «жидкость–стенка».

Среднемассовая температура на входе  $T_{\text{вх}}$  в зону обогрева и среднемассовая температура на выходе из зоны обогрева  $T_{\text{вых}}$  определяется по показаниям платиновых термометров сопротивления.

Среднемассовая температура жидкости в сечении трубы, где проводились измерения, равна

$$T_{\text{ж}} = T_{\text{вх}} + \frac{\pi d}{GC_p} \int_0^z q_c(x) dx.$$

Из предположения, что плотность теплового потока по длине рабочего участка постоянная, следует, что среднемассовая температура по длине трубы меняется линейно:

$$T_{\text{ж}} = T_{\text{вх}} + (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}) \frac{z}{L}.$$

Расход определяется по показаниям электромагнитного и турбинного расходомеров. Индукция магнитного поля определяется по предоставленной заводом-производителем градуировочной зависимости от силы тока в цепи питания электромагнита. Границы области однородного поля определяются по снижению индукции на 5% от максимального значения.

Относительная погрешность определения числа  $\text{Nu}$  и безразмерной температуры  $\Theta$  порядка 10%, режимных параметров ( $\text{Ha}$ ,  $\text{Re}$ ,  $\text{Gr}$ ) – не более 2%, отклонения режимных параметров в ходе эксперимента – не более 5%.

## 2. Результаты экспериментов

При стабилизированном течении без магнитного поля и отсутствии влияния термогравитационной конвекции в турбулентной области теплообмен описывается зависимостью Лайона [2, 8]. В горизонтальной трубе термогравитационная конвекция проявляется в виде двух продольных вихрей, которые нарушают осевую симметрию поля температуры и приводят к образованию зон «ухудшенного» и «улучшенного» теплообмена. Распределение температуры по стенке в этом случае становится неоднородным. В вертикальных каналах нарушения осевой симметрии не происходит [9]. На рис. 3 показаны температурные поля при следующих режимных параметрах:  $\text{Re} = 10^4$ ,  $\text{Gr} = 3.4 \cdot 10^7$ . Видно, что при вертикальном положении канала (рис. 3, а) температурное поле симметрично. При наклоне экспериментального участка на  $15^\circ$  от вертикали (рис. 3, б) отмечается нарушение симметрии поля температуры. Максимальное значение температуры наблюдается на боковой образующей, что вызвано образованием в потоке вторичного течения в виде уединенного вихря. Таким образом, в трубе реализуется несимметричная относительно оси картина, а направление закрутки обусловлено геометрической неидеальностью трубы и нагревателей. При по-

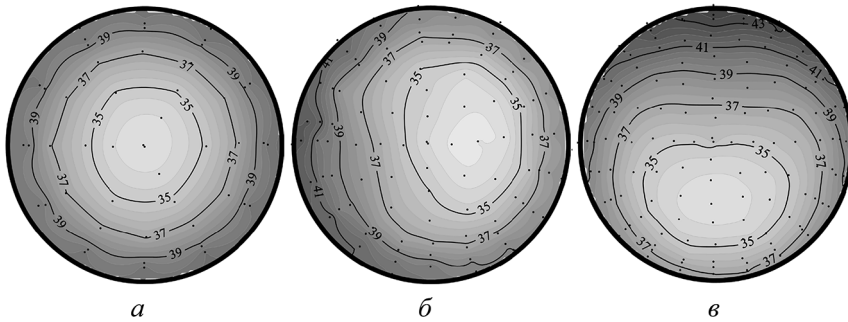


Рис. 3. Температурные поля (°C) в исследуемом сечении при углах наклона от вертикали 0° (а), 15° (б) и 30° (в).  $Re=10^4$ ,  $Gr=3.4 \cdot 10^7$ ,  $z/d=37.4$

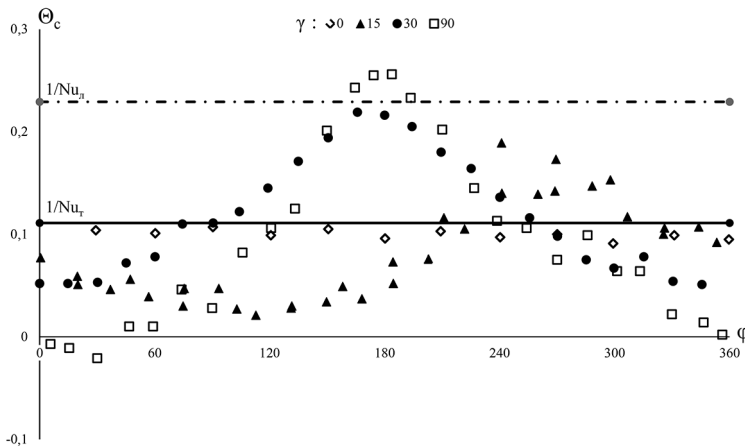


Рис. 4. Безразмерная температура стенки по периметру сечения канала:  $1/Nu_l$  – зависимость для ламинарного течения,  $1/Nu_t$  – зависимость Лайона для турбулентного течения жидкого металла без магнитного поля с поправкой на начальный участок.  $Re=10^4$ ,  $Gr=3.4 \cdot 10^7$ ,  $z/d \sim 37$

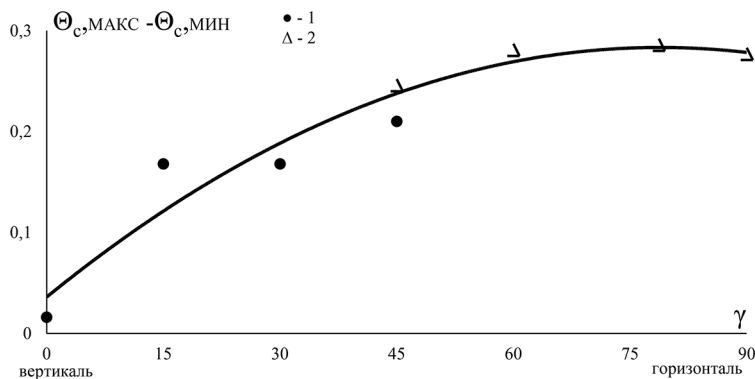


Рис. 5. Максимальный перепад безразмерной температуры по периметру сечения  $z/d \sim 37$ : 1 – эксперимент. 2 – данные [10]

вторении эксперимента предположительное направление закрутки сохраняется и результаты воспроизводятся. При дальнейшем увеличении угла наклона до 30° наблюдается картина изотерм, схожая со случаем горизонтального канала, где формируются два вихря (рис. 3, в). В этом случае максимальное значение температуры наблюдается на верхней образующей.

На рис. 4 показано распределение безразмерной температуры стенки по периметру трубы для разных углов наклона канала, дополненное данными для горизонтальной трубы из работы [10]. Как было описано выше, вторичные течения при разных углах наклона создают перегретые области вблизи верхней или боковой образующей трубы. На рис. 5 показан максимальный перепад безразмерной температуры по сечению трубы. График дополнен значениями безразмерной температуры при углах наклона 60°, 78.7° и 90° относительно вертикали [11]. Видно, что при угле наклона 45° и более наблюдается картина, характерная для горизонтального положения канала [9]. При наклонах ~0°–45° наблюдается существенный рост перепада безразмерной температуры по сечению. Пунктирной линией показана интерполяция экспериментальных данных.

В условиях наложенного магнитного поля картина изолиний иная. На рис. 6, б показано температурное поле при режимных параметрах:  $Re=10^4$ ,  $Gr=3.4 \cdot 10^7$ ,  $Ha=300$ , угол наклона 15°. Как и в случае вертикального канала, видны зоны ухудшенного теплообмена в плоскости, перпендикулярной вектору индукции магнитного поля. Наложение магнитного поля привело к асимметрии поля температуры, уплотнились изотермы вдоль линий индукции магнитного поля вследствие эффекта Гартмана. Наблюдаются два максимума температуры вблизи образующих трубы с углами  $\varphi=0^\circ$  и  $\varphi=180^\circ$ . Кроме того, исчезла деформация по оси  $Y$ , которая наблюдалась в этом режиме, но без магнитного поля (см. рис. 3, б). Аналогичная ситуация наблюдается и при увеличении угла наклона (рис. 6, в, г). Полученные данные обобщены в виде распределения безразмерной температуры стенки по периметру сечения канала при различных углах наклона относительно вертикали (рис. 7). Максимальный



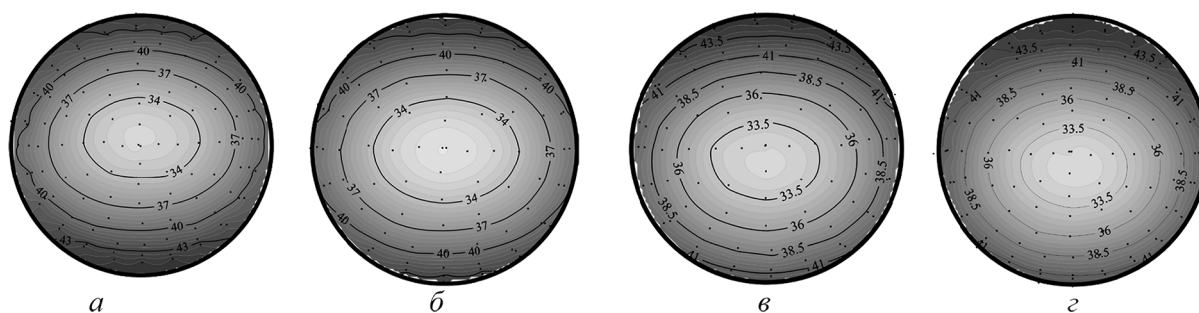


Рис. 6. Температурные поля ( $^{\circ}\text{C}$ ) в исследуемом сечении при углах наклона от вертикали  $0^{\circ}$  (а),  $15^{\circ}$  (б),  $30^{\circ}$  (в) и  $45^{\circ}$  (г).  $\text{Na}=300$ ,  $\text{Re}=10^4$ ,  $\text{Gr}=3.4 \cdot 10^7$ ,  $z/d=37.4$

перепад безразмерной температуры по сечению трубы для рассматриваемых режимов практически одинаков. Из графика видно, что в среднем для различных наклонов сохраняется характерное распределение температуры, вызванное эффектом Гартмана, т. е. воздействие электромагнитных сил на осредненное течение в выбранном сочетании режимных параметров оказывается более существенным.

### Заключение

Проведены экспериментальные исследования теплообмена жидкого металла в диапазоне углов наклона канала от  $0^{\circ}$  до  $90^{\circ}$ . Данные были обобщены и представлены в виде зависимости перепада безразмерной температуры на стенке. Такое обобщение выявляет влияние свободной конвекции. Полученные данные свидетельствуют о том, что при относительно малом отклонении от вертикали ( $15^{\circ}$ ) наблюдается влияние сил плавучести в виде формирования уединенного вихря. Такая конфигурация течения не характерна ни для вертикальных, ни для горизонтальных труб. Влияние угла наклона на разницу температур на стенке канала очень существенно при отклонении от вертикали, начиная с  $\sim 45^{\circ}$ . Характер влияния похож на случай горизонтальной трубы.

Полученные данные дополняют экспериментальную базу данных для обоснования безопасности жидкометаллических систем перспективных энергоустановок ядерной энергетики и химической промышленности и могут быть использованы для верификации программных кодов.

Результаты экспериментов с магнитным полем показывают, что вследствие эффекта Гартмана температурные профили при воздействии

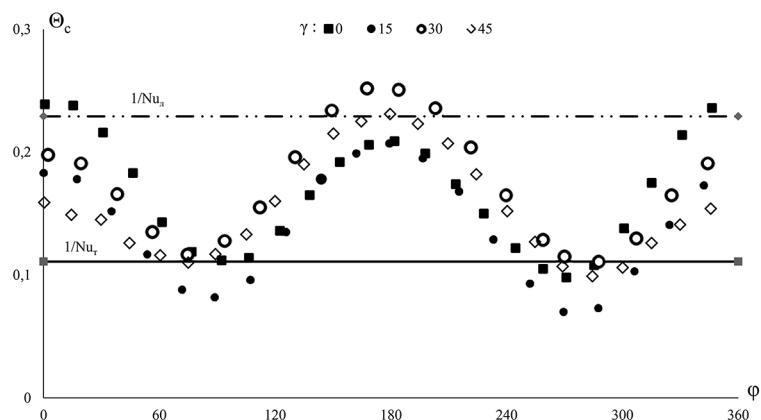


Рис. 7. Распределение безразмерной температуры по периметру сечения канала при различных углах наклона канала.  $\text{Na}=300$ ,  $\text{Re}=10^4$ ,  $\text{Gr}=3.4 \cdot 10^7$ ,  $z/d=37.4$

магнитного поля теряют осевую симметрию. При вертикальной ориентации канала локальные числа температуры стенки становятся неоднородными по периметру сечения трубы. Данные результаты соответствуют теоретическим представлениям о воздействии магнитного поля на теплообмен.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брановер Г. Г., Циннобер А. Б. Магнитная гидродинамика несжимаемых сред. М.: Наука, 1970. 379 с.
2. Генин Л. Г., Свиридов В. Г. Гидродинамика и теплообмен МГД-течений в каналах. М.: МЭИ, 2001. 200 с.
3. Belyaev I. A., Genin L. G., Listratov Ya. I., Melnikov I. A., Sviridov V. G., Sviridov E. V., Ivochkin Yu. P., Razuvanov N. G., Shpansky Yu. S. Specific features of liquid metal heat transfer in a tokamak reactor // Magneto-hydrodynamics (0024-998X). 2013. V. 49 (1). P. 177-190.
4. Melnikov I. A., Sviridov E. V., Sviridov V. G., Razuvanov N. G. Experimental investigation of MHD heat transfer in a vertical round tube affected by transverse magnetic field // Fusion Engineering and Design. 2016. V. 112. P. 505-512.
5. Zikanov O., Listratov Y. I., Sviridov V. G. Natural convection in horizontal pipe flow with a strong transverse magnetic field // Journal of Fluid Mechanics. 2013. V. 720. P. 486-516.

6. Вукалович М. П., Иванов А. И., Фокин Л. Р., Яковлев А. Т. Теплофизические свойства ртути. М.: Изд-во стандартов, 1971. 312 с.
7. Беляев И. А., Свиридов В. Г., Батенин В. М., Бирюков Д. А., Никитина И. С., Манчха С. П., Пятницкая Н. Ю., Разуванов Н. Г., Свиридов Е. В. Экспериментальный стенд для исследований теплообмена перспективных теплоносителей ядерной энергетики // Теплоэнергетика. 2017. № 11. С. 66–74.
8. Lyon R.N. Liquid metal heat transfer coefficients // Chem. Eng. Prog. 1951. V. 47. P. 75–79.
9. Петухов Б. С., Поляков А. Ф. Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции. М.: Наука, 1986. 192 с.
10. Разуванов Н. Г. Исследование МГД-теплообмена при течении жидкого металла в горизонтальной трубе. Дисс. ... докт. техн. наук. МЭИ, 2011.
11. Belyaev I.A., Razuvanov N.G., Sviridov V.G., Zagorsky V.S. Liquid metal downflow in an inclined heated tube affected by a longitudinal magnetic field // Magnetohydrodynamics. 2015. V. 51. N 4. P. 673–683.

## Experimental study of heat exchange at mixed MHD-convection of liquid metal in inclined channel

Chernysh D. Yu., Luchinkin N. A., Belyaev I. A.

*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow*  
e-mail: chernyshdy@gmail.com

Experimental studies of heat exchange at the downward flow of mercury in the pipe with various inclination angles in the transverse magnetic field with uniform at length and perimeter heating were conducted. 2D fields of averaged and fluctuation temperatures were measured by the probe technique with micro-thermocouple application. Distributions of non-dimensional local heat transfer coefficients and Nusselt numbers were obtained employing this data. The obtained data was generalized in the form of distribution of non-dimensional temperature differences in the cross-section from the inclination angle, and compared to the data obtained in other works at hand. The area of modes parameters (Hartmann, Reynolds, Grashof), in which large scale temperature pulsation, stipulated by MHD-heat exchange specifics, were not being found earlier in horizontal and vertical tubes, was studied. Without magnetic field effect in the studied modes' parameters range, the impact of thermo-gravitational convection is significant, which leads to the temperature field symmetry loss in the cross-section, formation of degraded and improved thermal exchange exerts significant effect. The transverse magnetic field changes significantly the flow characteristics, leading to the temperature local maximums formation on the wall, stipulated by the Hartmann effect. The effect of thermo-gravitation herewith is not significant.

Keywords: liquid metal, MHD, probe measurements, inclined channel, mixed convection.

### REFERENCES

1. Branover, G.G., Tsinober A.B. *Magnitnaya gidrodinamika neszhimaemykh sred* [Magnetohydrodynamics of Incompressible Media]. Moscow: Nauka, 1970. 379 p. In Russ.
2. Genin L.G., Sviridov V.G. *Gidrodinamika i teploobmen MGD-techenij v kanalakh* [Hydrodynamics and Heat Transfer of MHD Flows in Channels]. Moscow: MPEI, 2001. 200 p. In Russ.
3. Belyaev I.A., Genin L.G., Listratov Ya.I., Melnikov I.A., Sviridov V.G., Sviridov E.V., Ivochkin Yu.P., Razuvanov N.G., Shpansky Yu.S. Specific features of liquid metal heat transfer in a tokamak reactor. *Magnetohydrodynamics (0024-998X)*, 2013, vol. 49 (1), pp. 177–190.
4. Melnikov I.A., Sviridov E.V., Sviridov V.G., Razuvanov N.G. Experimental investigation of MHD heat transfer in a vertical round tube affected by transverse magnetic field. *Fusion Engineering and Design*, 2016, vol. 112, pp. 505–512.
5. Zikanov O., Listratov Y.I., Sviridov V.G. Natural convection in horizontal pipe flow with a strong transverse magnetic field. *Journal of Fluid Mechanics*, 2013, vol. 720, pp. 486–516.
6. Vukalovich M. P., Ivanov A. I., Fokin L. R., Yakovlev A. T. *Teplofizicheskie svoystva rtuti* [Thermal Properties of Mercury]. Moscow: Izd-vo standartov, 1971. 312 p. In Russ.
7. Belyaev I.A., Sviridov V.G., Batenin V.M., Biryukov D.A., Nikitina I.S., Pyatnitskaya N.Y., Razuvanov N.G., Sviridov E.V., Manchka S.P. Test facility for investigation of heat transfer of promising coolants for the nuclear power industry. *Thermal Engineering*, 2017, vol. 64, no. 11, pp. 841–848.
8. Lyon R.N. Liquid metal heat transfer coefficients. *Chem. Eng. Prog.*, 1951, vol. 47, pp. 75–79.
9. Petukhov B.S., Polyakov A.F. *Teploobmen pri smeshannoj turbulentnoj konveksii* [Heat Transfer in Mixed Turbulent Convection]. Moscow: Nauka, 1986. 192 p. In Russ.
10. Razuvanov N.G. *Issledovanie MGD-teploobmena pri techenii zhidkogo metalla v gorizont'noj trube*. Diss. ... dokt. tekhn. nauk [Investigation of MHD heat transfer during the flow of liquid metal in a horizontal tube. Dr. eng. sci, diss.]. Moscow, MPEI, 2011. In Russ.
11. Belyaev I.A., Razuvanov N.G., Sviridov V.G., Zagorsky V.S. Liquid metal downflow in an inclined heated tube affected by a longitudinal magnetic field. *Magnetohydrodynamics*, 2015, vol. 51, no. 4, p 673–683.