

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ЖИДКОГО МЕТАЛЛА
В НАКЛОННОМ КАНАЛЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РЕАКТОРУ ТОКАМАКУ.**

И. А. Беляев¹, М.А.Кадурина¹, Я.И.Листратов¹, Н. Г. Разуванов², В. Г. Свиридов¹,

¹Московский энергетический институт, 111250, Москва, Красноказарменная, 14

²Объединенный институт высоких температур РАН, 125412, Москва,

Ижорская ул., 13.

iabelyaev@gmail.com nikita.razuvanov@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Проведено экспериментальное исследование течения жидкого металла (ЖМ) в наклонной трубе (тангенс угла наклона к горизонтали $1\sqrt{5}$) в продольном магнитном поле (МП) с обогревом однородным по длине и неоднородным по периметру. Зондовым методом измерены профили осредненной температуры, распределения локальных и средних коэффициентов теплоотдачи (КТО), чисел Нуссельта, интенсивности и спектры пульсаций температуры.

Результаты, полученные в режимах без МП, могут представлять интерес для проектирования ядерных реакторов, охлаждаемых ЖМ, и в металлургических процессах. Продольное поле не воздействует непосредственно на продольную компоненту скорости, тем не менее, оно подавляет турбулентность и взаимодействует с вторичными течениями, развивающимися из-за наличия термогравитационных сил. В наклонной трубе при не однородном обогреве, в случае, когда обогрев на верхней части трубы больше, чем на нижней, выявлено значительное снижение коэффициентов теплоотдачи по сравнению с горизонтальной. При наложении продольного МП наблюдается еще более значительное снижение КТО.

ВВЕДЕНИЕ

Предполагается использование жидкого металла (ЖМ) в качестве теплоносителя в перспективных ядерных и термоядерных установках. В последнем случае течение ЖМ будет происходить в условиях сильных магнитных полей (МП), что может приводить к катастрофическому росту сопротивления течению [1]. Однако разумное расположение теплообменных каналов способно минимизировать негативные эффекты, проявляющиеся в магнитном поле [2]. Воздействие МП на течение жидкости в условиях сильных тепловых потоков, порождающих силы плавучести, неоднозначно и не может быть сведено только к подавлению вторичных течений и турбулентности [3]. Проводится экспериментальное исследование течения в наклонной трубе (тангенс угла наклона к горизонтали 1/5) в продольном магнитном поле (Рис. 1), что соответствует условиям реактора токамака проекта ИТЕР [4]. Результаты, полученные в режимах без МП, могут представлять интерес для проектирования ядерных реакторов, охлаждаемых ЖМ, и в металлургических процессах.

1. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе рассматривается опускное течение ртути в прямой наклонной трубе с углом наклона 11,3 градуса, реализуются различные варианты неоднородного по периметру обогрева (Рис. 1.). Участок МП совпадает с участком обогрева.

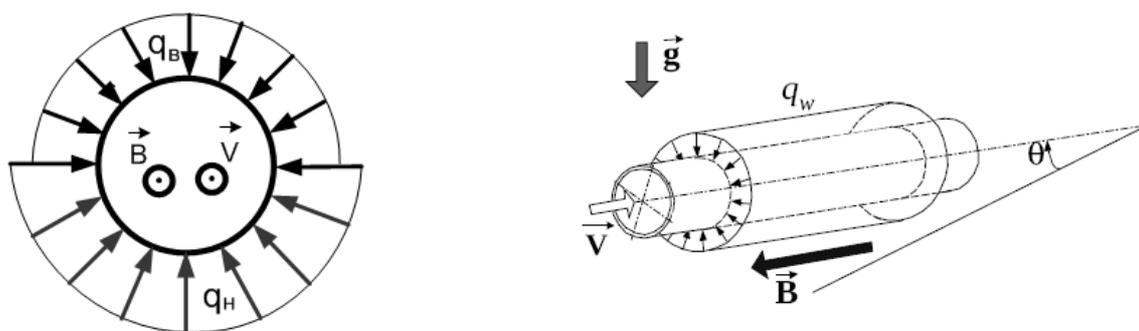


Рис. 1 Конфигурация течения и обогрева

Экспериментальное исследование проводится на замкнутом ртутном контуре (числа Рейнольдса (Re) до 10^5 числа Грасгофа (Gr) до 10^8). Магнитное поле создается охлаждаемым водой соленоидом (магнитные поля до 1 Тл, что реализует числа Гартмана (Ha) до 500). Экспериментальный участок представляет собой трубку из нержавеющей стали внутренним диаметром 19 мм, на поверхности которой смонтирован двухсекционный нагреватель, длина участка 100 калибров: первые 60 служат для стабилизации, МП однородно на длине 27 калибров.

Исследования проводятся зондовым методом с помощью микротермопар. Измеряются трехмерные осредненные и пульсационные поля температуры, на основании этих данных рассчитываются локальные и осредненные коэффициенты теплоотдачи (КТО), числа Нуссельта (Nu), статистические характеристики пульсаций температуры. Эксперимент был полностью автоматизирован. Относительная погрешность определения осредненного Nu порядка 8%, режимных параметров (Ha, Re, Gr) не выше 2%.

Исследованы режимы с параметрами $Ha^2/Re=1\div 30$ $Gr/Re^2=0.2\div 2.2$ в случае однородного и одностороннего обогрева, а также промежуточные режимы.

Полученные результаты сравниваются в первую очередь с результатами, полученными для горизонтальной трубы при исследовании в продольном поле в НИУ МЭИ и результатами, полученными без МП в ИВТ РАН [2].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При стабилизированном течении без магнитного поля и отсутствии влияния термогравитационной конвекции (ТГК) в турбулентной области теплообмен описывается зависимостью Лайона, для учета начального участка делается поправка [2]. ТГК проявляется в горизонтальной трубе в виде двух продольных вихрей. Наложение продольного МП подавляет турбулентность, оно не взаимодействует с продольной компонентой скорости, однако воздействует на поперечные к линиям магнитной индукции ТГК вихри.

В горизонтальных трубах наложение МП не подавляет ТГК, вихри даже раскручиваются несколько сильнее, поскольку на фоне подавленной турбулентности при наложении МП теплообмен не снижается.

На предыдущем этапе было исследовано течение в наклонной трубе при однородном обогреве [5], существенных отличий от горизонтальной трубы обнаружено не было.

Рассмотрим результаты, полученные при обогреве «только снизу» (Рис. 2). В этом случае реализуется неустойчивая стратификация плотности. Результаты, полученные при наклоне 11,3 градуса, отличаются от горизонтальной на уровне погрешности эксперимента.

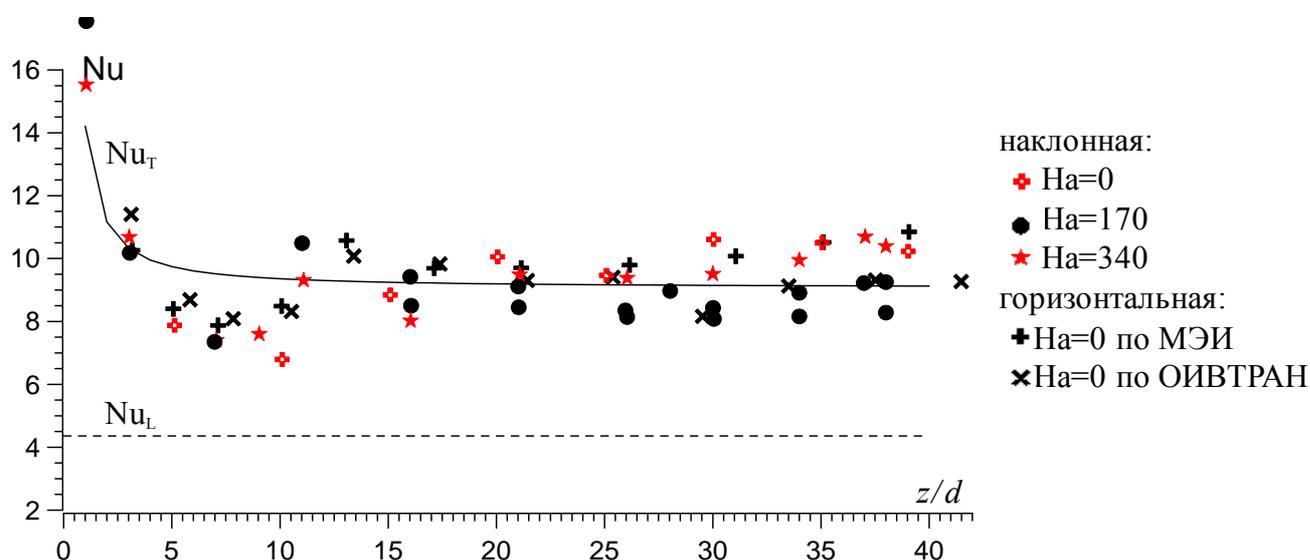


Рис. 2. Распределение среднего по периметру числа Нуссельта по длине под воздействием продольного МП при неоднородном обогреве только сверху $Re=10 \cdot 10^3$ $Gr=5.3 \cdot 10^7$
 Nu_L -зависимость для ламинарного течения,
 Nu_T - зависимость Лайона для турбулентного течения ЖМ без МП с поправкой на начальный участок [2].

Рассмотрим результаты, полученные при обогреве «только сверху». В этом случае в поперечном сечении реализуется устойчивая стратификация плотности, однако в продольном сечении стратификация плотности неустойчива. В этом и проявляется специфика течения в наклонном канале.

Рассмотрим распределение по длине осредненного по периметру числа Нуссельта. Без магнитного поля мы видим, что точки ложатся ниже зависимости Лайона, ниже результатов, полученных в горизонтальной трубе.

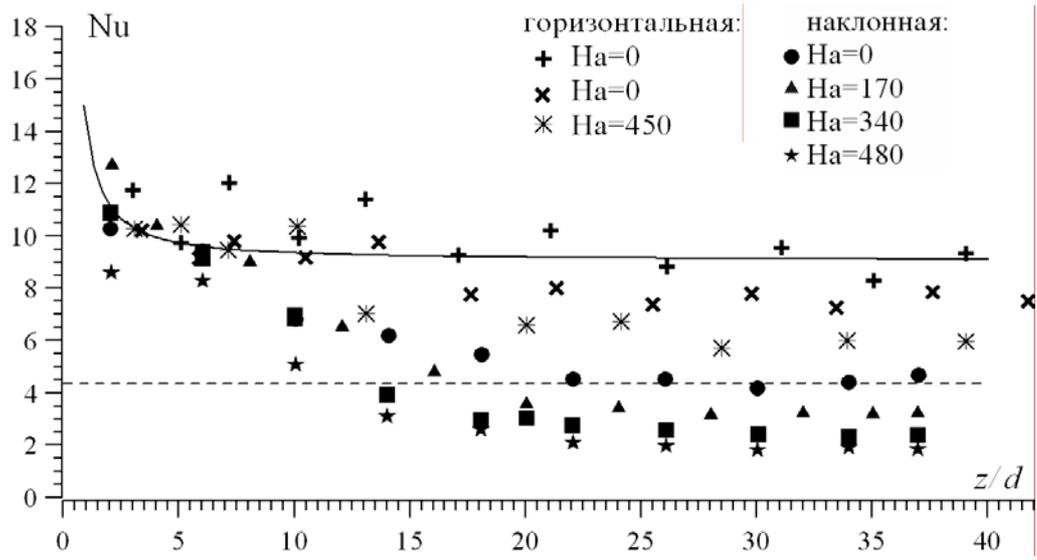


Рис. 3. Распределение среднего по периметру числа Нуссельта по длине горизонтальной и наклонной труб под воздействием продольного МП при неоднородном обогреве только сверху $Re=10 \cdot 10^3$ $Gr=5.3 \cdot 10^7$

При этом МП поле не полностью подавляло пульсации температуры, что не наблюдалось ни в случае однородного обогрева, ни в случае обогрева снизу, ни в горизонтальных трубах.

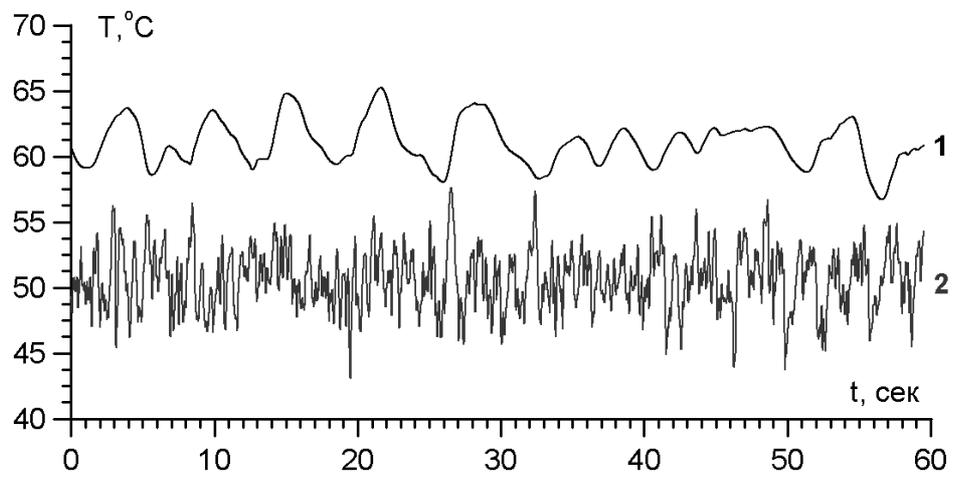


Рис. 4. Пульсации температуры, наблюдаемые в ядре потока без МП (2) и в магнитном поле $Ha=480$ (1). $z/d=37$ $Re=6 \cdot 10^3$ $Gr=3.7 \cdot 10^7$

С увеличением числа Re до $15 \cdot 10^3$ снижение КТО происходит с переломом в районе 15 калибра, где экспериментальные точки ложатся ниже зависимости Лайона и к концу экспериментального участка стабилизации не происходит.

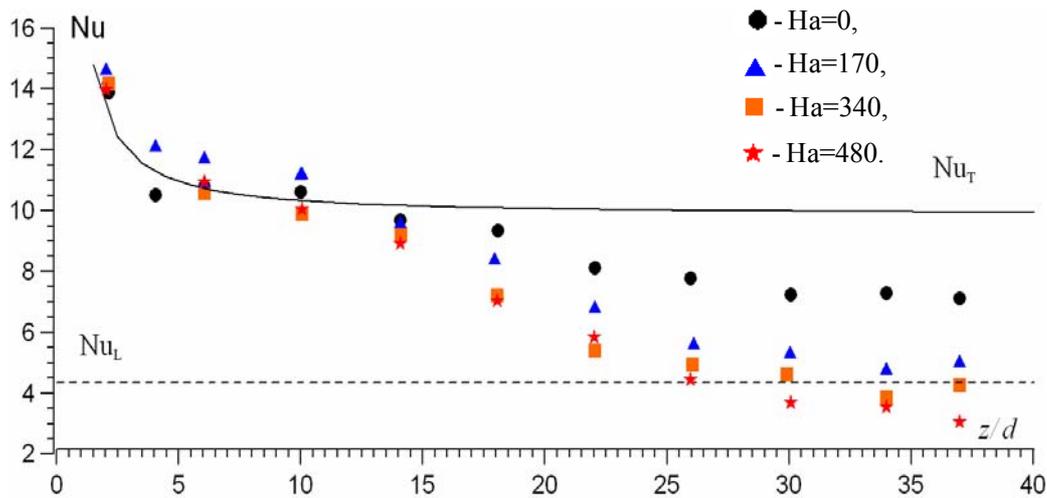


Рис. 5. Распределение среднего по периметру числа Нуссельта по длине наклонной трубы под воздействием продольного МП при неоднородном обогреве только сверху $Re=10 \cdot 10^3$ $Gr=5.3 \cdot 10^7$

С увеличением числа Re до $30 \cdot 10^3$ на длине экспериментального участка не наблюдается снижения КТО ниже зависимости Лайона, и отличия между наклонной и горизонтальной трубой пропадают.

Поскольку конфигурации с обогревом «только снизу» и «только сверху» значительно отличаются, были проведены эксперименты по исследованию характеристик теплообмена при промежуточных вариантах неоднородного обогрева. Исследования проводились вблизи выхода из экспериментального участка в калибре $z/d=37$, в последней точке однородного магнитного поля. На Рис. 6 изображена зависимость среднего числа Нуссельта в зависимости от

безразмерного параметра $k_{qn} = \frac{q_d - q_u}{q_d + q_u}$, характеризующего неоднородность обогрева, для различных чисел Гартмана и для сравнения результаты в горизонтальной трубе. В режимах с однородным обогревом ($k_{qn}=0$) и обогревом преимущественно снизу ($k_{qn}>0$) экспериментальные точки ложатся вблизи результатов для горизонтальной трубы. В режимах с обогревом преимущественно сверху ($k_{qn}<0$) снижение КТО, наблюдаемое в предельном случае ($k_{qn}=-1$, Рис. 3), происходит довольно резко по мере увеличения неоднородности обогрева.

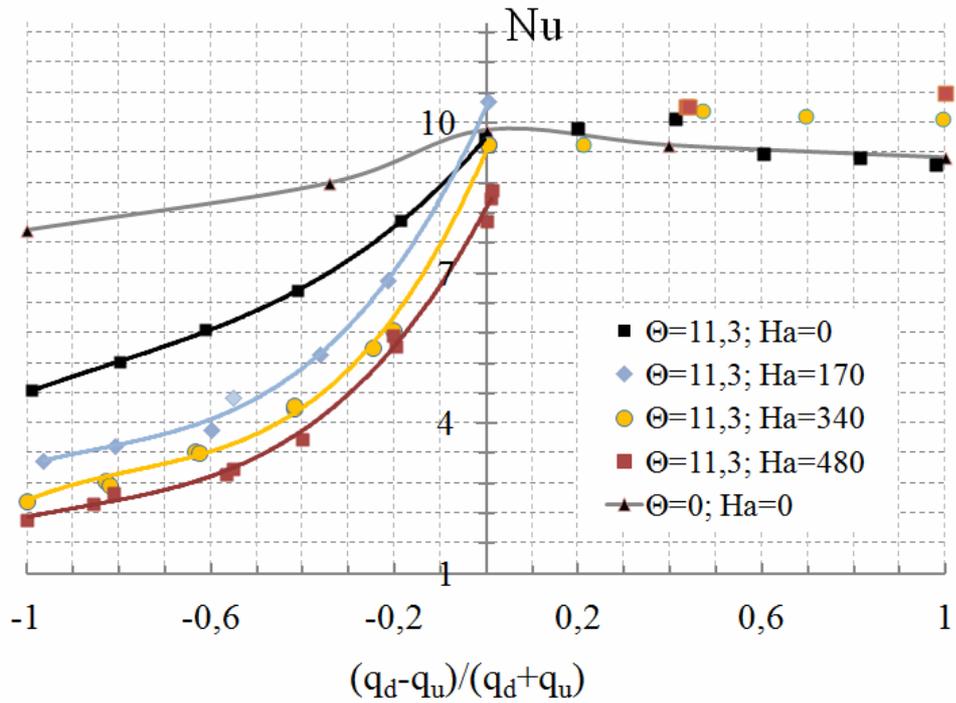


Рис. 6 Среднее число Нуссельта в зависимости от неоднородности обогрева
 $z/d=37 \text{ Re}=10 \cdot 10^3 \text{ Gr}=5.3 \cdot 10^7$

Воздействие МП проявляется нелинейно. В режиме $k_{qn} = -1$ подробно исследовалось снижение КТО под воздействием МП (Рис. 7), можно видеть, что при значении числа Гартмана приблизительно до 100 МП слабо влияет на теплообмен, а при максимальном значении $Ha=480$ влияние МП, судя по характеру изменения, близко к насыщению.

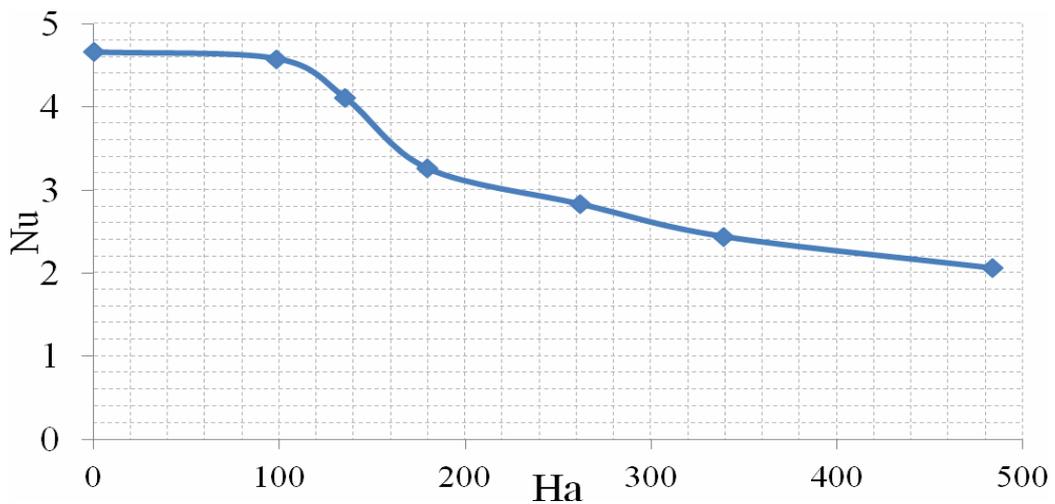


Рис. 7 Зависимость осредненного по периметру числа Нуссельта от числа Гартмана
 $z/d=37 \text{ Re}=10 \cdot 10^3 \text{ Gr}=5.3 \cdot 10^7$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Труба с небольшим углом наклона (11,3 градуса) в случае однородного или неоднородного с преимуществом снизу обогрева мало (на уровне погрешности эксперимента) отличается от горизонтальной трубы. В случае обогрева преимущественно сверху обнаружено сильное в сравнении с горизонтальной трубой снижение осредненного по периметру числа Нуссельта. Под воздействием МП снижение осредненного по периметру КТО становится еще более значительным, в ряде режимов в МП обнаружены несвойственные для течения в МП низкочастотные (ниже 1 Гц) пульсации температуры.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-4882.2012.8 и финансовой поддержке Минобрнауки (госконтракт №16.518.11.7078)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Брановер Г.Г., Цинобер 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] Беляев И.А., Крылова Д.Д., Разуванов Н.Г., Свиридов В.Г. МГД-эффекты при течении жидкого металла в каналах охлаждения реактора-токамака.// Труды научно-технической конференции «Проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии» . – М. 2009. – с. 87-90j
- [4] ITER Design Description Document. Part 1.6. Blanket. Part 1.7. Divertor. // ITER Joint Central Team – San-Diego, USA – 1994.
- [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.