

на правах рукописи

Беляев Иван Александрович

Исследование МГД-теплообмена в наклонных
каналах применительно к перспективной ядерной энергетике

Специальность 01.04.14

Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена на кафедре инженерной теплофизики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Свиридов Валентин Георгиевич

Официальные оппоненты: Сапожников Сергей Захарович, доктор
технических наук, профессор, заведующий
кафедрой теоретических основ теплотехники
Санкт-Петербургского государственного
политехнического университета

Фрик Петр Готлобович, доктор физико-
математических наук, профессор,
заведующий лабораторией физической
гидродинамики Института механики
сплошных сред Уральского отделения РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
предприятие «Научно-исследовательский
институт электрофизической аппаратуры
им. Д.В.Ефремова»

Защита состоится 31 мая 2013 года в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.157.04 при ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» по адресу 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14, корп. Т, комн. Т-206.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».

Отзывы на автореферат с подписями, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14, Ученый совет ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан «__» апреля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.157.04,
к.т.н.

Ястребов А.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В реакторе типа токамак для минимизации гидравлического сопротивления при течении жидкого металла (ЖМ) наилучшим является наклонное расположение каналов. При этом течение происходит вдоль вектора результирующего магнитного поля (МП) (результата суперпозиции тороидального и полоидального МП). В достаточно крупных энергетических реакторах (например, в проекте ИТЕР) вектор напряженности результирующего МП располагается под углом $\theta=11^\circ$ к горизонту. В более компактных реакторах (например, некоторых проектах термоядерных источников нейтронов ТИН-СТ), наклон вектора может достигать $30-45^\circ$.

В продольном МП в условиях сильных тепловых потоков существенна взаимная ориентация векторов скорости и силы тяжести. Так, в вертикальной трубе влияние продольного МП и термогравитационной конвекции (ТГК) приводит к сильным низкочастотным пульсациям температуры большой интенсивности. В горизонтальной трубе, расположенной в продольном МП, наблюдается существенная неоднородность температуры по периметру поперечного сечения трубы, а также - в некоторых режимах - пульсации температуры аномально высокой интенсивности.

Все эти эффекты весьма неблагоприятны для материала стенок теплообменных каналов. Вопросу о том, какие из эффектов и в какой степени проявятся в наклонных трубах посвящена данная работа.

Неоднозначность МГД взаимодействия требует экспериментального подтверждения теоретических расчетов, верификации численных моделей и расчетных кодов.

Целью работы являются комплексные экспериментальные и численные исследования полей скорости и температуры, коэффициентов теплоотдачи и характеристик турбулентных пульсаций температуры в круглой наклонной трубе при опускном течении ртути под воздействием продольного МП в условиях однородного и неоднородного по периметру («сверху/снизу») и однородного по длине трубы обогрева.

Научная новизна работы. Впервые измерены поля скорости, температуры, коэффициенты теплоотдачи, интенсивности температурных пульсаций и получены статистические характеристики температурных пульсаций в неизотермическом потоке ЖМ в наклонной трубе в продольном МП в условиях однородного и неоднородного распределения тепловой нагрузки по периметру поперечного сечения трубы (плотности тепловых потоков различны в верхней и нижней половинах трубы). В рассматриваемой конфигурации МГД теплообмена ЖМ впервые исследован сложный случай теплообмена в условиях совместного влияния массовых сил различной природы: электромагнитной и силы плавучести.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов

диссертационной работы обеспечивается:

- своевременной поверкой использованной аппаратуры, предварительной тарировкой всех используемых первичных датчиков;
- тщательной проработкой методик измерений и обработки первичных экспериментальных данных;
- воспроизводимостью полученных опытных результатов и согласованностью их с имеющимися в литературе теоретическими и опытными данными, полученными в близких условиях;
- автоматизацией эксперимента, которая позволила повысить точность в результате статистической обработки большого числа первичных измерений.

Практическая ценность.

Полученные результаты и рекомендации могут быть использованы при проектировании реакторов типа токамак и других энергетических установок с ЖМ теплоносителем, верификации кодов и численных моделей теплообмена ЖМ. Примененные и разработанные методики измерений могут быть использованы в различных областях науки и техники, а также в образовательном процессе.

Основные научные положения, выносимые на защиту: результаты исследования полей температуры и продольной компоненты скорости, коэффициентов теплоотдачи и интенсивностей турбулентных пульсаций температуры при опускном течении ЖМ в наклонной трубе в продольном МП при однородном и неоднородном («сверху/снизу») по периметру трубы обогреве.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы изложены и обсуждены:

- на Четвертой международной конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках», Москва, 2011 г.;
- Восьмой международной конференции по МГД «Памир», Франция, 2011 г.;
- на 12-й Международной школе-конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Новосибирск, 2012 г.;
- на Первой Российской конференции по магнитной гидродинамике, Пермь, 2012 г.;
- на 14-м Минском международном форуме по тепло- и массообмену, Минск, 2012 г.;
- на научной технической конференции «Теплофизика-2012», Обнинск, 2012 г.;
- на научных семинарах в НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалы, НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, ОИВТ РАН (2011 - 2012 гг.).

Публикации:

Содержание диссертационной работы изложено в статьях и докладах, опубликованных автором в соавторстве, в трудах отечественных и международных конференций, список которых дан выше. Основное содержание работы представлено в публикациях в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК.

Структура и объем работы:

Диссертация общим объемом 168 страниц иллюстрируется 125 рисунками, состоит из введения, пяти глав, заключения, содержащего основные выводы по работе, и приложения. Список цитируемых источников включает 84 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы: перспективность использования ЖМ для систем охлаждения энергетики нового поколения - ядерных реакторов на быстрых нейтронах и термоядерных реакторов. Рассмотрены различные концепции тестовых жидкометаллических модулей программы ИТЕР и особенности теплообмена в продольном МП.

Глава 1. Современное состояние вопроса

Глава представляет собой обзор имеющихся в литературе данных по теплообмену при течении ЖМ в круглой трубе в продольном МП. Отмечены закономерности, наблюдаемые в горизонтальных и вертикальных трубах в продольном МП. Ранее исследования МГД теплообмена при течении ЖМ в наклонной трубе не проводились, взаимное влияние ТК и продольного МП в этих условиях не изучено.

Глава 2. Математическое описание.

В главе приводятся уравнения, описывающие решаемую задачу, принятые допущения и получаемые безразмерные критерии, характеризующие процессы гидродинамики и теплообмена ЖМ в МП.

Глава 3. Численное моделирование.

Численное моделирование (ЧМ) рассматривается как способ предварительного анализа особенностей МГД теплообмена в исследуемой конфигурации (Рис. 7), предшествующий экспериментальному исследованию (Глава 5).

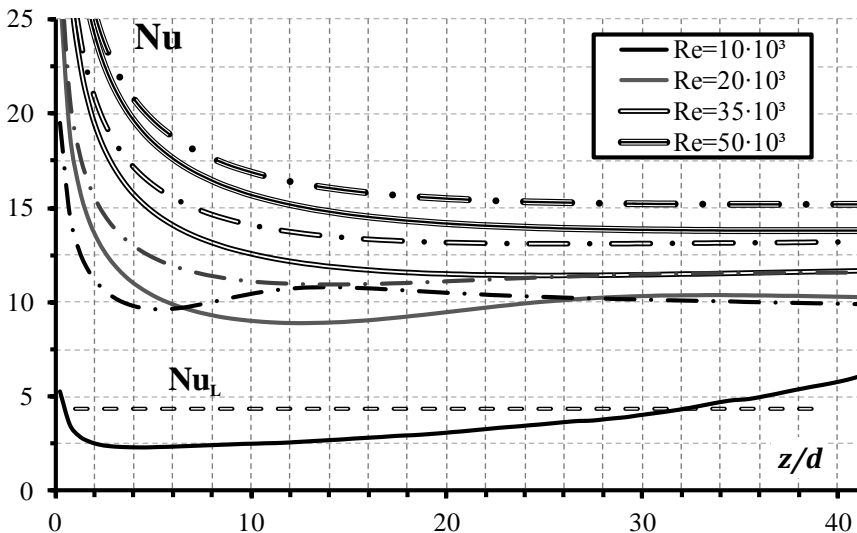
В работе используется подход, разработанный и успешно примененный для моделирования горизонтальных труб в продольном и поперечном МП Н.Г. Разувановым¹ с корректировкой на условия течения в наклонном канале.

¹ Н.Г. Разуванов Исследование МГД-теплообмена при течении жидкого металла в горизонтальной трубе Дис. докт. техн. наук. – М., 2011. – 293 с.

Методика основана на решении стационарных уравнений Рейнольдса в трехмерной постановке в программной среде ANES.

Приведены решения тестовых задач без влияния свободной конвекции, показывающие совпадение результатов ЧМ с известными теоретическими зависимостями.

Результаты ЧМ о том, как распределены по длине средние по периметру значения числа Нуссельта (Nu) для угла наклона $\theta=30^\circ$ с учетом влияния свободной конвекции, показаны на Рис. 1. Критерии Re , Na , Gr расшифрованы в таблице 2.



Сплошные линии - $Na=480$, Штрих-пунктирные линии - $Na=0$

Рис. 1. Распределение среднего числа Нуссельта по длине трубы ($\theta=30^\circ$ $Gr=0.8 \cdot 10^8$, $Na=480$).

При этом выделяются режимы, полученные при числе $Re=10 \cdot 10^3$, в которых реализуются крайне низкие Nu . Характерные безразмерные поля продольной компоненты скорости ($V=v/\bar{u}$, где v – размерная скорость, \bar{u} – средняя по сечению скорость) и температуры ($\Theta=(T-T_{ж})/(q_c d/\lambda)$, где $T_{ж}$ – среднemasсовая температура жидкости в данном сечении трубы, λ – теплопроводность среды, q_c – средний по периметру тепловой поток, d – диаметр трубы), полученные в результате ЧМ, приведены на Рис. 2(а, б). Поле размерной температуры, восстановленное из безразмерной, представлено на Рис. 2(в). В верхней части трубы образуется стационарное возвратное течение (Рис. 3), а в нижней части трубы наблюдается ускоренное течение.

Реализация при ЧМ стационарного возвратного течения требует проверки (верификации) по экспериментальным данным, поскольку в действительности может наблюдаться нестационарная картина течения, получение которой в рамках решения стационарной системы уравнений Рейнольдса невозможно.

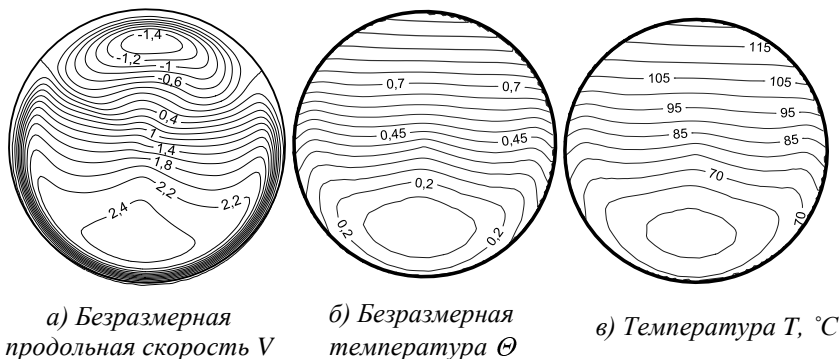


Рис. 2. Поля температуры и скорости в поперечном сечении трубы ($z/d=20, \theta=30^\circ, Gr=0.8 \cdot 10^8, Re=10 \cdot 10^3, Na=480$).

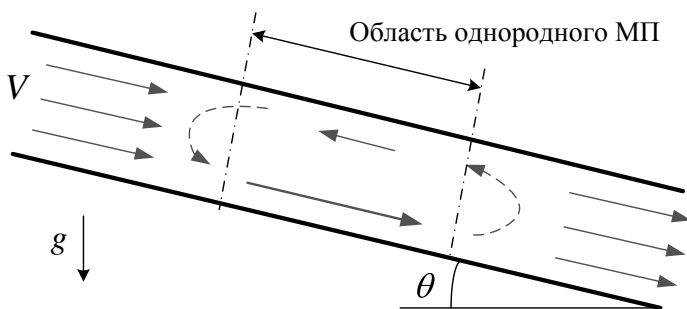
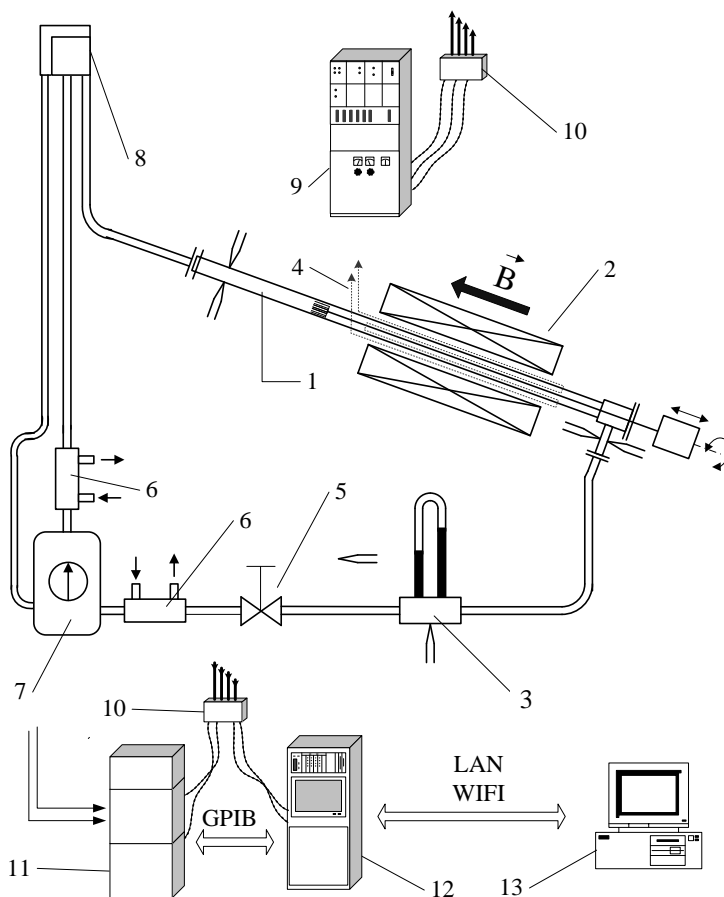


Рис. 3. Схема возвратного течения в продольном сечении наклонной трубы.

Глава 4. Экспериментальная установка и методы измерений.

Экспериментальный стенд представляет собой замкнутый контур, по которому циркулирует ртуть (Рис. 4). Исследования проводились зондовыми методами с использованием продольного зонда (Рис. 5), состоящего из 10 микротермопар, и рычажного зонда (Рис. 6). В последнем случае измерения проводились в сечении трубы, удаленном от входа в зону обогрева на расстояние $37d$, в области однородного МП – на $25d$. Параметры экспериментальной установки приведены в табл. 1.



Числами обозначены:

1– рабочий участок; 2– магнит; 3– расходомер; 4– нагреватель; 5– вентиль регулировки расхода; 6– теплообменники; 7– насос; 8 – напорный бак со ртутью; 9– стойка питания и управления, 10– измерительно-управляющий тракт; 11– измерительная стойка; 12– измерительно-управляющая стойка; 13– персональный компьютер.

Рис. 4. Схема стенда.

Температура стенки для определения коэффициентов теплоотдачи в обоих случаях определялась «из потока», то есть экстраполяцией на стенку измеренного профиля температуры в потоке.

Таблица 1. Параметры экспериментальной установки

Величина	Значение
Внутренний диаметр рабочего участка d , мм	19
Длина рабочего участка, м	2.005 (106 d)
Материал рабочего участка	сталь 08X18H10
Толщина стенки рабочего участка L_w , мм	0,5
Плотность теплового потока q_c , кВт/м ²	0...55
Длина обогреваемого участка, м	0.85 (42 d)
Индукция магнитного поля B , Т	0...1.0
Длина электромагнита (обмоток), м	0.7 (37 d)
Длина участка однородного магнитного поля, м	0.5 (26 d)
Модельная жидкость	ртуть

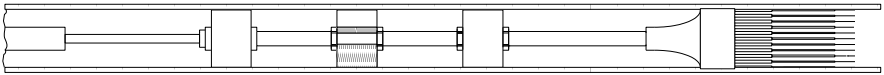


Рис. 5. Продольный зонд в трубе рабочего участка.

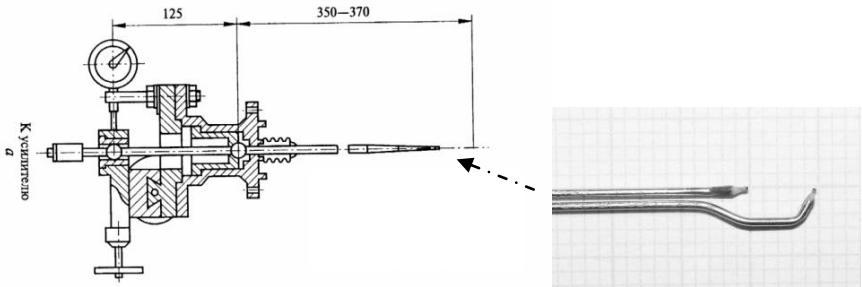


Рис. 6. Рычажный зонд и корреляционный датчик.

Экспериментальный стенд для исследования теплообмена жидкого металла в трубе в продольном магнитном поле позволяет реализовать условия течения в диапазонах режимных параметров, показанных в табл. 2.

Таблица 2. Диапазоны изменения

Критерий	Значение
$Re = \bar{u} d / \nu$	$5 \cdot 10^3 \div 55 \cdot 10^3$
$Na = B d (\sigma / \mu)^{0.5}$	$0 \div 480$
$Gr_q = g \beta q d^4 / (\lambda \nu^2)$	$0 \div 1.2 \cdot 10^8$
$C = \sigma_w L_w / (\sigma d)$	0.04
$Nu = (q_c d / \lambda) / (T_c - T_{ж})$	–

Обозначения: Re – число Рейнольдса, ν – кинематический коэффициент вязкости, Na – число Гартмана, σ – электропроводность среды, μ – динамический коэффициент вязкости, Gr_q – число Грасгофа, g – ускорение свободного падения, C – относительная проводимость стенки, σ_w – электропроводность стенки, L_w – толщина стенки.

Глава 5. Результаты экспериментов.

Экспериментальная часть диссертации была выполнена в соответствии с планами научно-образовательного центра (НОЦ) НИУ МЭИ – ОИВТ РАН. Ставится задача исследовать опускное МГД течение и теплообмен ЖМ в наклонной трубе в продольном МП (Рис. 7). На схеме обозначены векторы: скорости потока ЖМ \mathbf{V} , ускорения свободного падения \mathbf{g} , индукции МП \mathbf{B} .

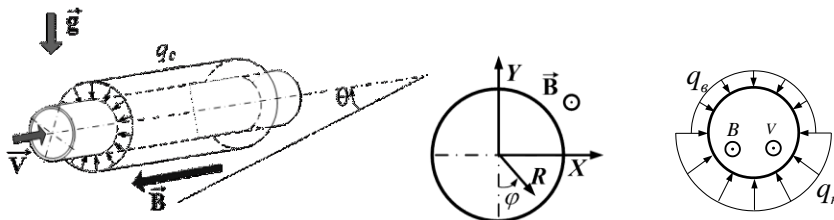


Рис. 7. Схема течения, система координат и схема обогрева.

В главе представлены результаты подробных измерений полей температуры, продольной компоненты скорости и коэффициентов теплоотдачи (локальных и средних) в потоке ЖМ, полученные в отсутствие МП и при наличии продольного МП. Результаты экспериментов сравнены с теоретическими зависимостями.

Поля скорости и температуры, полученные в экспериментах с однородным обогревом при одном из реализованных (для наклона $\theta = 45^\circ$) сочетаний режимных параметров ($Na^2/Re = 23$, $Gr/Re^2 = 0.8$), показаны на Рис. 8, Рис. 9. Применение корреляционного датчика создает в сечении трубы недоступную для измерения область. Как видим, без влияния МП вблизи верхней образующей наблюдается значительная подторможенная зона. При этом в верхней части трубы наблюдается перегрев стенки, а картина

температурных изолиний далека от осесимметричной. При наложении МП вблизи верхней образующей обнаружены (корреляционным методом измерения продольной компоненты скорости) области, в которых существует возвратное течение.

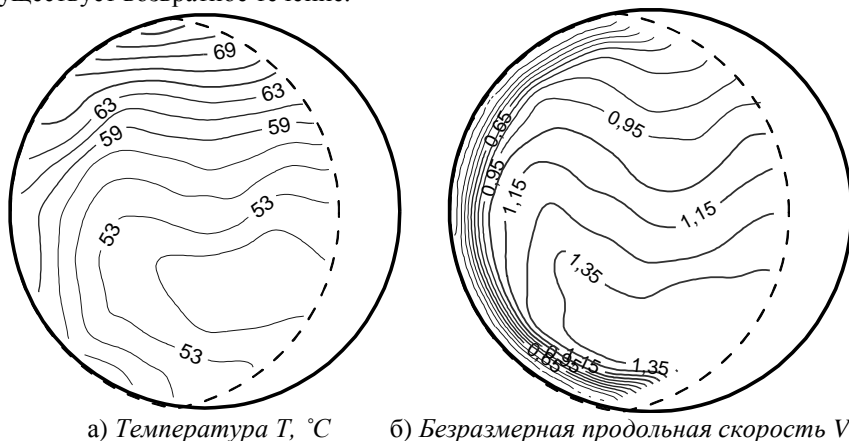


Рис. 8. Поля температуры и скорости в сечении $z/d=37$ при $\theta=45^\circ$,
($Re=10 \cdot 10^3$, $Gr_q=0,8 \cdot 10^8$, $Na=0$).

Корреляционный метод, в принципе, является прямым методом измерения скорости, поэтому применим и для прямого и для возвратного течения, но в переходной области расслоенного течения он неприменим. Поля построены по экспериментальным точкам методом полиномиальной триангуляции.

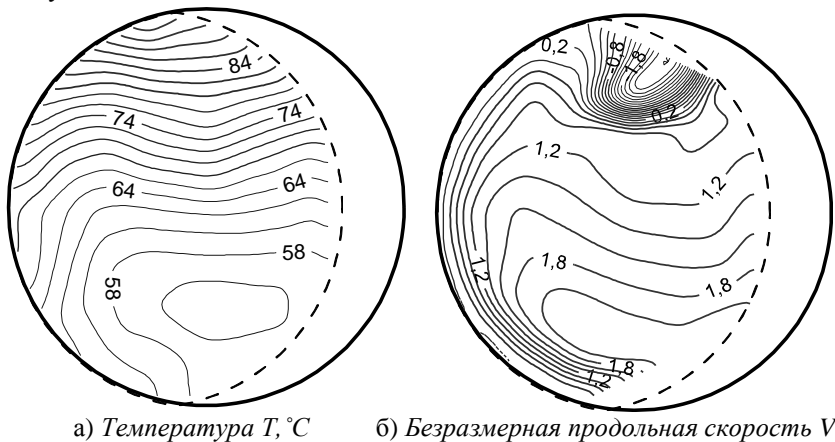


Рис. 9. Поля температуры и скорости в сечении $z/d=37$ при $\theta=45^\circ$,
($Re=10 \cdot 10^3$, $Gr_q=0,8 \cdot 10^8$, $Na=0$).

При наличии возвратного течения качественно поля температуры меняются несильно, однако перегрев вблизи верхней образующей значительно возрастает, количественно это показано в виде распределений безразмерной температуры по периметру при различных углах наклона (Рис. 10, Рис. 11).

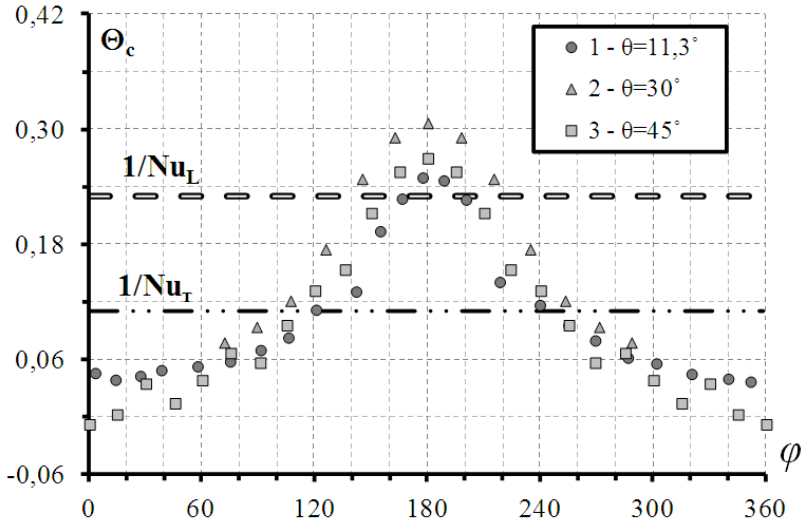


Рис. 10. Распределение величины Θ_c по периметру трубы $z/d=37$ ($Re=10 \cdot 10^3$, $Gr=0.8 \cdot 10^8$, $Na=0$) при различных углах наклона θ .

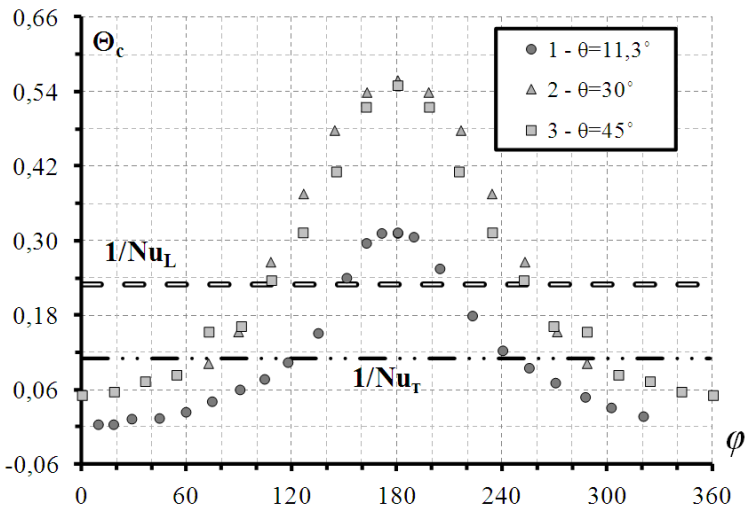


Рис. 11. Распределение величины Θ_c по периметру трубы ($z/d=37$, $Re=10 \cdot 10^3$, $Gr=0.8 \cdot 10^8$, $Na=480$) при различных углах наклона θ .

Без МП экспериментальные точки при различных углах наклона ложатся достаточно близко друг к другу. Термогравитационная конвекция вызывает существенную неоднородность температуры на верхней ($\varphi=180^\circ$) и нижней ($\varphi=0^\circ, 360^\circ$) образующих. С наложением продольного МП (Рис. 11) при угле наклона 11° картина меняется слабо. Иной результат наблюдается при углах наклона $30^\circ, 45^\circ$ поскольку при этом возникает возвратное течение. В этом случае локальные значения температуры возрастают во всем сечении, в особенности вблизи верхней образующей, причём сохраняется «колоколообразное» распределение температуры по периметру. Как и для горизонтальной трубы, обнаружены зоны ухудшенного теплообмена, представляющие, ввиду дополнительных термических напряжений опасность для конструкции теплообменника.

Результаты исследований теплообмена в круглой трубе при *однородном* обогреве при различных углах наклона обобщены в виде распределений локальной безразмерной температуры стенки Θ_c на верхней и нижней образующих при различных числах Пекле $Pe=Re \cdot Pr$. В трубах горизонтальных² и наклонных (вплоть до 45°) без влияния МП (Рис. 12) наблюдается сходная картина: по мере увеличения Pe разница между значением Θ_c на верхней и нижней образующих уменьшается, а сами эти значения стремятся к характерным для чисто турбулентного теплообмена без влияния ТГК.

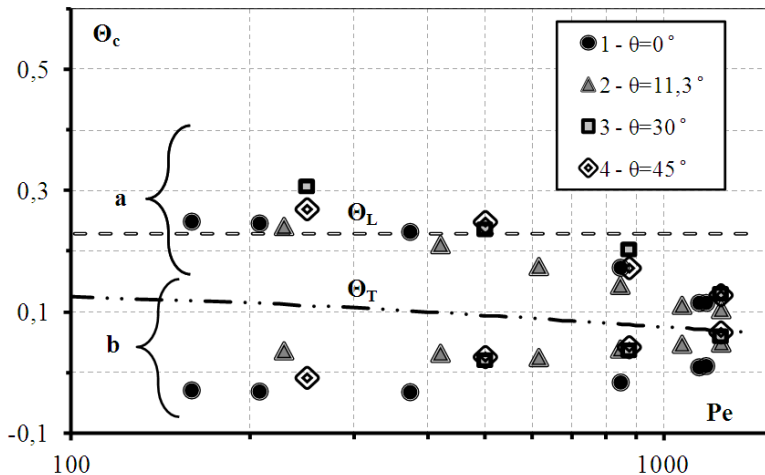


Рис. 12. Локальные значения Θ_c на верхней (а) и нижней (б) образующих в зависимости от числа Pe при различных углах наклона θ ($Gr_q=0,8 \cdot 10^8, Na=0$).

² Штанский С.Ю. Теплообмен жидкого металла в канале применительно к проблеме создания термоядерного реактора-токамака. Дис. канд. техн. наук. – М., 1996. – 112 с.

В наклонных трубах перегрев верхней образующей несколько больше, несмотря на то, что с увеличением угла конфигурация приближается к вертикальной трубе, для которой проблема неоднородности в распределении температуры стенки полностью отсутствует – как без влияния продольного МП, так и под его влиянием.

При наложении МП ($Na=480$) (Рис. 13) в наклонных трубах по мере увеличения угла θ растет разница в значениях Θ_c на верхней и нижней образующих в области низких чисел Рейнольдса из-за образования возвратных течений. Кроме того, значительная неоднородность в распределении температуры по сечению наблюдается вплоть до максимально реализуемых чисел Re .

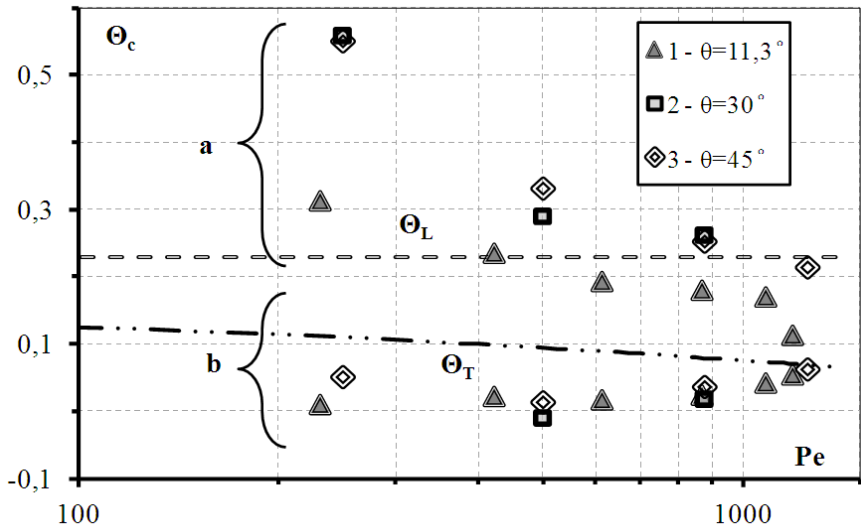


Рис. 13. Локальные значения Θ_c на верхней (а) и нижней (б) образующих в зависимости от числа Re при различных углах наклона θ , ($Gr_q=0,8 \cdot 10^8$, $Na=480$).

Отметим, что результаты ЧМ и эксперимента (Рис. 14) в целом неплохо согласуются между собой в качественном соотношении, правильно предсказывая характер зависимости Θ_c на верхней и нижней образующих при различных числах Пекле Pe при возникновении возвратных течений. Количественно наблюдается расхождение в описании величины Θ_c на верхней образующей, особенно при высоких числах Пекле $Pe \geq 875$, причиной является используемая при ЧМ модель турбулентного переноса по Рейхардту с поправкой на влияние МП, не учитывающая влияние ТГК на турбулентный перенос.

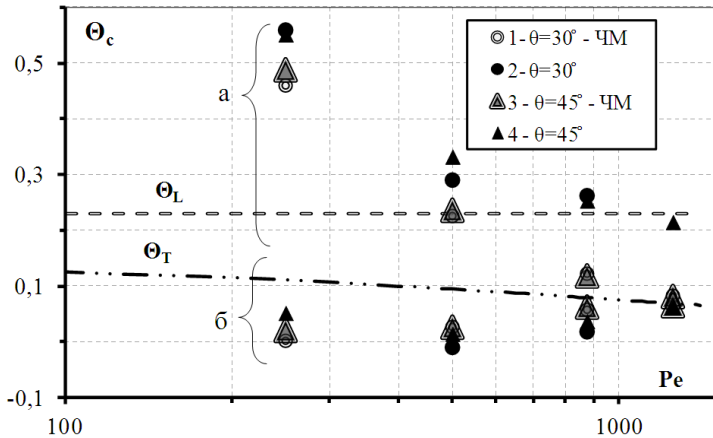


Рис. 14. Локальные значения Θ_c на верхней (а) и нижней (б) образующих в зависимости от Pe при различных углах наклона θ ($Gr_q=0,8 \cdot 10^8$, $Na=480$), полученные в результате ЧМ(1, 3) и эксперимента (2, 4).

В опытах с *неоднородным* обогревом реализованы, по аналогии с проводимыми при однородном обогреве, режимы для числа $Gr=0.53 \cdot 10^8$, при разных соотношениях обогрева «сверху/снизу». Для характеристики неоднородности обогрева вводится параметр:

$$k = (q_n - q_v) / (q_n + q_v),$$

где q_n – плотность теплового потока на нижней образующей, q_v – плотность теплового потока на верхней образующей.

В режимах с однородным обогревом $k=0$, с обогревом преимущественно снизу $k>0$, а в режимах с обогревом преимущественно сверху $k<0$.

Полученные без влияния МП распределения безразмерной температуры по периметру трубы для одного из исследованных режимов ($Gr_q/Re^2=0.5$) при различных k показаны на Рис.15. Картина, наблюдаемая при обогреве только сверху ($k=-1$), радикально отличается от происходящего при обогреве только снизу ($k=1$). Обогрев только снизу дает распределение температуры стенки, гораздо более близкое к однородному; это происходит за счет развития вторичных течений ТГК. При обогреве только сверху подобного не происходит, поскольку в поперечном сечении трубы реализуется устойчивая стратификация плотности, что приводит локальным Θ_c различающихся на верхней и нижней образующих на $\Delta\Theta_c = |\Theta_c^{верх} - \Theta_c^{низ}| = 0,8$.

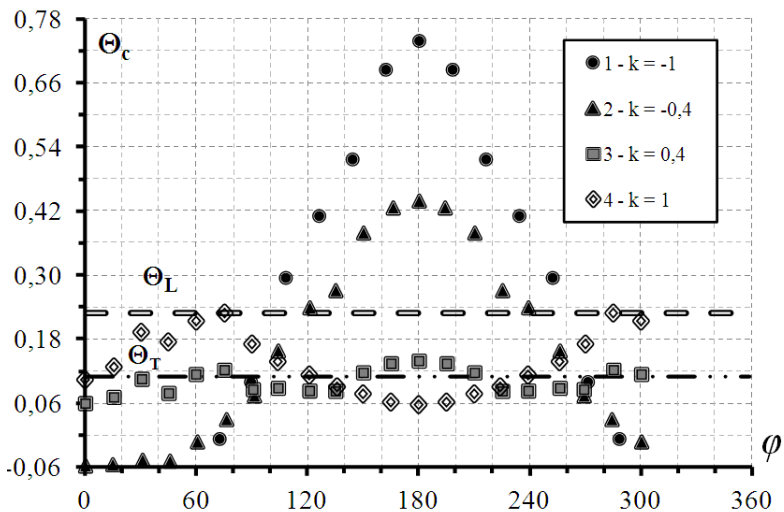


Рис. 15. Распределение величины Θ_c по периметру сечения $z/d=37$ трубы с наклоном $\theta=30^\circ$ ($Re=10 \cdot 10^3$, $Gr=5.3 \cdot 10^7$, $Na=0$) для различных значений параметра неоднородности обогрева k .

Общие закономерности влияния неоднородности обогрева рассмотрены на примере зависимости средних по периметру сечения трубы значений числа Nu в зависимости от параметра неоднородности обогрева k (Рис. 16, Рис. 17), при этом необходимо помнить, что практически для всех вариантов неоднородного обогрева характерна существенная неоднородность в распределении температуры стенки по сечению трубы.

В исследованном диапазоне режимных параметров Re , Gr , Na при обогреве «только сверху» ($k=-1$) при углах наклона $\theta=11,3^\circ$; 30° ; 45° реализуются примерно одинаковые крайне низкие средние Nu , сопровождающиеся значительной неоднородностью в распределении Θ_c по периметру трубы.

При этом в МП достаточно сильном, чтобы подавить турбулентность, реализуются стационарные возвратные течения даже при $\theta=11,3^\circ$. В режимах с обогревом преимущественно сверху ($k < 0$) снижение числа Nu происходит довольно резко по мере увеличения неоднородности обогрева. В частности при изменении k с 0 до $-0,2$ осредненное число Nu при угле наклона $\theta=11,3^\circ$ снижается на 30%, а при $k=-0,3$ и менее оказывается ниже ламинарных значений. При этом наблюдается значительная неоднородность в распределении температуры стенки по периметру. Например, в режиме $k=-1$, $Re=10 \cdot 10^3$, $Gr=5.3 \cdot 10^7$, $Na=480$ при угле наклона $\theta=11,3^\circ$ перепад безразмерной температуры на верхней и нижней образующей достигает огромного значения $\Delta\Theta_c = |\Theta_c^{\text{верх}} - \Theta_c^{\text{низ}}| = 1,5$.

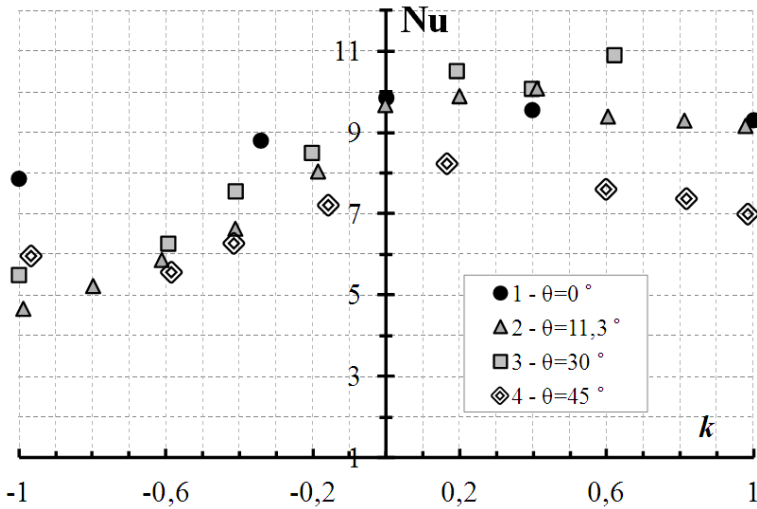


Рис. 16. Среднее число Nu в зависимости от неоднородности обогрева, ($z/d=37$, $Re=10^4$, $Gr=5.3 \cdot 10^7$, $Na=0$) при разных углах наклона θ .

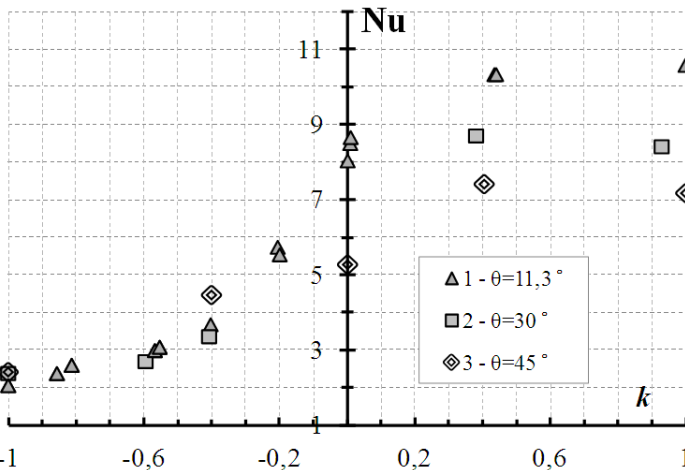


Рис. 17. Среднее число Nu в зависимости от неоднородности обогрева, ($z/d=37$, $Re=10^4$, $Gr=5.3 \cdot 10^7$, $Na=480$) при разных углах наклона θ .

Обогрев «только снизу», подобно горизонтальным трубам, в наклонных трубах реализует гораздо более равномерное распределение Θ_c по периметру и более высокие значения осредненного по периметру числа Нуссельта Nu. Это происходит за счет образования парных вихрей ТГК в условиях неустойчивой стратификации плотности. По мере увеличения угла θ влияние этих вихрей ослабевает и, как следствие, осредненные числа Нуссельта Nu

снижаются как в случае однородного, так и в случае неоднородного обогрева «преимущественно снизу» ($k>0$).

Возникновение возвратного течения не сопровождается увеличением амплитуды пульсаций температуры (Рис. 18(а), Рис.19(а)). В режимах, где присутствует заторможенная область вблизи верхней образующей, под воздействием МП наблюдается развитие пульсаций температуры, обладающих низкой частотой и высокой амплитудой. Причем если при угле наклона $\theta=30^\circ$ амплитуда пульсаций сопоставима с наблюдаемой без влияния МП (Рис. 18(б)), то при $\theta=45^\circ$ наблюдается картина, похожая на случай опускного течения в вертикальной трубе³: амплитуда пульсаций температуры под воздействием продольного МП не только не уменьшается, но становится выше, что может представлять опасность для материала стенки (Рис. 19(б)).

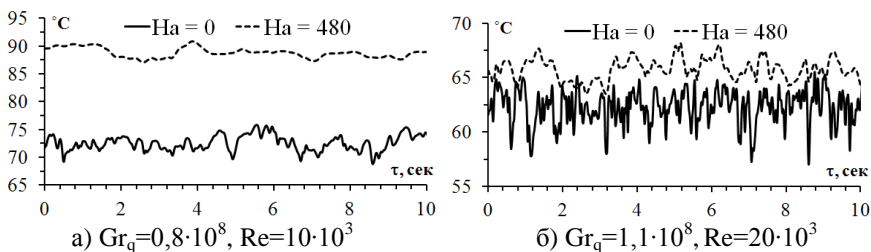


Рис. 18. Осциллограммы температуры вблизи верхней образующей трубы ($R=0.8$, $\varphi=180^\circ$), в сечении $z/d=37$ при наклоне $\theta=30^\circ$.

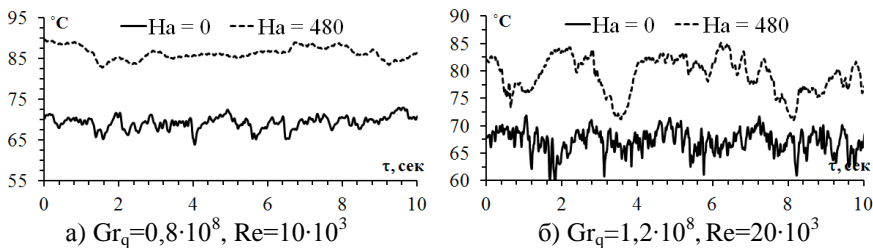


Рис. 19. Осциллограммы температуры вблизи верхней образующей трубы ($R=0.8$, $\varphi=180^\circ$), в сечении $z/d=37$ при наклоне $\theta=45^\circ$.

3 Ковалев С.И. Влияние продольного магнитного поля и термогравитационной конвекции на теплоотдачу при течении жидкого металла// Дис. канд. техн. наук. – М., 1988. – 109 с.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые проведены комплексные экспериментальные исследования и численное моделирование теплообмена жидкого металла при опускном течении в наклонной обогреваемой трубе (углы $11,3^\circ$; 30° ; 45° к горизонту) под воздействием продольного магнитного поля. Исследованы режимы с параметрами $Na^2/Re=1\div 23$, $Gr/Re^2=0\div 0.8$ в случае обогрева однородного, одностороннего («сверху» или «снизу») и промежуточного. С применением зондовых методов измерены поля осредненной продольной скорости и осредненной температуры, пульсации температуры, локальные и средние числа Нуссельта.
2. Показано, что опускное течение в наклонной трубе с углами вплоть до $\theta=45^\circ$ к горизонту по характеристикам теплообмена гораздо ближе к горизонтальной трубе, чем к вертикальной. Развивается существенная неоднородность температуры стенки по периметру сечения трубы с образованием зон ухудшенного теплообмена. Перепад температур на верхней и нижней образующих превышает значения, полученные в эквивалентных режимах для горизонтальной трубы, особенно при наличии магнитного поля.
3. Роль термогравитационной конвекции во всем исследованном диапазоне режимных параметров существенна. Спецификой наклонных труб является заторможенная область вблизи верхней образующей. Впервые показано, что в присутствии продольного магнитного поля возможно развитие возвратных течений в области низких чисел Re , особенно при неоднородном обогреве, в котором больший тепловой поток приходится на верхнюю образующую. Возвратные течения впервые обнаружены и исследованы экспериментально при помощи непосредственного измерения продольной компоненты скорости. Возвратные течения приводят к крайне высокой неоднородности в распределении температуры стенки по сечению трубы (с разницей безразмерной температуры на верхней и нижней образующей до $\Delta\Theta_c = |\Theta_c^{верх} - \Theta_c^{низ}| = 1,5$) и крайне низким числам Нуссельта: локальным менее единицы и средним по периметру около 2, что представляет опасность для конструкции теплообменника.
4. Возвратные течения не сопровождаются ростом амплитуды пульсаций температуры. Обнаружены режимы, в которых при наличии продольного магнитного поля наблюдаются низкочастотные пульсации температуры с амплитудами, превышающими значения, характерные для чисто турбулентных пульсаций температуры без магнитного поля, что может представлять опасность для материала стенки теплообменника.
5. Результаты численного моделирования в целом согласуются с экспериментальными данными, качественно предсказывая возникновение возвратных течений.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

[1] В.Г. Жилин, В.Г. Свиридов, Н.Г. Разуванов, 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// Тепловые процессы в технике – 2009. – Том 1.- с. 199-203. ISSN 2074-2649.

[2] 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.

[3] I.A. Belyaev, Ya.I. Listratov, N.G. Razuvanov, V.G. Sviridov Liquid metal heat transfer in an inclined tube affected by a longitudinal magnetic field// Proceeding of the 8th International PAMIR Conference on Fundamental and Applied MHD, France, 2011, p.43-49.

[4] И.А. Беляев, Л.Г. Генин, Н.Г. Разуванов, В.Г. Свиридов Влияние неоднородности обогрева на теплообмен жидкого металла в наклонной трубе под воздействием продольного магнитного поля// Тепловые процессы в технике. №10, 2012 г с 442-449. ISSN 2074-2649.

[5] I.A. Belyaev, Ya.I. Listratov, N.G. Razuvanov, V.G. Sviridov Liquid Metal Heat Transfer in an Inclined Tube Affected by a Longitudinal Magnetic Field// Journal of Iron and Steel Research, International, 2012, 19 (Supplement 1) pp. 487-490 ISSN 1006-706X; CN 11-3678/TF.

[6] I.A. Belyaev, L.G. Genin, Ya.I. Listratov, I.A. Melnikov, V.G. Sviridov, E.V. Sviridov, Yu.P. Ivotchkin, N.G. Razuvanov, Yu.S. Shpansky SPECIFIC FEATURES OF LIQUID METAL HEAT TRANSFER IN A TOKAMAK REACTOR //MAGNETOHYDRODYNAMICS Vol. 49 (2013), No. 1, pp. 177–190.

Печ.л. _____

Тираж _____

Заказ _____

Полиграфический центр МЭИ, Москва, Красноказарменная 13