

на правах рукописи

РАЗУВАНОВ НИКИТА ГЕОРГИЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ МГД-ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОГО
МЕТАЛЛА В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ.

Специальность 01.04.14

Теплофизика и теоретическая теплотехника.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук.

Москва - 2011

Работа выполнена на кафедре Инженерной теплофизики Московского энергетического института (технического университета) и в Объединенном институте высоких температур Российской Академии наук

Научный консультант: доктор технических наук, профессор Свиридов Валентин Георгиевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Безносков Александр Викторович

доктор физико-математических наук, профессор
Гладуш Геннадий Григорьевич

доктор технических наук, профессор Лущик
Валерий Григорьевич

Ведущая организация: Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт».

Защита состоится 21 октября 2011 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д.212.157.04 при Московском энергетическом институте (техническом университете)

по адресу Москва, Красноказарменная ул., д.17, к. «Т», ауд. Т-206.

Отзывы, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д.14, Ученый совет МЭИ(ТУ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ(ТУ)

Автореферат разослан " ____ " _____ 2011 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д.212.157.04 _____ Мика В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Жидкие металлы (ЖМ) рассматриваются как перспективные теплоносители в ядерных реакторах на быстрых нейтронах и в термоядерных реакторах (ТЯР) типа токамак. Новая концепция в развитии термоядерного направления заключается в разработке ТЯР гибридного типа или термоядерных источников нейтронов (ТИН). ТИНЫ в основном предназначены для наработки искусственного ядерного горючего (плутония и/или урана-233 из урана-238 и тория), снижения активности отработанных ТВЭЛов. Для охлаждения первой стенки, blankets и дивертора в реакторах «чистых» и гибридных ТЯР в качестве теплоносителя предпочтительны ЖМ.

ЖМ обладают рядом преимуществ по сравнению с водой, среди которых – слабое замедление нейтронов, высокая температура кипения при атмосферном давлении. Основная проблема ЖМ в ТЯР – большие гидравлические сопротивления в магнитном поле токамака – как показали исследования последних десятилетий, не является непреодолимой.

Теплообмен при течении ЖМ в каналах ТЯР благодаря наличию магнитных полей (МП) будет сильно отличаться от закономерностей при течении теплоносителей в аппаратах традиционной энергетики.

Имеющиеся в литературе данные по МГД-течению и теплообмену получены в «идеализированных» условиях: обычно рассматривается стабилизированное течение в трубах или плоских двумерных каналах, однородные МП. Сложная геометрия течения в теплообменных системах, магнитные поля различной ориентации, в общем случае неоднородные, короткие участки каналов (не достигается стабилизация течения) не позволяет переносить напрямую аналитические или эмпирические зависимости, известные в магнитной гидродинамике, на условия ТЯР.

Другая особенность теплообмена ТЯР – это наличие зон с весьма высокими удельными тепловыми нагрузками. При этом сильная неизотемичность потока ЖМ приводит к интенсивным вторичным течениям,

вызванным термогравитационной конвекцией (ТГК). Магнитное поле изменяет структуру течения, подавляя турбулентный перенос, что снижает теплообмен, при этом неоднозначно действует на вторичные вихревые течения ТГК, тормозя или усиливая последние. Развитие ТГК в МГД потоке при этом приводит к неожиданным эффектам: сильная неоднородность в распределении температур в потоке и на стенке канала, появление зон ухудшенного теплообмена, где температуры могут превышать предельно-допустимые для материалов стенки значения. Также ТГК может вызвать генерацию низкочастотных пульсаций температуры аномально высокой интенсивности. Такие пульсации опасны для стенки теплообменника, так как легко проникают в нее и могут вызвать ее преждевременное усталостное разрушение за счет термических напряжений.

В большинстве исследований по МГД-теплообмену не рассматривали влияние ТГК. Результат совместного воздействия ТГК и МП на теплообмен в трубе неоднозначен и зависит от ориентации трубы относительно вектора силы тяжести и направления индукции МП, от распределения плотности теплового потока.

В различных проектах ТЯР встречаются теплообменники с горизонтальным, вертикальным, наклонным, а также комбинированным расположением каналов. Закономерности МГД-теплообмена во всех этих конфигурациях, как уже отмечалось, существенно различны и по этой причине все они заслуживают изучения. В данной работе рассматривался теплообмен в горизонтальной трубе в условиях совместного влияния МП и ТГК в режимах приближенных к реальным в ТЯР.

Цель работы

- Создание экспериментального МГД-комплекса для исследования теплообмена при течении жидкого металла в трубе в продольном или поперечном МП в условиях существенного влияния ТГК.
- Усовершенствование методик измерения локальных коэффициентов теплоотдачи, полей осреднённой температуры и температурных пульсаций.

Развитие метода измерения продольной и поперечной компонент скорости корреляционными датчиками и электромагнитными датчиками, соответственно.

- Проведение экспериментальных исследований характеристик теплообмена в потоке жидкого металла в горизонтальной обогреваемой трубе в отсутствие и при наличии продольного или поперечного МП в условиях приближенных к ТЯР. Исследование различных вариантов обогрева трубы: однородного при условии $q_c = \text{const}$, неоднородного двухстороннего "слева-справа" и "сверху-снизу". Получение опытных данных о полях температуры и скорости, распределениях средних и локальных коэффициентов теплоотдачи, статистических характеристиках турбулентных пульсаций температуры.

- Разработка методов численного моделирования полей температуры и скорости, коэффициентов теплоотдачи при течении ЖМ в трубах.

- Анализ, сопоставление и обобщение опытных данных и результатов численного моделирования МГД-теплообмена.

Научная новизна работы

Впервые создан полностью автоматизированный ЖМ (ртутный) комплекс, объединяющий экспериментальные стенды МЭИ и ИВТ РАН, и разработаны методы зондовых измерений характеристик гидродинамики и теплообмена ЖМ в условиях, приближенных к ТЯР типа токамак.

Впервые проведены комплексные экспериментальные исследования гидродинамики и теплообмена ЖМ в горизонтальной трубе при наличии МП (продольного и поперечного) и ТГК, то есть в условиях совместного влияния массовых сил различной природы – электромагнитной силы и силы плавучести. Впервые исследованы различные варианты обогрева: однородный при условии $q_c = \text{const}$, двухсторонний несимметричный "слева-справа", "сверху-снизу", односторонний «сбоку», «сверху» и «снизу». Детальные измерения полей осредненной температуры и скорости, распределений средних и локальных коэффициентов теплоотдачи, статистических характеристик турбулентных пульсаций температуры

выполнены в диапазоне: чисел Рейнольдса $Re=5000\div 100000$, чисел Грасгофа $Gr=10^7\div 1,5\cdot 10^8$, чисел Гартмана $Na=0\div 500$.

Впервые исследованы профили осредненной скорости основного течения и скорости вторичных течений ТГК. При этом использованы как усовершенствованные корреляционный датчик скорости, так и новый электромагнитный датчик скорости с температурной компенсацией.

На основе системы уравнений МГД-теплообмена предложен верифицированный по собственным опытным данным расчётный метод и впервые выполнено численное моделирование гидродинамики и теплоотдачи при течении жидкого металла в трубе в продольном и поперечном МП в условиях, соответствующих эксперименту. В численном расчете получены трехмерные поля давления, компонент скорости и плотности электрического тока, температуры, распределения средних и локальных коэффициентов теплоотдачи (чисел Нуссельта) по всей длине зоны обогрева.

Впервые подробно исследовано влияние ТГК на характеристики теплообмена при течении жидкого металла в горизонтальной обогреваемой трубе. Обнаружен ряд благоприятных и неблагоприятных с точки зрения теплообмена эффектов ТГК. В МП эффекты ТГК могут и усиливаться и ослабляться в зависимости от направления МП и варианта обогрева.

Практическая ценность и апробация работы

Практическая ценность диссертации заключается в следующем: Опытные данные и результаты численного расчета могут быть использованы:

- для концептуальных проработок и проектирования теплообменников перспективных ядерных энергетических установок с ЖМ теплоносителями и рабочими средами, в частности, бланкета и дивертора термоядерного реактора типа токамак с ЖМ охлаждением;
- для развития и верификации численных методов и аналитических расчетных моделей турбулентного теплообмена при течении электропроводных сред в магнитных полях;
- при постановке лабораторных экспериментов на ЖМ стендах;

- в лекционных курсах и лабораторных практикумах для студентов.

Основные положения и результаты диссертационной работы изложены и обсуждены на Международных конференциях по турбулентному тепло и массообмену (Лиссабон, Манчестер, Вашингтон, 1994, 1998, 2010 г.); Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 1998, 2002, 2006 и 2010 г.); Минском международном форуме по тепломассообмену (Минск, 1996, 2000, 2006 и 2008 г.); Симпозиумах по термоядерным технологиям (Карлсруэ, Лиссабон, 1994, 1996); VIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике, (Пермь, 2001); Двенадцатой Международной конференции по теплообмену (Гренобль, 2002); Международных конференциях по МГД – «РАМIR» (Франция, 2000, 2002, 2008); Международных конференциях «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Москва, 2005 и 2008 г.); XIV-XVII Школах-семинарах молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, (Москва, Калуга, Санкт-Петербург, Жуковский, 2003, 2005, 2007 и 2009 г.); «12 Совещания по инженерным проблемам термоядерных реакторов» (Санкт-Петербург, 2006); Межведомственных семинарах «Тепломассоперенос и свойства жидких металлов», «Теплогидравлические аспекты безопасности активных зон, охлаждаемых водой и жидкими металлами», «Технология щелочных жидкометаллических теплоносителей» (Обнинск, 2007, 2008 и 2009 г.); научно-технической конференции «Проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии» (Москва, 2009); на научных семинарах под руководством А.И. Леонтьева (2009), Института физики токамаков РНУКИ (2010), НИИЭФА им Д.В. Ефремова (2011).

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- тщательной проработкой методик измерений и обработки первичных экспериментальных данных, предварительной тарировкой всех используемых первичных датчиков;

- воспроизводимостью полученных опытных результатов и согласованностью их с имеющимися в литературе теоретическими и опытными данными, полученными в близких условиях;
- хорошим совпадением экспериментальных данных и результатов численного моделирования, полученных в идентичных условиях.

Автор защищает:

1. Усовершенствованные методы измерений в потоке жидкого металла, а именно: корреляционный метод измерения профилей осредненной скорости в неизотермическом потоке; метод измерения электромагнитным датчиком поперечных компонент скорости ЖМ в МП, зондовый метод измерения трехмерных полей осреднённой температуры и температурных пульсаций.

2. Экспериментальные данные о полях осредненной температуры и скорости, распределениях локальных и средних коэффициентов теплоотдачи (чисел Нуссельта) по длине потока в обогреваемом участке горизонтальной трубы в продольном или поперечном МП при однородном по длине и, в общем случае, неоднородном распределении тепловой нагрузки по периметру сечения трубы.

3. Экспериментальные данные о статистических характеристиках пульсаций температуры: распределениях интенсивности пульсаций температуры, автокорреляционной функции и спектров в потоке ЖМ в условиях эксперимента.

4. Методику численного расчета и результаты численного моделирования трехмерных полей давления, осредненных компонент скорости, температуры, распределения коэффициентов теплоотдачи в условиях течения и теплообмена ЖМ в трубе в МП.

5. Обнаруженные и исследованные физические явления:

- Впервые в потоке ЖМ в горизонтальной обогреваемой трубе в МП детально исследованы влияние вторичных течений ТГК. Эти вторичные течения: - с одной стороны, интенсифицируют осреднённые (по периметру сечения трубы) коэффициенты теплоотдачи; с другой стороны, нарушают

осевую симметрию полей скорости и температуры, приводят к неравномерному распределению температуры стенки по периметру сечения трубы с образованием зон ухудшенной теплоотдачи;

- Обнаружено, что результат совместного воздействия ТГК и МП не однозначен. Впервые исследовано, каким образом, в зависимости от направления МП, продольного или поперечного, и варианта обогрева эффекты ТГК могут усиливаться или ослабляться.

- В сильном поперечном МП в горизонтальной трубе с неоднородным обогревом при неустойчивой стратификации, обогреве только «снизу», впервые обнаружено появление низкочастотных пульсаций температуры аномальной высокой интенсивности.

Публикации:

Содержание диссертационной работы изложено в 47 докладах, опубликованных автором в соавторстве в трудах отечественных и международных конференций, список которых представлен выше. Основное содержание работы представлено в 14 публикациях в журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК [1-14].

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения (основные результаты и выводы), списка использованной литературы из 160 наименований. Работа изложена на 293 страницах текста, иллюстрируется 187 рисунками.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложена актуальность темы: перспективность ЖМ для систем охлаждения ТЯР. Специфика течения ЖМ теплоносителя в реакторе токамаке связана с влиянием двух основных факторов: сильного МП и ТГК. Расчет МГД теплообмена в каналах охлаждения ТЯР сложен и будет выполняться численными методами. Для создания и тестирования расчетных методов требуются надежные экспериментальные данные.

Глава 1. Методика исследования.

Ставится задача исследования МГД-течения и теплоотдачи ЖМ в горизонтальной трубе в продольном или поперечном МП (рис. 1). На схемах обозначены вектора: скорости потока ЖМ V , ускорения свободного падения g , индукции МП B .

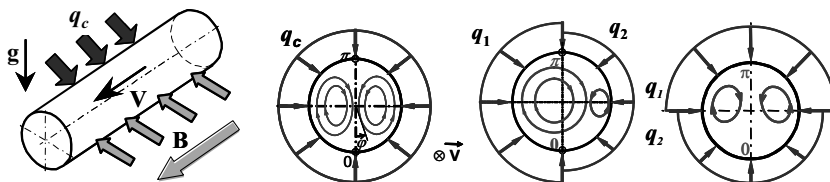


Рис. 1. Исследуемые схемы течения и обогрева.

Исследования проводились при различных вариантах обогрева рабочего участка: однородный обогрев $q_c = \text{const}$; двухсторонний несимметричный «слева-справа» (слева q_1 и справа q_2); двухсторонний несимметричный «сверху-снизу» (сверху q_1 и снизу q_2), односторонний ($q_1 = 0$ или $q_2 = 0$). Все эти конфигурации течения и теплообмена могут встречаться в ТЯР.

На базе двух ртутных стендов создан и введен в эксплуатацию экспериментальный комплекс для исследования гидродинамики и теплообмена при течении жидкого металла в трубах и каналах в *продольном* МП (стенд МЭИ) и в *поперечном* МП (стенд ИВТ РАН). Комплекс моделирует условия, приближенные к реальным в различных участках теплообменных каналов охлаждения ТЯР типа токамака. Весь процесс измерения автоматизирован.

МГД-комплекс позволяет проводить исследования в следующих диапазонах режимных параметров: числа Рейнольдса Re - $5000 \div 120000$, Грасгофа Gr_q - до $1,5 \cdot 10^8$, Рэлея Ra - до $4 \cdot 10^6$; Гартмана Na - $0 \div 600$

Измерения в потоке проводились зондовыми методами с использованием микротермопар и миниатюрных датчиков скорости.

Для подробных измерений в поперечном сечении трубы использовался зонд рычажного типа. Для проведения измерений трехмерных полей

температур в потоке и локальных коэффициентов теплоотдачи использовались зонды типа «гребенка» (рис. 2) и рычажного типа.

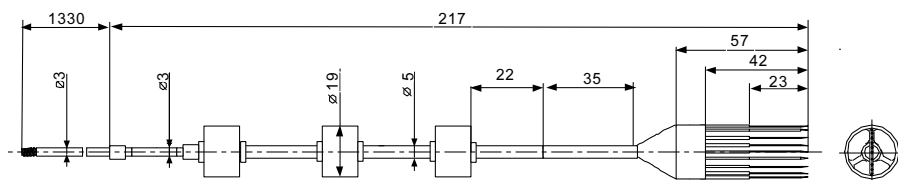


Рис. 2. Продольный зонд «гребенка».

Безразмерные местные коэффициенты теплоотдачи характеризуются

числом Нуссельта $Nu = \frac{q_c d}{(T_c - T_{жс})\lambda}$ и безразмерной температурой стенки

$\Theta_c = \frac{(T_c - T_{жс})\lambda}{q_c d}$, где q_c – плотность теплового потока на стенке; $T_{жс}$ –

среднемассовая температура жидкости; d – внутренний диаметр рабочего участка; λ – теплопроводность ртути. Температура стенки T_c определялась зондом, экстраполяцией на стенку температурного профиля в потоке. Это позволяет избежать влияния термического контактного сопротивления на измерения.

Для измерения продольной компоненты скорости V_z использовался корреляционный датчик, состоящий из двух микротермопар, спая которых располагаются на линии тока (рис. 3). Диаметр спая термопар δ и расстояние между термопарами l оптимизировались в ходе предварительных опытов. Датчик монтировался на конце зонда рычажного типа.

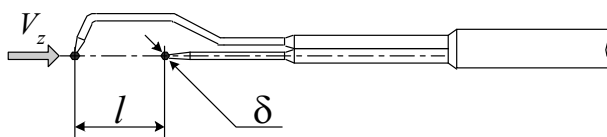


Рис. 3. Корреляционный датчик скорости.

Профили скорости измеряются корреляционным методом с использованием естественного фона турбулентных пульсаций температуры, переносимых потоком. Значение местной скорости рассчитывается по формуле $V_z=l/\tau$, где время запаздывания τ определяется по максимуму взаимно-корреляционной функции сигналов термопар $T_1(\tau)$ и $T_2(\tau)$:

$$R(S) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t T_1(\tau)T_2(\tau+S)d\tau. \text{ Значение } V_z \text{ уточняется введением поправки,}$$

учитывающей искажение поля скорости первой термопарой датчика, которая определена в результате предварительной градуировки.

Измерения поперечной компоненты скорости V_{\perp} проводилось с помощью электромагнитного датчика (рис. 4), который представляет собой «вилку» из двух медных электродов. Расстояние между электродами составляло $l=3,0$ мм. Зонд вводился в поток параллельно продольной скорости и вектору магнитной индукции \mathbf{B} так, что электроды лежали в горизонтальной плоскости. При наличии поперечной скорости и продольного МП между электродами возникает разность потенциалов U , пропорциональная поперечной скорости, если индукционными токами можно пренебречь (как в наших опытах).

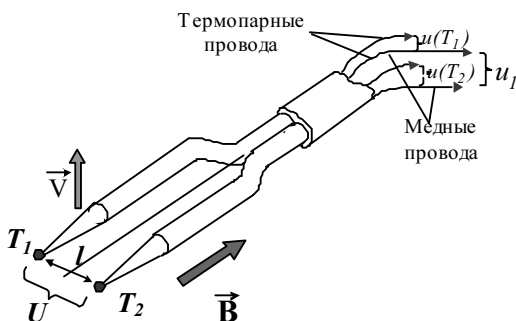


Рис. 4.
Электромагнитный преобразователь скорости с температурной компенсацией.

Подобные датчики давно применяются в изотермических потоках электропроводных сред. В неизотермическом потоке на полезный сигнал U накладывается термо-ЭДС $U_{\text{д}}$, связанная с образованием дифференциальной

термопары «электрод-ртуть-электрод»: $U_{из}=U+U_0$, где $U_{из}$ – измеряемый сигнал. Поэтому каждый электрод выполнен в виде медно-константановой термопары, что позволяет измерять разность температур и внести соответствующую поправку. Такой датчик с температурной компенсацией нами применен впервые (Патент RU № 91179).

Задача численного моделирования приближена к условиям лабораторного эксперимента. Рассматривается стационарное течение и теплообмен жидкого металла в горизонтальной трубе в продольном или поперечном МП.

На входе в трубу задается участок гидродинамической стабилизации $Z_0=50d$, затем поток попадает в обогреваемый участок $Z_q=50d$ (на стенке задан тепловой поток q_c), который совпадает с областью однородного МП.

Система осреднённых уравнений решается в безразмерном виде в цилиндрической системе координат (R, ϕ, Z) (рис.5):

уравнение неразрывности

$$\frac{1}{R} \frac{\partial(R \cdot V_R)}{\partial R} + \frac{1}{R} \frac{\partial V_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial V_Z}{\partial Z} = 0 \quad (1)$$

уравнения движения

$$\begin{aligned} V_R \frac{\partial V_R}{\partial R} + \frac{V_\phi}{R} \frac{\partial V_R}{\partial \phi} + V_Z \frac{\partial V_R}{\partial Z} &= -\frac{\partial p^*}{\partial R} + \nabla \left(\frac{1}{\text{Re}} \left(1 + \frac{\varepsilon_\sigma}{\nu} \right) \nabla V_R \right) + \frac{V_\phi^2}{R} + \frac{1}{\text{Re}} \left(1 + \frac{\varepsilon_\sigma}{\nu} \right) \left(\frac{2}{R^2} \frac{\partial V_\phi}{\partial \phi} + \frac{V_R}{R^2} \right) + F_R \\ V_R \frac{\partial V_\phi}{\partial R} + \frac{V_\phi}{R} \frac{\partial V_\phi}{\partial \phi} + V_Z \frac{\partial V_\phi}{\partial Z} &= -\frac{1}{R} \frac{\partial p^*}{\partial \phi} + \nabla \left(\frac{1}{\text{Re}} \left(1 + \frac{\varepsilon_\sigma}{\nu} \right) \nabla V_\phi \right) + \frac{V_R V_\phi}{R} + \frac{1}{\text{Re}} \left(1 + \frac{\varepsilon_\sigma}{\nu} \right) \left(\frac{2}{R^2} \frac{\partial V_R}{\partial \phi} - \frac{V_\phi}{R^2} \right) + F_\phi \\ V_R \frac{\partial V_Z}{\partial R} + \frac{V_\phi}{R} \frac{\partial V_Z}{\partial \phi} + V_Z \frac{\partial V_Z}{\partial Z} &= -\frac{\partial p^*}{\partial Z} + \nabla \left(\frac{1}{\text{Re}} \left(1 + \frac{\varepsilon_\sigma}{\nu} \right) \nabla V_Z \right) + F_Z \end{aligned} \quad (2)$$

уравнение энергии

$$V_R \frac{\partial \Theta}{\partial R} + \frac{V_\phi}{R} \frac{\partial \Theta}{\partial \phi} + V_Z \frac{\partial \Theta}{\partial Z} = \nabla \left(\frac{1}{\text{Re Pr}} \left(1 + \frac{\varepsilon_q}{\nu} \right) \nabla \Theta \right) \quad (3)$$

закон Ома и Кирхгофа

$$j_i = E_i + (\mathbf{V} \times \mathbf{B})_i \text{ и } \text{Div} \mathbf{j} = 0 \quad (4)$$

Вводился потенциал электрического поля ψ для определения напряжённости электрического поля $\mathbf{E} = -\text{grad } \psi$.

В качестве масштабов координат, скорости, плотности электротока, напряженности электрического поля вводились соответственно: диаметр трубы d ; средняя скорость V_0 ; масштаб $\sigma/(V_0 B_0)$, масштаб $V_0 B_0$, где σ – электропроводность ртути, B_0 – индукция внешнего МП:

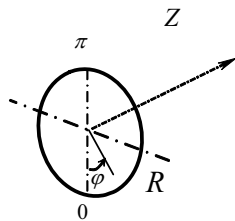


Рис. 5. Система координат

Безразмерная температура определялась как $\Theta=(T-T_0)/(q_0 d/\lambda)$, где T_0 – температура во входном сечении, $q_0=(q_1+q_2)/2$, λ - теплопроводность ртути; F_R , F_ϕ , F_Z - компоненты массовых сил (гравитационной и электромагнитной), например в поперечном МП они имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} F_r &= -\frac{Gr_q}{Re^2} \Theta \cos \phi + \frac{Ha^2}{Re} (-V_r \cos^2 \phi - (V_\phi \sin \phi - E_z) \cos \phi) \\ F_\phi &= \frac{Gr_q}{Re^2} \Theta \sin \phi + \frac{Ha^2}{Re} (-V_\phi \sin^2 \phi + (V_r \cos \phi + E_z) \sin \phi) \\ F_z &= \frac{Ha^2}{Re} (E_r \cos \phi - E_\phi \sin \phi - V_z) \end{aligned} \quad (5)$$

Граничные условия на стенке: $\mathbf{V} = 0$, $\partial\Theta/\partial R = -q/q_0$.

Коэффициент турбулентного переноса тепла определяется через коэффициент турбулентного переноса импульса ε_σ/ν : $\frac{\varepsilon_q}{a} = \frac{\nu \varepsilon_q \varepsilon_\sigma}{a \varepsilon_\sigma \nu} = \frac{Pr \varepsilon_\sigma}{Pr_T \nu}$.

В отсутствие МП ε_σ/ν рассчитывался по известным соотношениям Рейхардта, В.Н.Попова и В.М. Беляева (для малых чисел Re). В продольном МП использовалась модель, предложенная Гениным Л. Г. и Краснощековой Т.Е. Влияние МП на коэффициент турбулентного переноса импульса ε_σ/ν учитывалось с помощью функции $\gamma(Re, Ha)$, не зависящей от пространственных координат $(\varepsilon_\sigma/\nu)_{Ha} = \gamma(Re, Ha) \cdot (\varepsilon_\sigma/\nu)_0$, где $(\varepsilon_\sigma/\nu)_0$ - коэффициент турбулентного переноса импульса без МП;

$$\begin{cases} \gamma = 1 - \exp(-k(Re/Re_{кр,Ha} - 1)^n) & \text{для } Re > Re_{кр,Ha} \\ \gamma = 0 & \text{для } Re \leq Re_{кр,Ha} \end{cases}; \quad (6)$$

$$\text{где } \begin{cases} k = 11 / \text{Ha}^{0,4}, & n = 0,5 \quad \text{для } 40 \leq \text{Ha} \leq 200 \\ k = 14 / \text{Ha}^{0,42}, & n = 0,6 \quad \text{для } 200 \leq \text{Ha} \leq 1000 \end{cases}$$

Для оценки критического числа Рейнольдса в продольном и поперечном МП использовались соотношения $\text{Re}_{\text{кр,Ha}} \sim 30 \text{ Ha}$ и $\text{Re}_{\text{кр,Ha}} \sim 900 \text{ Ha}$, соответственно. В поперечном МП большинство моделируемых численно автором режимов течения оказывалось в условиях докритических $\text{Re} < \text{Re}_{\text{кр,Ha}}$.

Численный расчет проводился с использованием программной среды ANES/NE. В основе ANES/NE лежит метод контрольных объемов.

Глава 2. Современное состояние вопроса.

Глава представляет собой обзор имеющихся в литературе данных по гидродинамике и теплообмену при течении ЖМ в трубе в МП. Отмечено, что большинство данных получено без учета влияния ТГК, в основном в вертикальной трубе. Ранее подробные исследования МГД-теплообмена при течении ЖМ в горизонтальной трубе не проводились. Взаимное влияние в этих условиях ТГК и МП не изучено.

Глава 3. МГД-теплообмен при течении жидкого металла в горизонтальной трубе с однородным обогревом.

В главе представлены результаты подробных измерений полей температуры и скорости, коэффициентов теплоотдачи (локальных и средних) в потоке ЖМ, полученные в отсутствие МП и при наличии МП (продольного и поперечного). Результаты экспериментов даются в сравнении с данными численных расчетов, полученными в соответствующих условиях.

На рис. 6. показаны экспериментальные и расчетные поля осредненной температуры в потоке ЖМ с небольшим числом Рейнольдса $\text{Re} = 10000$.

Результаты обнаруживают сильное влияние ТГК, которая проявляется в развитии вторичных течений в виде двух вихрей с продольными осями. Температурные поля становятся несимметричными относительно оси трубы: минимум температуры потока смещается к нижней образующей трубы. При

наложении продольного МП влияние ТГК ещё более усиливается. поскольку МП стабилизирует вторичные вихри.

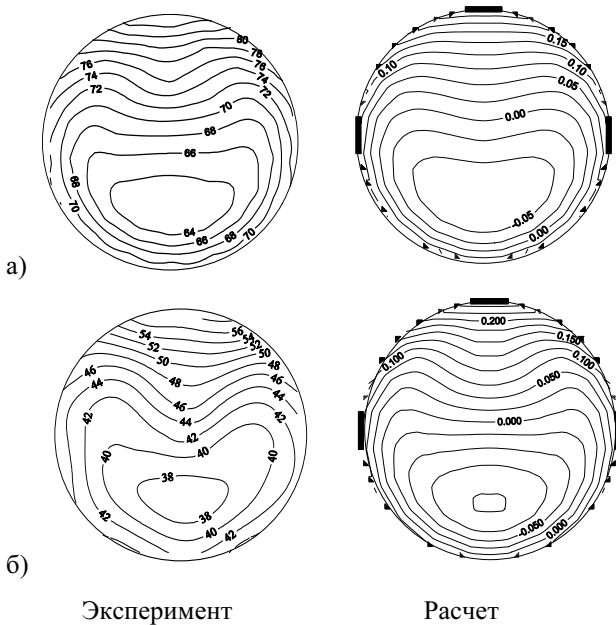


Рис. 6. Поля осредненной температуры в сечении трубы $z/d=37$, $Re = 10000$, $q_c=35 \text{ кВт/м}^2$ ($Gr=0,8 \cdot 10^8$): а) $Na=0$, б) 450.

Поля продольной скорости, измеренные корреляционным методом, показаны на рис. 7. в сравнении с расчетными. Влияние вторичных течений ТГК на поля скорости еще более сильное, чем на поля температуры: максимум скорости смещен к низу трубы.

На рис. 8. показаны профили вертикальной компоненты скорости, расчетные и измеренные электромагнитным датчиком скорости. Совпадение, на взгляд автора, хорошее. Этот результат подтверждает справедливость допущения о том, что индуцированные электрические токи в продольном МП в условиях эксперимента незначительны, что заложено в основу метода измерений.

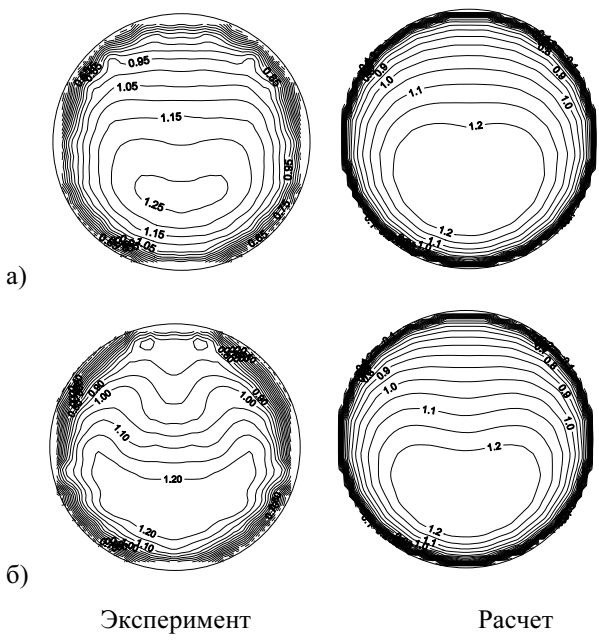


Рис. 7.
 Экспериментальные и
 расчетные поля
 скорости в сечении
 трубы $z/d=37$,
 $Re = 35000$,
 $q_c=35 \text{ кВт/м}^2$:
 а) $Na=0$, б) 450.

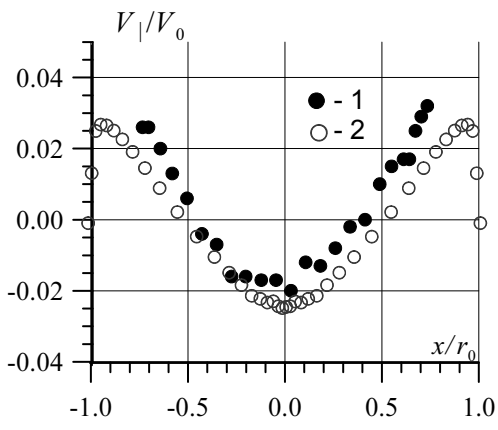


Рис. 8. Профили
 вертикальной
 компоненты скорости V_1 ,
 отнесенной к средней
 скорости V_0 в сечении
 $z/d=37$, $Re = 35000$,
 $q_c=35 \text{ кВт/м}^2$, $Na=450$:
 1) эксперимент, 2) расчет.

На рис. 9. показано распределение безразмерной температуры стенки Θ_c по периметру трубы. Здесь также наблюдается очень неплохое совпадение расчетных (линии) и экспериментальных данных (символы). Температура стенки сильно меняется по периметру сечения трубы: максимум

температуры оказывается в верхней части сечения трубы и абсолютное значение оказывается даже выше ламинарного значения. В продольном МП этот эффект усиливается. Продольное МП подавляет турбулентность, но практически не взаимодействует с вторичными течениями ТК, представляющими собой продольные вихри с осями, параллельными вектору МП. Вследствие этого, вторичные вихри ТК могут устойчиво существовать даже в сильном МП, когда турбулентность полностью подавлена.

На рис. 10. показаны распределения по длине трубы (экспериментальные и расчетные) среднего числа Нуссельта, которое определяется по температуре стенки, осредненной по периметру сечения трубы. Данные сравниваются с формулой Лайона с поправкой в МЭИ для начального термического участка:

$$Nu_0 = 7 + 0,025Pe^{0.8} + 0,006 \left(\frac{1}{Pe d} \right)^{-1.2}, \quad (7)$$

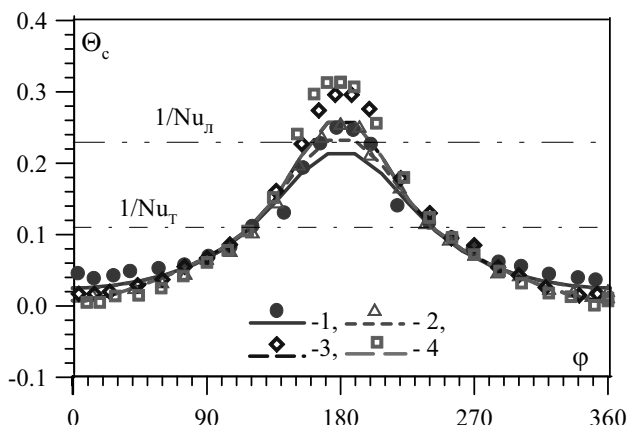


Рис. 9.
Распределение температуры стенки Θ_c по периметру сечения трубы $z/d=37$, $Re=10000$, $q_c=35 \text{ кВт/м}^2$:
1) $Ha=0$, 2) 150. 3) 300, 4) 450.

В экспериментах МАИ и МЭИ было показано, что продольное МП может полностью подавить турбулентность. При этом коэффициенты теплоотдачи стремятся к ламинарному значению $Nu_l = 4,36$. Однако выше сказанное справедливо в идеализированных условиях, при малых тепловых нагрузках,

когда влиянием ТГК можно пренебречь. Иная картина при близкой к реальным условиям ТЯР ситуации совместного влияния ТГК и МП (рис. 10). Как видно, начиная с сечения $z/d \sim 15$, число Нуссельта выходит на горизонтальную асимптоту – стабилизированное значение, существенно превышающее оценку Nu по формуле (7). Очевидно, что наблюдаемое увеличение средней теплоотдачи связано с вторичными вихрями ТГК, которые, как отмечалось выше, не подавляются продольным МП. Казалось бы, интенсификация теплоотдачи является благоприятным эффектом. Однако при этом локальные коэффициенты теплоотдачи распределены по периметру сечения трубы крайне неравномерно (рис. 11). В нижней части трубы вторичные течения натекают на стенку, поэтому в районе нижней образующей коэффициенты теплоотдачи весьма высоки (что и приводит при осреднении по периметру к высокому значению среднего Nu). В верхней части трубы встречные потоки ТГК образуют застойную зону или зону ухудшенной теплоотдачи, где локальные Nu , напротив, имеют аномально низкие значения даже по сравнению с $Nu_{\text{л}} = 4.36$ (смотри также рис. 9).

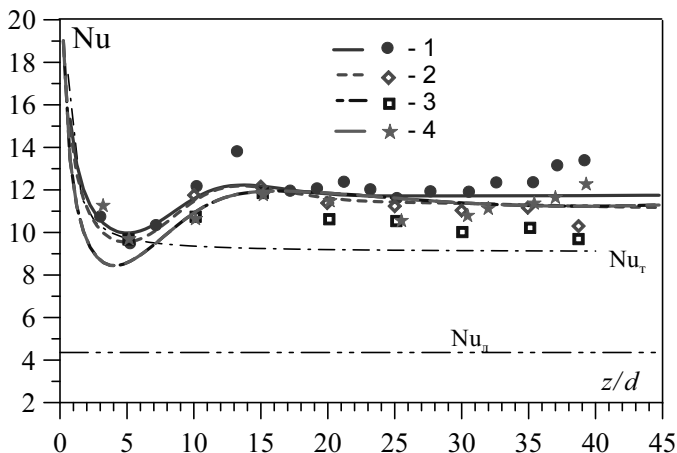


Рис. 10. Распределение среднего числа Нуссельта по длине трубы для $q_c=35$ кВт/м², $Re = 10000$, в продольном МП: 1) $Ha=0$, 2) 150, 3) 300, 4) 450.

Судя по графикам на рис. 10 и 11 также можно говорить о начальном участке теплообмена и участке стабилизации.

Локальная температура стенки Θ_c на верхней и нижней образующих трубы требует особого внимания, так как сильно отличаются от средней по периметру трубы. При практических расчетах (например, в связи с проектированием теплообменников ТЯР) нельзя ориентироваться на данные о средних числах Нуссельта, так как можно сильно ошибиться в оценке температуры стенки T_c . Необходимо рассматривать данные о локальных характеристиках теплоотдачи.

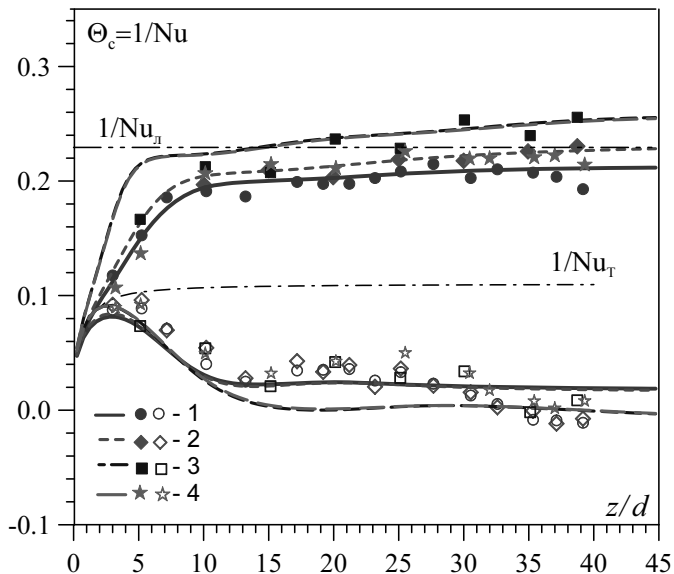


Рис. 11. Распределение безразмерной температуры стенки Θ_c по длине на верхней (темные символы) и нижней (светлые символы) образующих, $q_c=35$ кВт/м², $Re = 10000$: 1) $Ha=0$, 2) 150, 3) 300, 4) 450.

Локальные числа Нуссельта в МП, также как и средние по сечению трубы, мало отличаются от значений, полученных в отсутствие МП поля. Расчетные кривые неплохо согласуются с экспериментальными точками.

Влияние ТГК снижается с ростом числа Рейнольдса и эффекты, связанные с ним, ослабевают: средние значения числа Нуссельта приближаются к Nu_T . С ростом Re локальные значения безразмерной температуры стенки Θ_c на верхней и нижней образующих все меньше отличаются друг от друга, стремясь к зависимости $1/Nu_T$.

В поперечном МП наблюдаются по крайней мере три эффекта:

- подавляется турбулентность гораздо сильнее, чем в продольном МП;
- проявляется эффект Гартмана - уплощение профиля скорости в плоскости МП и рост теплоотдачи на стенке, перпендикулярной к МП;
- вторичные вихри ТГК сильно тормозятся и влияние их исчезает с ростом числа Гартмана.

Поля осредненной температуры, экспериментальные и расчетные, поля скорости (расчетные) в МП показаны на рис. 12. Картины изотерм, полученных в эксперименте и в расчете, хорошо согласуются между собой.

В поперечном МП с числом Гартмана $Na=100$ турбулентные пульсации скорости и температуры подавляются, течение становится ламинарным - профили температуры вытягиваются. Профили скорости - более заполненные вследствие эффекта Гартмана. Влияние вторичных течений ТГК в потоке еще велико. С увеличением числа Гартмана до $Na=300$ влияние вторичных вихрей ТГК в потоке практически исчезает: поля скорости и температуры становятся практически симметричными. Поперечное МП сильно тормозит вторичные течения ТГК, так что при $Na=300$ они практически исчезают

На рис. 13. представлены распределения среднего по периметру числа Нуссельта и безразмерной температуры стенки Θ_c на верхней и нижней образующих.

С ростом числа Гартмана числа Нуссельта монотонно снижаются до значения $Nu_{л,Na}=7$, соответствующего теплоотдаче при стабилизированном ламинарном течении в трубе в сильном поперечном МП. Локальные значения $\Theta_c = 1/Nu$ на верхней и нижней образующих заметно различаются.

На рис. 13. (б) видно, что расчетные данные неплохо согласуются с опытными точками, за исключением числа $Na=300$.

Снижение теплоотдачи связано с подавлением турбулентности и вторичных течений ТГК поперечным магнитным полем.

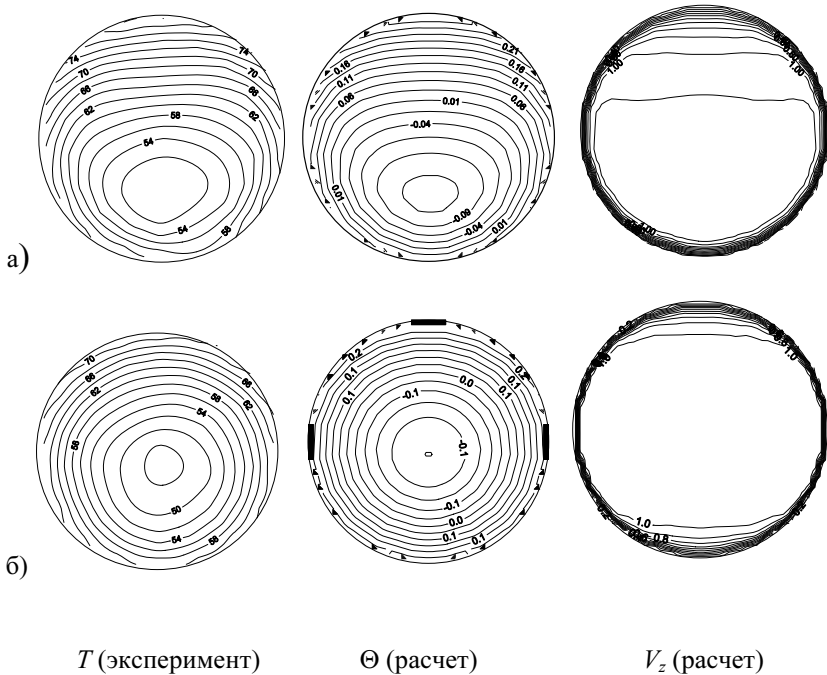


Рис. 12. Поля осредненной температуры и скорости в сечении трубы $z/d=30$, $Re=10000$, $q_c=35$ кВт/м²: а) $Na=100$, б) $Na=300$.

С ростом числа Рейнольдса влияние ТГК снижается и эффекты, связанные с ним, ослабевают: средние и локальные значения числа Нуссельта стремятся к зависимости Nu_T . При этом локальные значения безразмерной температуры стенки на верхней и нижней образующих все меньше отличаются друг от друга, стремясь к зависимости $1/Nu_T$.

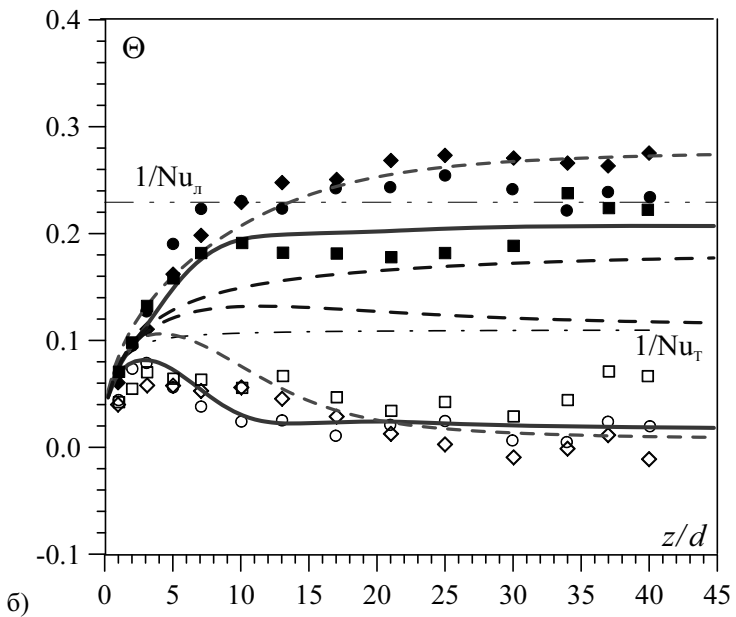
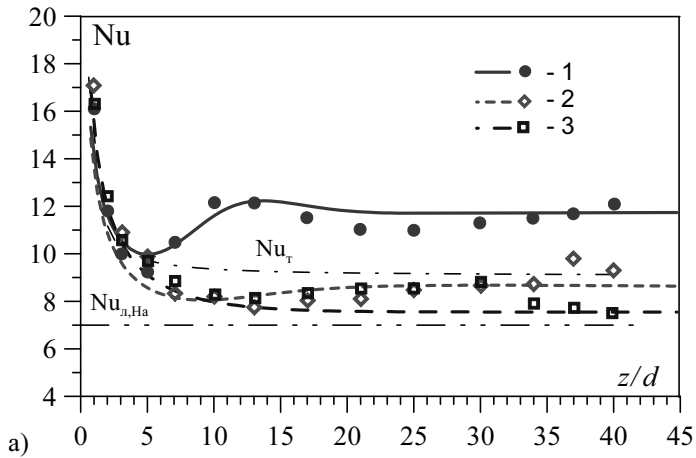


Рис. 13. Распределение по длине трубы среднего числа Нуссельта (а) и безразмерной температуры стенки Θ_c (б) на верхней (черные символы) и нижней (светлые символы) образующих в поперечном МП, $Re = 10000$, $q = 35 \text{ кВт/м}^2$ ($Gr = 0,8 \cdot 10^8$): 1) $Ha = 0$, 2) 100, 3) 300.

Глава 4. МГД-теплообмен при течении жидкого металла в горизонтальной трубе с двухсторонним несимметричным «слева-справа» обогревом.

Проведены исследования теплообмена при течении жидкого металла в горизонтальной трубе с неоднородным в сечении (двухсторонним несимметричным «слева-справа» или односторонним) обогревом в продольном и поперечном МП. Такая конфигурация течения и обогрева характерна для blankets токамака вблизи первой стенки.

В горизонтальной трубе с односторонним обогревом формируются один продольный вихрь ТГК. Этот вихрь накладывается на вынужденное течение и сильно деформируют поля скорости и температуры рис. 14.

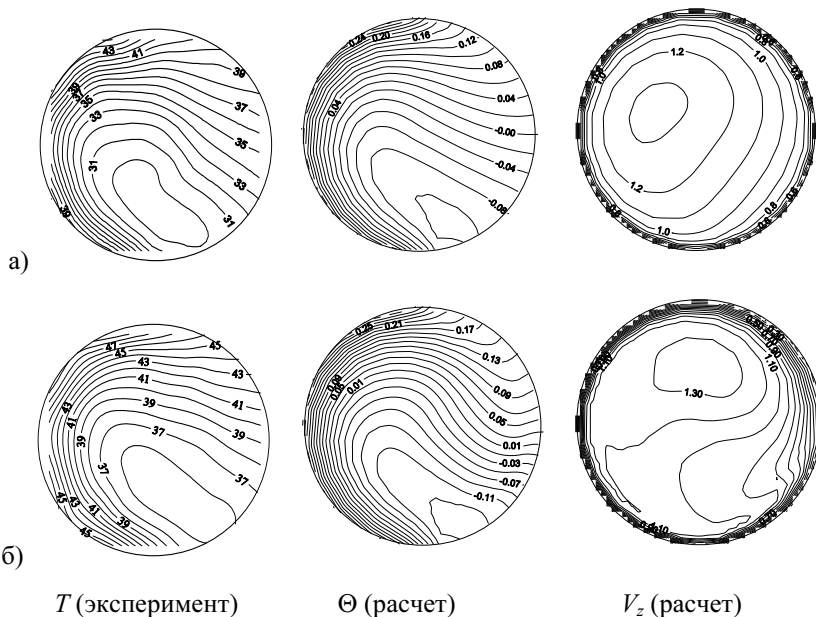


Рис. 14. Поля осредненной температуры в сечении трубы $Re = 10000$, $q = 35 \text{ кВт/м}^2$, $G\Gamma = 3,9 \cdot 10^8$, $z/d = 37$, в продольном МП: а) $Na = 0$, б) 450.

Характер влияния продольного МП аналогичен рассмотренному выше случаю однородного обогрева: подавляется турбулентность, вторичные

течения ТГК не ослабевают. График на рис. 15 подтверждает этот факт, где показаны измеренный и рассчитанный профили вертикальной компоненты скорости, отнесенной к средней скорости.

Распределение температуры стенки Θ_c сильно неоднородно по периметру поперечного сечения трубы (рис. 16) и несимметрично. Минимум температуры оказывается в нижней части трубы, вблизи нижней образующей, а максимум вблизи верхней образующей. При этом локальные значения Θ_c в верхней точке трубы оказываются существенно выше ламинарных значений $1/Nu_{\text{л}}$ ($Nu_{\text{л}} = 4,36$). Символами и кривыми изображены экспериментальные и расчетные значения, которые хорошо совпадают. Здесь q считается, как средняя по сечению плотность теплового потока на стенке: $q = (q_1 + q_2)/2$.

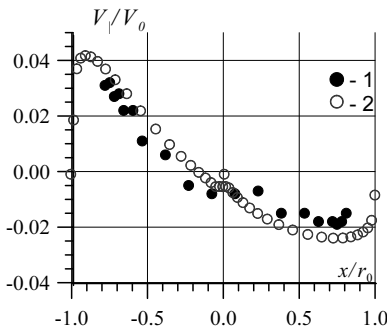


Рис. 15. Профили безразмерной вертикальной компоненты скорости, $z/d=37$, $Re = 35000$, $q_1/q_2 = 35/0$ кВт/м², $Na=400$: 1) эксперимент 2) расчет.

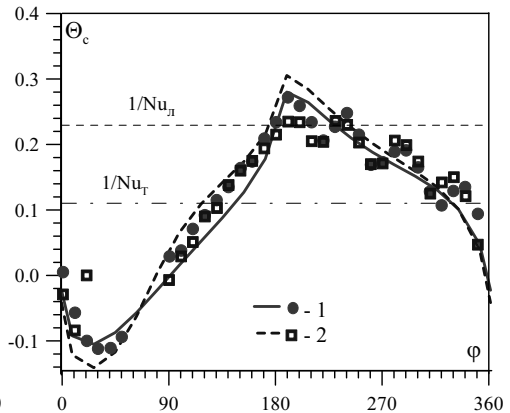
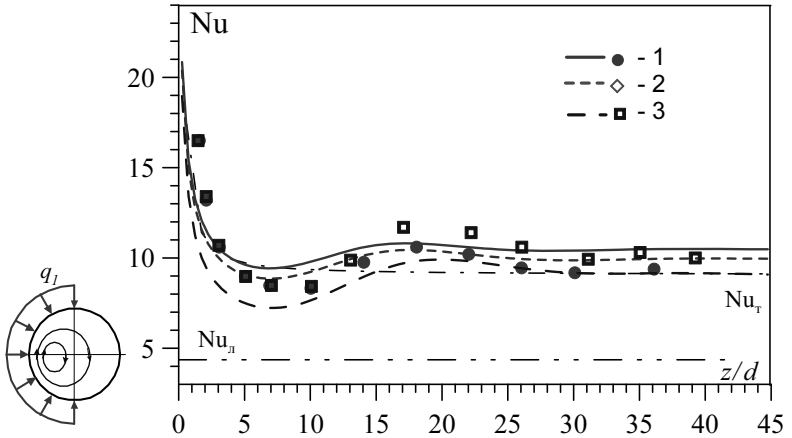


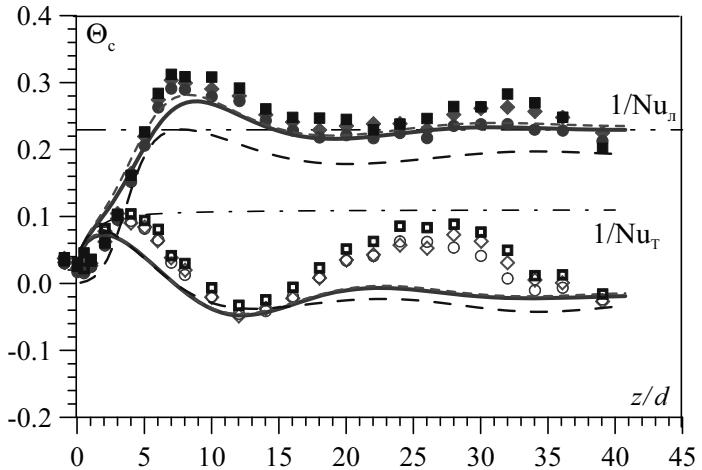
Рис. 16. Распределение безразмерной температуры стенки Θ_c по периметру трубы $z/d=37$, $Re = 10000$, $q_1/q_2 = 35/0$ кВт/м² в продольном МП: 1) $Na=0$, 2) 300.

Средние числа Нуссельта по длине (рис. 17 а) без МП сначала ведут себя в соответствии с формулой (7), затем оказываются выше зависимости

Лайона, что объясняется дополнительным вкладом ТГК в интенсификацию теплоотдачи в трубе. В продольном МП значения Nu остаются на уровне турбулентных значений без МП.



а)



б)

Рис. 17. Распределение среднего числа Нуссельта (а) и безразмерной температуры стенки Θ_c (б) на верхней (черные символы) и нижней (светлые

символы) образующих по длине трубы, $Re = 10000$, $q_1/q_2 = 35/0$ кВт/м² ($Gr=0,4 \cdot 10^8$), в продольном МП: 1) $Na=0$, 2) 150, 3) 300. Линии – расчет.

Локальные значения температур на верхней и нижней образующих сильно отличаются от средней и различаются между собой (рис. 17 б). В распределении $\Theta_c(z/d)$ наблюдается ярко-выраженная немонотонность. В продольном МП расслоения точек по числам Гартмана не наблюдается. Расчетные кривые удовлетворительно согласуются с опытными точками.

Характер влияния поперечного МП в этом варианте обогрева такой же, как и в случае однородного обогрева, представленном выше.

Глава 5. Исследование МГД-теплообмена при течении жидкого металла при неоднородном двухстороннем «сверху-снизу» обогреве трубы.

В главе представлены различные варианты обогрева, среди которых наиболее интересны случаи одностороннего обогрева. При обогреве только «сверху» ($q_1 > q_2 = 0$), вследствие устойчивой стратификации плотности, влияния вторичных вихрей ТГК на поля температуры (рис.18) почти не обнаруживается. При этом распределение температуры стенки сильно неоднородно в сечении трубы. Средние по периметру значения числа Нуссельта здесь наиболее низкие по сравнению с другими схемами обогрева без МП (рис. 19). В поперечном МП они еще снижаются. Неоднородность в распределении температуры стенки очень велика в отсутствие и при наличии МП (рис. 20). Такой же характер поведения обнаруживают и расчетные данные по полям температуры и коэффициентам теплоотдач.

Обогрев только «сверху» - самый неблагоприятный с точки зрения теплообмена вариант, когда в верхней части трубы значения температуры стенки оказываются значительно выше, а локальные числа Нуссельта ниже ламинарных значений. Следует отметить, что такой вариант обогрева характерен для нижней части blankets и дивертора токамака.

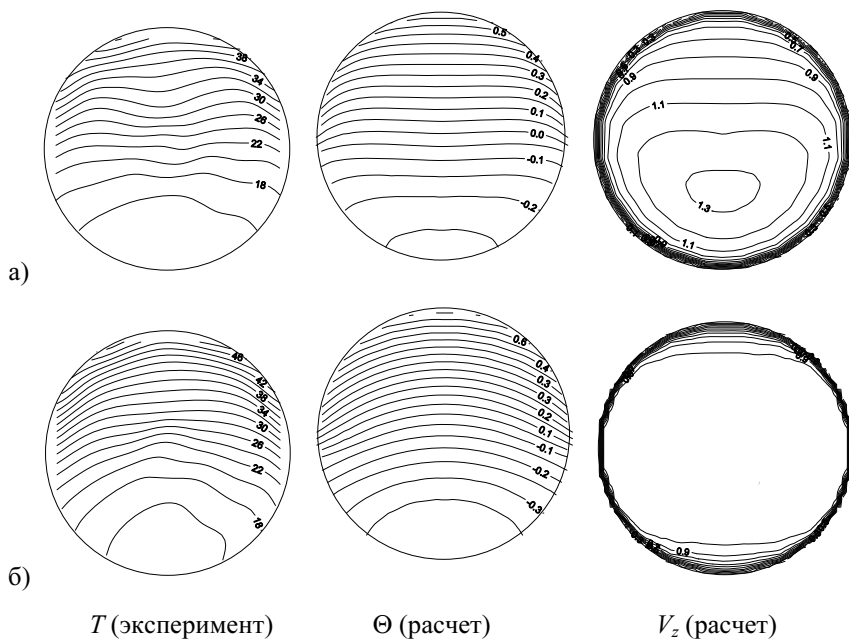


Рис. 18. Поля осредненной температуры и скорости в сечении трубы $z/d=40$, при обогреве «сверху» $q_1/q_2 = 35/0$ кВт/м² ($Gr=0,39 \cdot 10^8$), $Re = 10000$, в поперечном МП: 1) $Ha=0$, 2) 450.

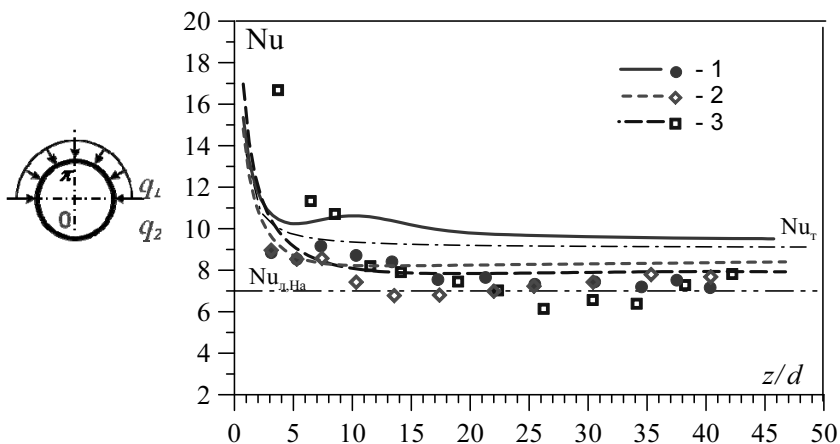


Рис. 19. Распределение среднего числа Нуссельта при $q_1/q_2 = 35/0$ кВт/м², $Re = 10000$, в поперечном МП: 1) $Ha=0$, 2) 100, 3) 300, 4) 500.

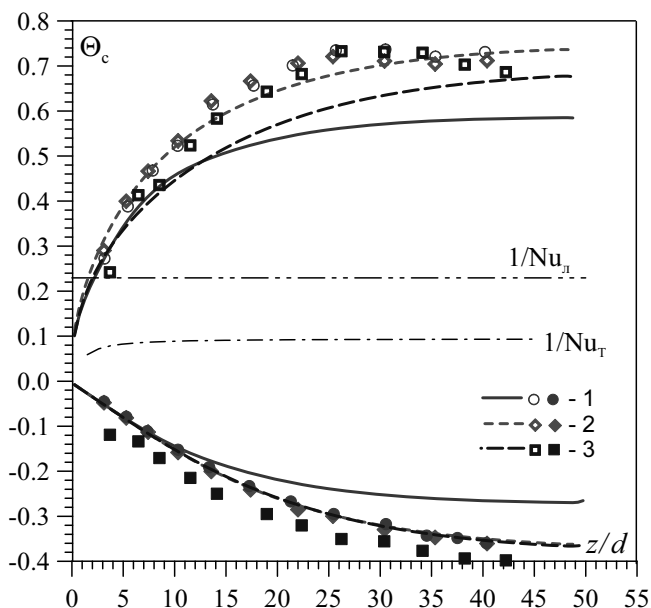


Рис. 20. Распределение безразмерной температуры стенки Θ_c на верхней образующей (светлые символы) и на нижней образующей (темные символы), $q_1/q_2 = 35/0$ кВт/м², $Re = 10000$, в поперечном МП: 1) $Na=0$, 2) 100, 3) 300, 4) 500. Линии – расчет.

Иная ситуация наблюдается в другом крайнем случае – обогрев «снизу», соответствующего неустойчивой стратификации плотности. В этом случае наблюдается наиболее значительное влияние ТГК на поля скорости и температуры (рис.21.): возникают интенсивные вторичные течения в виде двух симметричных вихрей. Эти течения интенсифицируют теплоотдачу. На графике на рис. 22. (а) хорошо видно, что значения среднего числа Нуссельта по длине трубы изменяются немонотонно – сначала опускаются ниже зависимости Лайона, потом несколько возрастают, выходя на постоянное значение около Nu_T (7). Вторичные течения в отсутствие МП ($Na=0$) перемешивают жидкость, поэтому неоднородность в распределении температуры стенки уменьшается (рис.22. б).

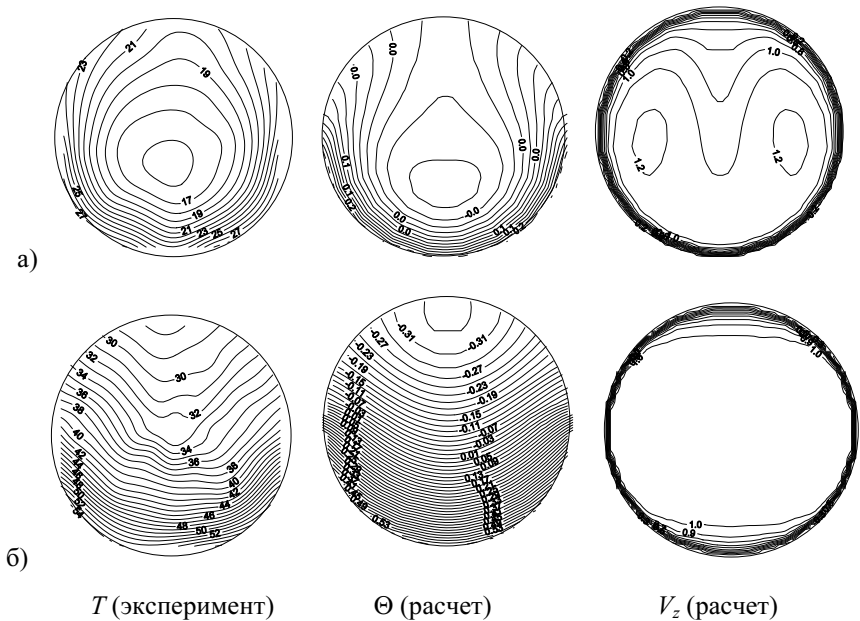


Рис. 21. Поля осредненной температуры T , Θ и продольной компоненты скорости V_z в сечении трубы $z/d=39$, $q_1/q_2 = 0/35$ кВт/м², $Re = 10000$, в поперечном МП: а) $Na=0$, б) 300.

В поперечном МП картина заметно меняется. МП подавляет турбулентность и тормозит ТГК, вследствие чего теплоотдача ухудшается: средние числа Нуссельта в общем уменьшаются, а неоднородность в распределении температуры стенки (локальных чисел Нуссельта) увеличивается. Заметно отклонение от общих закономерностей опытных данных при больших числах Гартмана ($Na=300$ и выше), что связано с эффектом, обнаруженным при измерении пульсаций температуры, о чем будет сказано ниже.

Распределение интенсивности пульсаций температуры в горизонтальной трубе в случае обогрева «сверху» (при устойчивой стратификации плотности) показано на рис. 23. На графике показана также эпюра горизонтальной (поперечной) составляющей индукции МП.

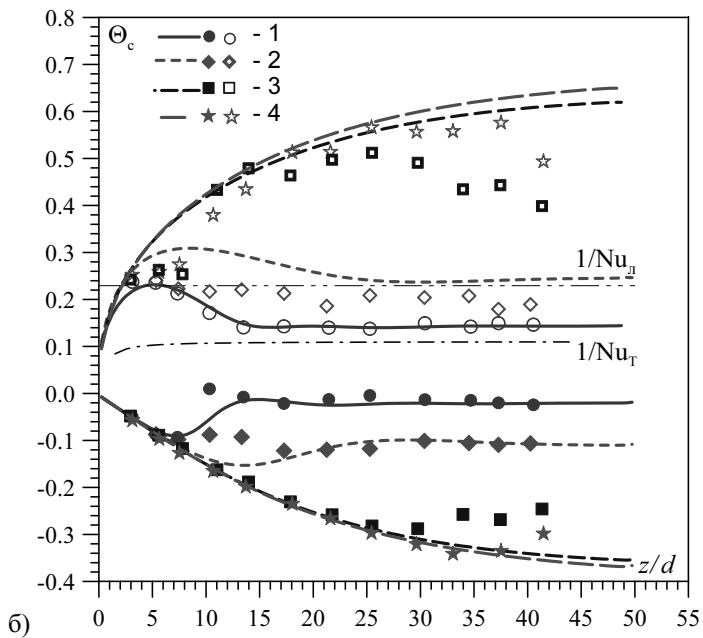
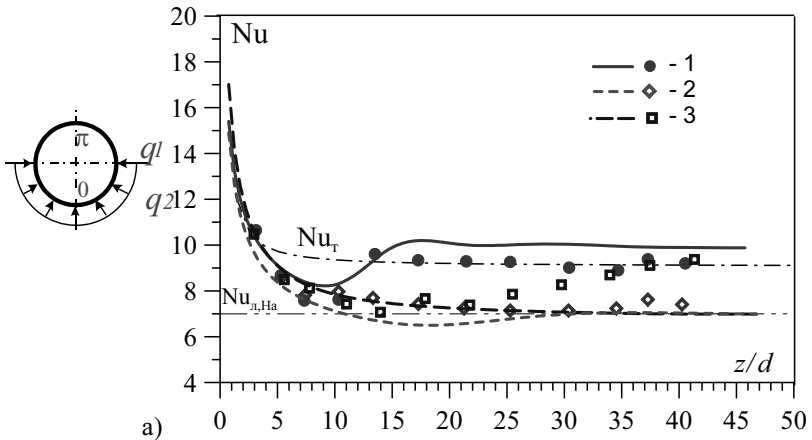


Рис. 22. Распределение среднего числа Нуссельта (а) и безразмерной температуры стенки Θ_c (б) на верхней (черные символы) и нижней (светлые символы) образующих по длине трубы $Re = 10000$, $q_1/q_2 = 35/0$ кВт/м², в поперечном МП: 1) $Ha=0$, 2) 100, 3) 300, 4) 500. Линии – расчет.

Осциллограммы пульсаций снимались в потоке в верхней части сечения возле обогреваемой стенки. В отсутствие поля интенсивность пульсаций растет, выходя на постоянный уровень. Поперечное МП подавляет турбулентность. Соответственно, интенсивность пульсации температуры снижается, при значении числа Гартмана $Na=100\div 300$ практически до нуля уже на первой половине участка обогрева $z/d=20$.

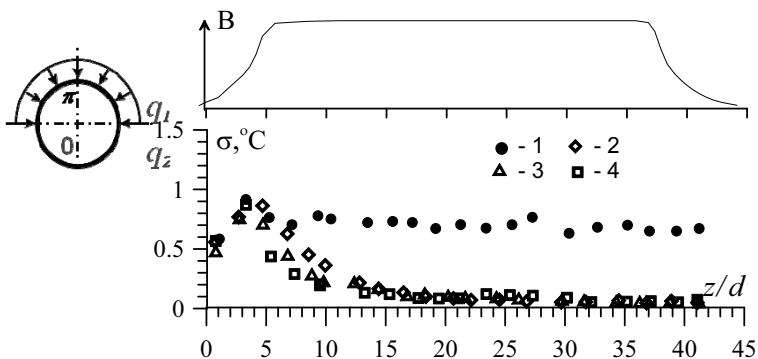


Рис. 23. Распределение интенсивности пульсаций температуры по длине трубы вблизи верхней образующей $R=0,7$, $\varphi=0$, $q_1/q_2 = 35/0$ кВт/м², $Re = 10000$, в поперечном МП: 1) $Na=0$, 2) 100, 3) 200, 4) 300.

Рассмотрим далее обогрев «снизу». Распределения интенсивности пульсаций температуры вблизи обогреваемой стенки по длине трубы показаны на рис. 24.

В отсутствие МП интенсивность пульсаций по длине участка обогрева сначала растет, потом снижается и выходит на постоянный уровень. Распределение интенсивности пульсаций показано на рис. 25 (а). Поперечное МП подавляет турбулентность, ламинирует течение, соответственно, интенсивность пульсации температуры должна снижаться. При значении числа Гартмана $Na=100$ так и происходит: пульсации температуры по длине участка обогрева постепенно снижаются почти до нулевого значения.

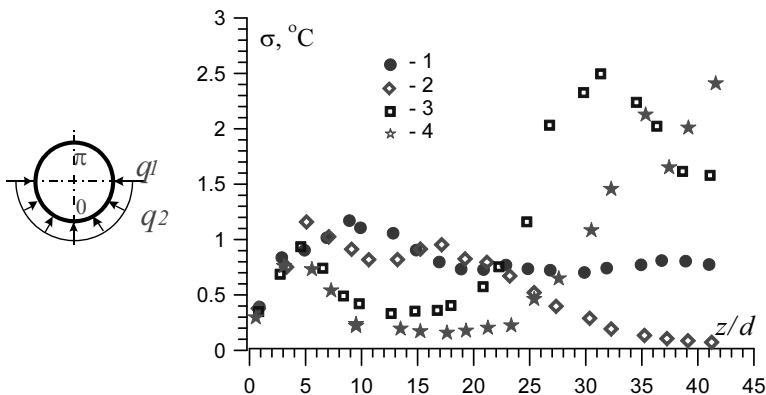


Рис.24. Распределение интенсивности пульсаций температуры по длине в нижней части трубы $R=0.75$, $\varphi=0$: $q_1/q_2 = 0/35$ кВт/м², $Re = 10000$, в поперечном МП: 1) $Ha=0$, 2) 100, 3) 320, 4) 500.

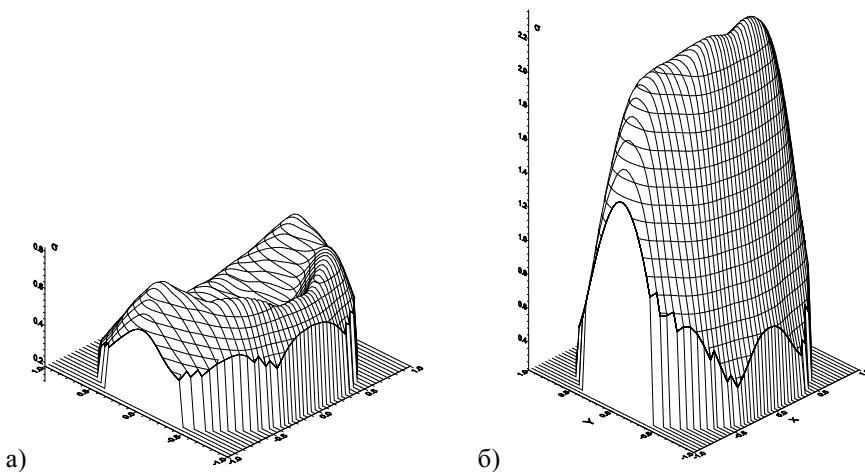


Рис. 25. Интенсивность температурных пульсаций в сечении трубы $z/d=37$, $Re = 6000$, обогрев снизу $q_1/q_2 = 0/30$ кВт/м²: а) $Ha=0$, б) 300/

.Иная ситуация наблюдается при больших значениях МП $Ha=300$ и выше. Пульсации температуры сначала снижаются, а на второй половине обогреваемого участка резко вырастают, достигая аномально высокой интенсивности, превышающей уровень без МП. Распределение

интенсивности пульсаций показано на рис. 25 (б). На рис. 26 показаны характерные осциллограммы пульсаций температуры и их спектры вблизи обогреваемой стороны трубы. Видно, что аномальные пульсации почти монохроматичны с характерной частотой ~ 2 Гц.

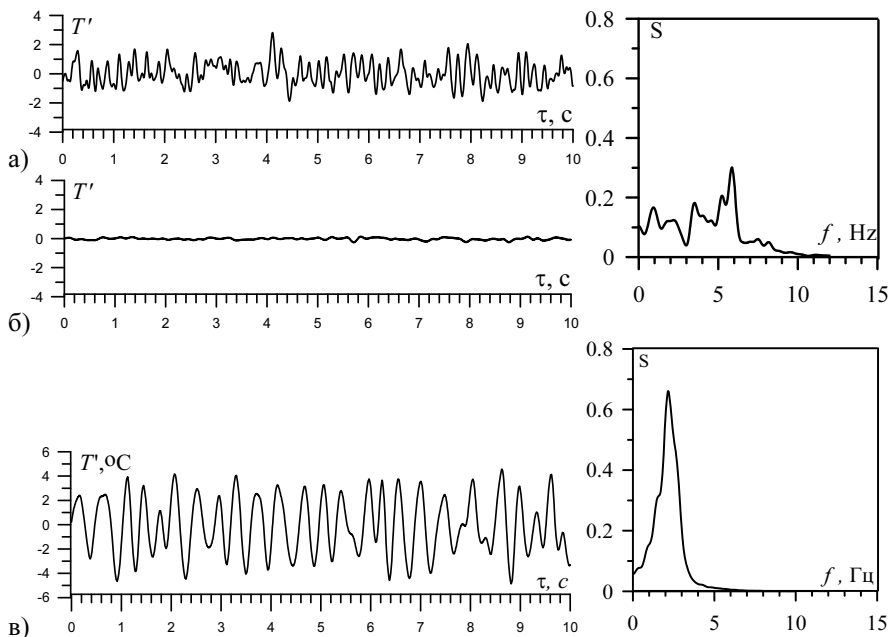


Рис.26. Осциллограммы пульсаций температуры и спектры на расстоянии $R=0,7$, в нижней части трубы, $\varphi=0$: а) $Na=0$, б) 100, в) 300; г) в боковой части трубы, $\varphi=\pi/2$: $Na=500$.

В отсутствие МП в горизонтальной трубе при обогреве снизу наблюдаются интенсивные вторичные вихри ТГК с осями, параллельными оси трубы. В поперечном МП эти вихри разворачиваются с ориентацией осей вдоль МП, превращаясь в структуры, которые захватывают все сечение и имеют характерный размер порядка диаметра трубы. Вынужденное течение, протаскивая эти вихревые структуры по длине трубы, вызывает наблюдаемые пульсации температуры.

Данные по температурным пульсациям необходимо учитывать при проектировании теплообменных каналов, так как низкочастотные пульсации легко проникают в стенку из потока и могут привести к ее усталостному разрушению.

Основные результаты и выводы

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Создан и успешно функционирует экспериментальный МГД-комплекс МЭИ-ИВТ РАН по исследованию гидродинамики и теплообмена при течении жидкого металла в трубе в МП. МГД-комплекс включает в себя два ртутных стенда, на стенде МЭИ реализуется течение в продольном, на стенде ИВТ РАН в поперечном МП. Стенды полностью автоматизированы.
2. Усовершенствованы зонды и методики измерений, позволяющие получать трехмерные поля температуры, распределения локальных коэффициентов теплоотдачи по поверхности трубы рабочего участка, характеристики пульсаций температуры (интенсивности, автокорреляционные функции и спектры). Усовершенствована методика корреляционных измерений скорости. Впервые внедрен электромагнитный датчик скорости с температурной компенсацией.
3. На МГД-комплексе МЭИ-ИВТ РАН впервые проведены комплексные экспериментальные исследования теплообмена в потоке жидкого металла в горизонтальной трубе в отсутствие и при наличии продольного или поперечного МП. Исследованы различные варианты обогрева: однородный при условии $q_c = \text{const}$, односторонние «сбоку», «сверху» и «снизу», двухсторонний несимметричный "слева-справа", "сверху-снизу". Детальные измерения полей температуры и скорости, распределений средних и локальных коэффициентов теплоотдачи, статистических характеристик турбулентных пульсаций температуры выполнены в диапазоне: чисел Рейнольдса $5000 \div 100000$, Чисел Грасгофа $Gr = 10^7 \div 1,5 \cdot 10^8$ кВт/м², по числам Гартмана $Na = 0 \div 500$. Соотношения определяющих параметров – Na/Re , Na^2/Re и Gr/Re^2 со значительной степенью приближения соответствовали

условиям, характерным для blankets типа токамак.

5. На основе осредненных дифференциальных уравнений движения сплошной среды разработана методика и выполнено численное моделирование гидродинамики и теплообмена при течении ЖМ в трубе в продольном и поперечном МП в условиях, соответствующих эксперименту. В численном расчете получены трехмерные поля давления, компонент скорости и плотности электрического тока, температуры, распределения средних и локальных коэффициентов теплоотдачи (чисел Нуссельта) по всей длине зоны обогрева.

6. В отсутствие МП результаты обнаруживают сильное влияние ТГК, которая имеет вид одного или двух вторичных вихрей с осями, параллельными оси трубы. Вторичные течения нарушают симметрию полей скорости и температуры в сечении трубы, интенсифицируют в среднем теплоотдачу, но приводят к неоднородности в распределении температуры стенки в сечении трубы. Средние по периметру трубы числа Нуссельта оказываются выше значений, соответствующих турбулентному теплообмену при отсутствии ТГК. Локальные значения чисел Нуссельта сильно отличаются от средних с наличием зоны ухудшенного теплообмена в верхней части трубы. Результат совместного действия МП и ТГК неоднозначен и зависит от направления МП и варианта обогрева.

7. Обнаружено, что эффекты ТГК в продольном МП не ослабевают, а, напротив, даже усиливаются. При этом средние числа Нуссельта несмотря на подавление турбулентного переноса, не снижаются, как ожидалось до ламинарных значений, а остаются на уровне турбулентных значений (за исключением обогрева «сверху»). Объясняется это вкладом в интенсификацию теплоотдачи вторичных течений ТГК, которые беспрепятственно развиваются в продольном МП и компенсирует фактор подавления турбулентного переноса МП. Этот вывод подтверждается непосредственными измерениями скорости вторичных течений и результатами численного расчета. Распределение температуры стенки по

периметру трубы остается сильно неоднородным.

8. В поперечном МП наблюдаются по крайней мере три эффекта: подавляется турбулентность (значительно сильнее чем в продольном МП); проявляется эффект Гартмана, который приводит к уплощению профилей скорости вдоль линий магнитной индукции; вторичные вихри ТГК сильно тормозятся и влияние их с ростом числа Гартмана исчезает. При этом неоднородность в распределении температуры стенки по периметру трубы уменьшается в случае однородного обогрева и растет в случаях неоднородного. При обогреве «снизу», вследствие подавления ТГК поперечным МП неоднородность в распределении температуры стенки значительно возрастает. Так что распределение температуры при обогреве «снизу» становится идентичным варианту обогрева только «сверху». Обогрев только «сверху» - самый неблагоприятный с точки зрения теплоотдачи вариант, когда в верхней части трубы значения температуры стенки оказываются значительно выше, а локальные числа Нуссельта ниже ламинарных значений.

Неоднородность в распределении температуры приводит к термическим напряжениям в стенке трубы, что требует учета в конструкторских проработках жидкометаллических теплообменников.

9. Выполненные впервые измерения статистических характеристик пульсаций температуры показали, что они также обнаруживают сильное влияние ТГК: распределение интенсивности в сечении трубы несимметрично с максимумом в верхней части трубы. Пульсации температуры подавляются магнитным полем - в поперечном МП сильнее, чем в продольном МП. Однако происходит это не всегда. При обогреве «снизу» в режимах с достаточно большими значениями Gr/Re^2 в поперечном МП впервые обнаружено появление низкочастотных пульсаций аномально высокой интенсивности. Эти пульсации почти монохроматичны и вызваны периодическими вихревыми структурами ТГК, которые устойчиво существуют в поперечном МП. Пульсации температуры в практических

теплообменных устройствах требуют особого внимания, поскольку представляют опасность для стенки, так как, проникая в нее, могут вызвать термические усталостные разрушения стенки.

10. Результаты численного моделирования осредненных характеристик гидродинамики и теплообмена, выполненные при течении ртути в горизонтальной трубе с однородным и неоднородным обогревом в продольном и поперечном МП, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными в исследуемом диапазоне режимных параметров. Они существенно дополняют опытные данные по температурным измерениям теми физическими величинами, которые в экспериментах автора не измерялись (давление, электроток).

Методика численного расчета может быть использована для моделирования МГД-теплообмена при течении жидкого металла в каналах охлаждения термоядерного реактора типа токамак.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях в журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК:

1. Свиридов В.Г., Разуванов Н.Г., Устинов А.В. О структуре вторичных течений в потоке жидкого металла в условиях реактора-токамака / Теплоэнергетика, № 12, 1996, с. 64-66.
2. Ковалев С.И., Разуванов Н.Г. Расчет течения жидкого металла в горизонтальной обогреваемой трубе в продольном магнитном поле / Теплоэнергетика, № 11, 1996, с. 65-67.
3. Генин Л.Г., Свиридов В.Г., Жилин В.Г., Ивочкин Ю.П., Разуванов Н.Г., Свиридов Е.В. Гидродинамика и теплообмен при течении электропроводных жидкостей в круглой трубе в поперечном магнитном поле / Теплоэнергетика, № 6, 2000, с. 61-65.
4. Свиридов В.Г., Разуванов Н.Г., Устинов А.В., Аверьянов К.В. Исследование теплоотдачи по длине горизонтальной трубы при течении жидкого металла в условиях сильной термогравитационной конвекции и продольного магнитного поля / Вестник МЭИ, 2002, №5, с. 32-36.

5. Генин Л.Г., Жилин В.Г., Иванова О.Н., Ивочкин Ю.П., Разуванов Н.Г., Свиридов В.Г. Исследование МГД-теплообмена при течении жидкого металла в поперечном магнитном поле применительно к термоядерному реактору / Теплоэнергетика, 2003, № 3, с. 37-41.
6. Свиридов В.Г., Разуванов Н.Г., Аверьянов К.В. Исследование развития теплообмена жидкого металла по длине горизонтальной трубы в продольном магнитном поле в условиях неоднородного обогрева / Вестник МЭИ, 2003, №4, с. 43-48.
7. Генин Л.Г., Листратов Я.И., Свиридов В.Г., Жилин В.Г., Ивочкин Ю.П., Свиридов Е.В., Разуванов Н.Г. Экспериментальные исследования гидродинамики и теплообмена жидких металлов в магнитных полях / Вопросы атомной науки и техники. Серия: термоядерный синтез, Выпуск 4, – М., 2003, с. 35-44.
8. Генин Л.Г., Жилин В.Г., Ивочкин Ю.П., Листратов Я.И., Разуванов Н.Г., Свиридов В.Г. Экспериментальное исследование развития теплообмена по длине трубы при течении жидкометаллического теплоносителя в поперечном магнитном поле / Теплоэнергетика, 2004, № 3, с. 17-29.
9. V. G. Sviridov, Yu. P. Ivochkin, N. G. Razuvanov, V.G. Zhilin, L.G.Genin, O. N. Ivanova, K. V. Averianov. Liquid Metal Heat Transfer Investigations Apllied to Fusion Tokamak Reactor Cooling ducts / Magnetohydrodynamics, Vol. 39, № 4, 2003, pp. 557 – 564. (В.Г. Свиридов, Ю.П. Ивочкин, Н.Г. Разуванов, В.Г.Жилин, Л.Г. Генин, О.Н. Иванова, К.В. Аверьянов. Исследования теплообмена жидкого металла в теплообменных каналах реактора токамака/ Магнитная гидродинамика)
10. L.G. Genin, V.G. Sviridov, O.N. Ivanova, V.G. Zhilin, Yu.P. Ivochkin, N.G. Razuvanov. Experimental Investigation of Heat Transfer in Horizontal Tube In Lodgitudinal and Transverse Magnetic Fields under the Conditions of Nonuniform Heating around the Perimeter / Heat Transfer Research, Vol. 35, Issue 1-2, 2004, pp.59-67. (Л.Г. Генин, В.Г. Свиридов, О.Н. Иванова, В.Г.Жилин, Ю.П. Ивочкин, Н.Г. Разуванов. Экспериментальные исследования теплообмена в горизонтальной трубе в продольном и поперечном магнитном поле в условиях неоднородној по периметру обогрева/ Исследования теплообмена)

11. L.G., Genin, YA.I. Listratov, N.G. Rasuvanov, S.A. Ryzhkova, V.G. Sviridov. Influence of Secondary Vortices of Thermogravitational Convection on the Liquid Metal Heat Exchange in a Horizontal Tube in a Magnetic Field/ Journal of heat Transfer Research, 2006, Vol. 37, № 8, pp. 691-706. (Л.Г. Генин, Я. И. Листратов, Н.Г. Разуванов, С.А. Рыжкова, В.Г. Свиридов. Влияние вторичных течений термогравитационной конвекции на теплообмен жидкого металла в горизонтальной трубе в магнитном поле/ Журнал теплообменных исследований)

12. L.G.Genin, V.G. Zhilin, Yu. P. Ivochkin Ya, I. Listratov, N. G. Razuvanov, R. A. Sarvin, V. G. Sviridov. Experimental Investigation of Heat Transfer along the Length of a Horizontal Tube during Liquid Metal Heat-Carrier Flow in a Transverse Magnetic Field / Heat Transfer Research, Vol. 37, issue 3, 2006, pp. 247 –258. (Л.Г. Генин, В.Г.Жилин, Ю.П. Ивочкин, Я. И. Листратов, Н.Г. Разуванов, Р. А. Сарвин, В.Г. Свиридов. Экспериментальные исследования теплоотдачи вдоль горизонтальной трубы при течении жидкометаллического теплоносителя в поперечном магнитном поле/ Исследования теплообмена)

13. Генин Л.Г., Дорофеев Д.И., Жилин В.Г., Ивочкин Ю.П., Листратов Я.И., Разуванов Н.Г., Свиридов В.Г. Экспериментальное исследование развития теплообмена по длине трубы при течении жидкометаллического теплоносителя в поперечном магнитном поле в условиях неоднородного обогрева / Теплоэнергетика, 2007, № 3, с.52-60.

14. 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.

Подписано в печать

Заказ №

Тираж 100

П. л. 2.5

Полиграфический центр МЭИ (ТУ)

Москва, Красноказарменная ул., д. 13