

На правах рукописи



Свиридов Евгений Валентинович

**Методы и результаты исследования
МГД-теплообмена жидкого металла в вертикальных
каналах применительно к созданию систем
охлаждения термоядерного реактора – ТОКАМАКа**

Специальность 01.04.14 —
«Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Москва — 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Официальные оппоненты: **Луцик Валерий Григорьевич**,
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт механики, ФГБОУ ВО Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова.

Сапожников Сергей Захарович,
доктор технических наук, профессор, Высшая школа атомной и тепловой энергетики, ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

Хвостенко Петр Павлович,
доктор технических наук, научный руководитель Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий, ФГБУ "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт".

Ведущая организация: Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»

Защита состоится 15 октября 2021 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета МЭИ.011 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14, корп.Т, Т-209.

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

Автореферат разослан « _____ » _____ 2021 г..

Ученый секретарь
диссертационного совета
МЭИ.011, к.т.н.



Ястребов Арсений Константинович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Среди перспективных энергетических установок особое место занимают термоядерные энергетические реакторы (ТЯР) с магнитным удержанием плазмы — типа «ТОКАМАК». Гидродинамика и теплообмен в blankets токамаков весьма сложны и специфичны, они не имеют близких аналогов в других областях. При исследовании этих процессов приоритетная роль — по сравнению с теоретическим описанием и численным моделированием — принадлежит эксперименту.

Современный этап в освоении энергии термоядерного синтеза породил интерес к жидкометаллическим теплоносителям. Говоря о роли жидких металлов (ЖМ) в термоядерной технике подразумевают, прежде всего, их использование в качестве теплоносителя в токамаке. В 2009г. международное научное сообщество приступило к реализации проекта на юге Франции термоядерного реактора ИТЭР; доля России в общем объёме работ составляет 10%. ИТЭР — реактор экспериментальный, создаваемый на базе сегодняшних (точнее вчерашних) апробированных технологий. ИТЭР должен продемонстрировать возможность термоядерного зажигания и стационарного горения, а не горения с производством электроэнергии.

Производство энергии — задача следующего, уже демонстрационного реактора (проект DEMO), контуры которого пока плохо различимы. Их определит реализация проекта ИТЭР, первого реактора с квазистационарным (длительностью 400–1000 с) термоядерным горением дейтерий–тритиевой смеси. В ходе эксплуатации будут отработаны системы охлаждения blanketа и дивертора — наиболее энергонапряженного устройства ТЯР. При подготовке проекта рассматривались различные схемы охлаждения, в том числе с использованием ЖМ, но окончательно принята схема водяного охлаждения. Это не значит, что в ИТЭР отказались от использования ЖМ–теплоносителя. При эксплуатации предполагается опробовать в blanketе отдельные модули, в которых в качестве теплоносителя и для производства трития (из лития) будет использоваться ЖМ. Такие модули уже проектируются. Главное преимущество ЖМ перед водой, помимо высокой теплопроводности, высокая температура кипения и низкое давление паров. Это особенно актуально для токамака, где требуется чистый вакуум в плазменной камере.

Конструкции ЖМ–модулей blanketа и дивертора активно разрабатываются странами–участниками программы ИТЭР. Традиционно в качестве основного теплоносителя рассматривается литий, поскольку он обладает подходящими теплофизическими свойствами, удовлетворяет критериям экономичности, а также является сырьём для наработки трития. Однако существенным недостатком лития является его взрывоопасность при контакте с водой и воздухом, а это усложняет систему теплоотвода.

Тем не менее, преимущества ЖМ были столь очевидны разработчикам токамаков, что большинство первых проектов реакторов, относящихся к 50–м и 60–м годам XX века, предусматривали именно

ЖМ–охлаждение. Основным препятствием на пути его для охлаждения blankets и дивертора является то, что гидравлические потери при прокачке ЖМ в магнитном поле токамака могут быть весьма велики. Однако рациональным выбором формы сечения теплообменных каналов, их разумным расположением в магнитном поле и обеспечением электроизоляции стенок от ЖМ можно снизить гидравлические потери до приемлемого уровня. Поэтому с начала 80–х годов концепция ЖМ–теплоносителя вновь получила широкое признание (например, в хорошо известном проекте Исследовательского центра Карлсруэ, Германия).

Развитие термоядерного направления включает также разработки ТЯР гибридного типа, или термоядерных источников (ТИН), в основном предназначенных для наработки искусственного ядерного горючего (плутония и/или урана–233 из урана–238 и тория), с последующим использованием на традиционных АЭС, снижения активности минорных актинидов в отработанных ТВЭЛах (реакторы–выжигатели). По сути ТИН — термоядерный реактор, в blankets которого находится активная зона ядерного реактора на быстрых нейтронах. В первом контуре реакторов на быстрых нейтронах ЖМ выгоднее, поскольку вода замедляет нейтроны. Альтернативой ЖМ в ТИН могут быть также расплавы солей (флайбы), — мало электропроводные среды.

Воздействия магнитного поля (МП) на течение и теплообмен электропроводной жидкости зависят от ряда факторов, среди которых: значения и взаимная ориентация векторов скорости потока и индукции магнитного поля, форма и размеры канала, режимы течения жидкости, относительная электропроводность стенки, высота и форма элементов шероховатости, условия на входе потока в МП и на выходе из него, неизотермичность течения.

В токамаках теплоноситель движется в сильных МП. Особенность теплообмена в ТЯР — высокое тепловыделение, которое необходимо снимать и в «чистом» ТЯР, и в ТИНе. Неизотермичность потока ЖМ вызывает к интенсивные вторичные течения, связанные с термогравитационной конвекцией (ТГК). МП меняет структуру течения, подавляя турбулентный перенос, что ухудшает теплообмен. МП неоднозначно действует на вторичные вихревые течения ТГК, тормозя или усиливая их. Развитие ТГК приводит к неоднородности поля температуры в МГД потоке и на стенках канала, появлению зон ухудшенного теплообмена, где температуры могут превышать предельно допустимые, и, наконец, к низкочастотным пульсациям температуры аномально высокой интенсивности, способным вызвать разрушения стенки, ввиду термической усталости.

Для создания энергетических ТЯР необходимо исследовать различные конфигурации МГД–течений, масштабно и детально изучив гидродинамику и теплообмен в условиях эксперимента, максимально приближенных к реальным, когда ЖМ–теплоноситель подвергается одновременному воздействию МП и ТГК.

Большинство исследователей МГД–теплообмена в своих экспериментах стремились минимизировать вклад вторичных течений ТГК. Однако оказалось, что в горизонтальных каналах при неизотермических

течении ЖМ отстроиться от ТГК даже при небольших нагревах не удаётся.

В вертикальных трубах, как полагали ранее, влиянием ТГК можно пренебречь. Однако исследования МГД–теплообмена при опускном течении ртути в вертикальных трубах в продольном МП показали, что при высокой плотности тепловых потоков влияние ТГК может стать существенным.

В последнее время в научно–образовательном центре МЭИ–ОИВТ РАН удалось получить экспериментальные данные на крупномасштабных модельных установках, адаптированных к исследованию закономерностей МГД–теплообмена зондовыми методами.

Наши эксперименты вначале проводились на ртутных стендах Московского энергетического института (НИУ «МЭИ») и Объединенного Института высоких температур РАН (ОИВТ РАН), а затем на уникальной научной установке (УНУ) «Ртутный МГД–стенд», позволяющей проводить эксперименты в широком диапазоне режимных параметров, значений индукции МП, для разных конфигураций МГД–течений. Все рассмотренные конфигурации применимы к различным участкам каналов охлаждения бланкета и дивертора ТЯР. Несмотря на то, что условия эксперимента не вполне соответствуют возможным в ТЯР и по значениям магнитной индукции, и по плотности теплового потока, представление результатов в безразмерном виде позволяет моделировать реальные условия. Возможна также некоторая экстраполяция полученных соотношений за пределы исследуемого диапазона.

Однако реальные ЖМ теплообменники часто имеют системы каналов некруглого сечения, в них действуют неоднородные МП, неоднородное распределение тепловой нагрузки. Проектирование теплообменников ТЯР осуществляют численным моделированием: на основе дифференциальных уравнений механики сплошной среды создаётся модель течения, а затем расчётная конечно–разностная модель. Основой численного моделирования являются надёжные экспериментальные данные. Расчётная модель, в свою очередь, тестируется, проверяется сопоставлением с данными эксперимента. В последнее время хорошие результаты для ряда конфигураций течения позволяет получить прямое численное моделирование гидродинамики и теплообмена методом DNS . Прямое численное моделирование проводится, как правило, для каналов с достаточно простой геометрией. Подавляющее число практически важных конфигураций моделируется программными кодами с применением тех или иных моделей турбулентного переноса.

Настоящая работа посвящена исследованию теплообмена при течении ЖМ в вертикальной трубе в поперечном МП, а также в прямоугольном канале с соотношением сторон 1:3, находящемся в компланарном МП. Исследовалась также подавление пульсаций температуры в МП под влиянием ТГК при течении ртути в указанных конфигурациях. На основе достаточно обширных экспериментов, предложены модели для численного расчёта гидродинамики и теплообмена. Модели апробированы путём сопоставления с экспериментальными данными.

Наряду с получением опытных данных, пригодных для валидации CFD кодов, важным направлением исследований явилась разработка простых алгебраических моделей для инженерных расчётов.

Для получения надёжных опытных данных на УНУ «Ртутный МГД-стенд» разработана и реализованна на стенде автоматизированная система научных исследований (АСНИ), выполненная на принципах системной интеграции. Это позволило, помимо решения основной задачи, построить тиражируемые АСНИ для внедрения в научные исследования и учебный процесс университета, а также для решения ряда научно-практических задач.

Целью данной работы является:

- Модернизация и развитие территориально-распределенного экспериментального комплекса МЭИ–ОИВТ РАН в составе трёх ртутных МГД-стендов для исследований теплообмена ЖМ и других перспективных теплоносителей.
- Развитие автоматизированных исследований гидродинамики и теплообмена перспективных теплоносителей на экспериментальном ртутном комплексе путем модернизации имеющихся и разработки новых датчиков и измерительных зондов, разработки алгоритмов и программ измерений и анализа их результатов.
- Проведение комплексного экспериментального исследования МГД-теплообмена ЖМ при течении в вертикальных круглых трубах в поперечном МП, а также в прямоугольных каналах в компланарном МП при соотношениях режимных параметров, приближенных к реальным. Создание базы экспериментальных данных для моделирования процессов МГД-теплообмена при помощи CFD-кодов.
- Разработка универсальной модели, объясняющей влияние поперечного МП на турбулентный перенос импульса и энергии, применимой для инженерных расчётов характеристик гидродинамики и теплообмена в круглом и прямоугольном канале в поперечном и компланарном МП. Численное моделирование гидродинамики и теплообмена ЖМ в рассматриваемых МГД-конфигурациях течения и сопоставление результатов расчёта с экспериментом.
- Разработка функционального ряда типовых тиражируемых систем автоматизации теплофизического эксперимента, испытаний и диагностики энергообъектов, построенных на базе информационно-измерительных технологий нового поколения. Внедрение разработок в университетах, институтах РАН и на предприятиях энергетики, транспорта, аэрокосмической и оборонной отрасли.
- Внедрение результатов исследований в учебный процесс студентов специальности «Теплофизика» и в систему повышения квалификации специалистов.

Научная новизна: Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Экспериментально установлено, что влияние термоэлектрического эффекта на сигнал кондукционного анемометра в неизотермических потоках жидкого металла весьма существенно, паразитная термо-ЭДС даёт вклад в измеряемый сигнал, превышающий собственный

полезный сигнал анемометра. Разработана методика экспериментального определения локальных скоростей комбинированным кондукционным анемометром в неизотермических потоках жидкого металла $w = (U - U_{\text{погр}})/(l \cdot B)$, предложены конструкция датчиков, зависимости для величин поправок. На основе экспериментальных данных получены зависимости полей скорости вторичных свободноконвективных течений ртути в магнитных полях.

2. Установлено, что при МГД-течении жидкого металла в вертикальной круглой трубе с различными конфигурациями обогрева (односторонний, однородный, комбинированный) в поперечном магнитном поле в диапазоне режимных параметров: $Re = (5 - 100) \cdot 10^3$; $Ha = 0 - 500$; $Gr = (0 - 1,3) \cdot 10^8$, $Pe = 120 - 2500$ реализуются режимы, в которых при увеличении индукции магнитного поля развиваются пульсации температуры аномально высокой интенсивности σ_{Ha} ($\sigma_{Ha}/\sigma_{Ha=0} \approx 5$), сопоставимые с величиной температурного напора ($T_{вх} - T_{вых}$), проявляющиеся как во всей области течения, так и в стенках канала. Получены зависимости для значений среднего и локального коэффициентов теплоотдачи (Nu), безразмерной температуры стенки. Экспериментально установлено, что локальные коэффициенты теплоотдачи при турбулентном течении ртути в вертикальной трубе в поперечном магнитном поле существенно неоднородны по периметру и могут принимать значения ниже, чем при ламинарном режиме течения ($Nu_l = 4,36$), как при однородном, так и при неоднородном обогреве трубы. При этом в режимах с незначительным влиянием свободной конвекции характер подавления турбулентности поперечным магнитным полем слабо зависит от координаты и определяется режимными параметрами $\gamma = \gamma(Re, Ha)$. Установлено, что измерительный зонд не оказывает существенного влияния на гидродинамику и теплообмен в условиях экспериментов.
3. Выявлено, что при опускном течении в круглой трубе при значениях ($Gr/Re^2 > 0,2$) наложение даже слабого МП ($Ha^2/Re \geq 1$) приводит к развитию вторичных свободноконвективных течений. При $Gr/Re^2 < 0,1$ термогравитационная конвекция практически не влияет на течение во всём диапазоне режимных параметров ($Ha^2/Re \leq 5$). На основе обобщения экспериментальных данных определены границы режимных параметров для существенного и несущественного влияния свободной конвекции.
4. В лабораторных экспериментах впервые выявлены особенности теплообмена при течении ртути в вертикальном прямоугольном канале в компланарном магнитном поле (линии индукции магнитного поля ориентированы вдоль длинной стороны канала) в диапазоне режимных параметров: $Re = (10 - 55) \cdot 10^3$, $Ha = (0 - 800)$, $Gr_q = (0 - 7) \cdot 10^8$, $Pe = (50 - 1400)$. Получены зависимости для значений среднего и локального коэффициентов теплоотдачи (Nu), безразмерной температуры стенки ($\Theta = (T - T_{ж})/(q_c \cdot d/\lambda)$), полей интенсивности температурных пульсаций, в том числе и для режимов с незначительным влиянием свободной конвекции. Показано, что в этих режимах, как при опускном, так и при подъёмном течении ртути с обогревом, характер

подавления турбулентности компланарным магнитным полем слабо зависит от координаты и определяется режимными параметрами Re и Ha ($\gamma = \gamma(Re, Ha)$). Установлено, что в компланарном магнитном поле также реализуются режимы, в которых при числах Ha , превышающих $Ha_{\text{лам}}$, в потоке развиваются вторичные свободноконвективные течения, что приводит к возрастанию низкочастотных пульсаций температуры аномально высокой амплитуды ($\sigma_{Ha}/\sigma_{Ha=0} \approx 6$).

5. На основе анализа экспериментальных данных впервые предложены зависимости для коэффициентов турбулентного переноса импульса и тепла в поперечном (плоский канал и круглая труба) и компланарном (прямоугольный канал) магнитном поле: $(\varepsilon_T/\nu)_{Ha} = \gamma(Re, Ha) \cdot (\varepsilon_T/\nu)_0$, где $\gamma = \gamma(Re, Ha)$ - коэффициент подавления турбулентного переноса магнитным полем. Выявлена аналогия между степенью подавления турбулентного переноса поперечным магнитным полем в круглой трубе и компланарным магнитным полем в прямоугольном канале.

Практическая значимость

1. Полученные опытные данные о полях температуры, интенсивностях температурных пульсаций, их спектральном составе, данные по коэффициентам теплоотдачи используются, например, в ОИВТ РАН, НИЦ «Курчатовский институт», UNIVERSITY OF MICHIGAN-DEARBORN при проектировании жидкометаллических теплообменных систем, при разработке расчётных кодов численного моделирования для валидации и верификации результатов расчётов.
2. Разработаны программные коды численного моделирования МГД-течений с использованием зависимостей для коэффициентов подавления турбулентного переноса магнитным полем. Результаты расчётов по этим моделям согласуются с экспериментальными результатами и результатами прямого численного моделирования соответствующих режимов (например Technische Universität Ilmenau, UNIVERSITY OF MICHIGAN-DEARBORN).
3. Методики, датчики, измерительные зонды применяются при исследовании теплообмена и структуры полей скорости и температуры в турбулентных потоках ЖМ при высоких тепловых нагрузках и под действием магнитных полей.
4. Авторские методики реализованы в рамках развития экспериментального комплекса «Ртутный МГД-стенд», входящего в реестр уникальных экспериментальных научных установок Российской Федерации, что позволило впервые получить экспериментальные данные по полям скоростей вторичных течений при МГД-течении ртути в каналах.
5. На основе разработанных экспериментальных методик и расчётных зависимостей для определения полей температур и скоростей, с использованием оригинальных многодатчиковых измерительных зондов для резервуаров большого объёма, получены и обобщены опытные данные по полям осредненных температур, пульсаций температур и скоростей применительно к контурам циркуляции ЯЭУ различного типа. (Патенты RU 91179 U1, RU 188420 U1, RU 196379 U1).

6. Впервые разработан и введён в действие отраслевой стандарт ОСТ 9.2-98, в который вошли авторские методики, алгоритмы и программы создания систем автоматизированного теплофизического эксперимента с удалённым компьютерным доступом (АЛП УД).
7. Автором разработаны программные драйверы для широкого ряда аппаратных средств и приборов АСНИ (вольтметры, мультиметры, мультиплексоры, частотомеры, осциллографы, измерители давления, регуляторы расхода, двигатели и системы приводов и пр.), которые широко используются при создании системного и прикладного ПО АСНИ в России и за рубежом.
8. Разработанный автором учебный курс «Новые информационно-измерительные системы и технологии» включён в учебный план НИУ «МЭИ» и читается автором. Слушателями курса являются студенты, преподаватели, научные сотрудники различных НИИ, КБ, коммерческих предприятий.
9. Авторские разработки в области создания систем автоматизации теплофизических измерений и диагностики широко применяются как в учебных, так и научно-исследовательских и конструкторских организациях. Несколько десятков различных систем разработаны лично автором или под его руководством, внедрены и используются в НИУ «МЭИ» и других университетах (МАИ, МГТУ и др.), на предприятиях энергетики, транспорта, оборонного и аэрокосмического комплексов, НИИ и КБ, в том числе: ГНЦ ФГУП «ЦИАМ имени П.И. Баранова», ГНЦ ФГУП «ЦАГИ имени профессора Н.Е. Жуковского», АО «НПО Энергомаш», ПАО «Протон-ПМ», ПАО «ОДК-Сатурн», ЗАО «Белкомрус», Черноморское морское пароходство, АО «Аэро-электромаш», Научно-исследовательский технологический институт им. А. П. Александрова (НИТИ), АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» и др.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованные методы экспериментального исследования КТО, полей температуры и скорости, турбулентных пульсаций температуры и скорости в ЖМ в части развития экспериментальных МГД-стендов, аппаратных и программных средств автоматизации экспериментов, датчиков и измерительных зондов;
2. Результаты экспериментального исследования полей температуры, интенсивности температурных пульсаций и КТО при течении ЖМ в вертикальной круглой трубе в поперечном МП в условиях однородного и неоднородного обогрева, а также в вертикальном прямоугольном канале в компланарном МП в условиях однородного обогрева;
3. Расчетно-теоретическая модель турбулентного переноса при течении электропроводной жидкости в поперечном МП, позволяющая отделить подавление турбулентности МП от влияния эффекта Гартмана и ТКК на коэффициенты сопротивления и КТО;
4. Результаты расчётов коэффициентов гидравлического сопротивления и КТО при течении ЖМ в вертикальной трубе в поперечном МП в условиях однородного и неоднородного обогрева, а также в вертикальном прямоугольном канале в компланарном МП при однородном обогреве;

5. Разработанные рекомендации по расчёту характеристик гидродинамики и теплообмена ЖМ в указанных конфигурациях МГД-течения;
6. Результаты разработок научно обоснованных методик, алгоритмов и программ для создания тиражируемых систем автоматизации теплофизических измерений, лабораторных испытаний и технической диагностики различных объектов на базе информационно-измерительных технологий нового поколения;
7. Разработки учебных программ и новых учебных курсов для студентов специальности «Теплофизика» и слушателей системы повышения квалификации специалистов «Новые информационно-измерительные технологии в теплофизическом эксперименте»

Достоверность полученных результатов обеспечивается методами проведения экспериментов и численного моделирования. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Материалы диссертации представлены на Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2002, 2006, 2010, 2014, 2018); на Минском международном форуме по тепломассообмену ММФ (1996, 2000, 2008, 2012); на международной конференции по МГД RAMIR (Франция, 2000, 2011, Латвия, 2014); на Российской конференции по магнитной гидродинамике РМГД (Пермь, 2012, 2015, 2018); на научно-технической конференции «Теплофизика» (Обнинск, 2009, 2015, 2018); на международной конференции по теплообмену ИНТС 14 (Вашингтон, США, 2014); на школе-семинаре академика А. И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических установках» (2011, 2017); на Пятой международной конференции «Исследования, разработки и применение высоких технологий в промышленности» (С.-Петербург, 2008); на научно-технической конференции «Проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии» (Москва, 2009); на национальной конференции «Повышение эффективности, надёжности и безопасности работы оборудования ТЭС и АЭС» (Москва, МЭИ, 2012); на международной конференции «Информатизация инженерного образования — ИРФОРИНО» (Москва, 2012, 2014); на отраслевом семинаре «Автоматизация процессов измерения и управления при стендовых испытаниях ЖРД» (КБ Химмаш, 2005); на 6-ой международной конференции по дистанционному образованию, (Москва, 1998); на международной конференции «Передовые технологии на пороге XXI века» (Москва, 1998); на международной конференции по технике измерений в жидких металлах MLTM (ФРГ, Дрезден-Россендорф, 1999); на международной конференции «Информационные средства и технологии» (Москва, 2002); на международной конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments» (Москва, 2003); на Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2017); на Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2018); на Форуме «Армия-2017» (Жуковский, 2017); на Международном авиационно-космическом салоне МАКС-2017 (Жуковский, 2017).

Личный вклад. Личный вклад автора заключается в:

1. создании и модернизации экспериментальных контуров, зондов, датчиков;
2. создании методик построения АСНИ;
3. комплектации, программировании системного и пользовательского уровней АСНИ;
4. проведении экспериментальных исследований, анализе и обобщении данных;
5. разработке модели учёта влияния магнитного поля на турбулентный перенос;
6. проведении численного моделирования, создании новых и использовании существующих расчётных кодов;
7. разработке и введении в учебный процесс учебного курса;
8. проведении подготовки и переподготовки студентов и научных сотрудников.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 42 печатных изданиях, 15 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 19 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 4 — в тезисах докладов. Зарегистрированы 3 патента.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность темы.

В **Первой главе** приводится математическое описание течения электропроводной жидкости в МП. Рассмотрено современное состояние исследований гидродинамики и теплообмена; в частности, пульсаций температуры и скорости при турбулентном течении ЖМ в МП и без него.

Во **Второй главе** предложена расчётная модель учёта влияния поперечного МП на турбулентный перенос в плоском канале. Рассмотрены граничные условия как для двустороннего, так и для одностороннего обогрева канала. Установлены общие закономерности воздействия поперечного МП на течение и теплообмен ЖМ в трубе и в прямоугольном канале.

При построении модели используются имеющиеся экспериментальные данные о гидравлическом сопротивлении при МГД-течениях в поперечном МП. Применимо к поперечному МП основная идея состоит в разделении эффектов Гартмана и подавления турбулентности МП. В области больших значений Ha/Re зависимость коэффициента сопротивления от Ha/Re для ламинаризованного турбулентного течения практически совпадает с зависимостью для ламинарного течения.

Зависимость величины

$$\xi_1 = \xi_\infty - \xi_{Ha} + \xi_\tau, \quad (1)$$

представляющей собой коэффициент сопротивления без учёта эффекта Гартмана, от чисел Рейнольдса Re и Гартмана Ha показана на рис. 1.

При фиксированном числе Рейнольдса с увеличением числа Гартмана коэффициент сопротивления ξ_τ уменьшается от значения ξ_τ ,

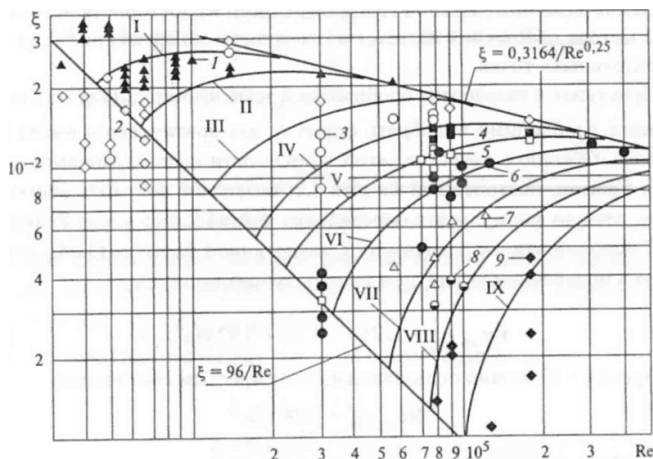


Рис. 1 — Зависимость «турбулентной» составляющей коэффициента гидравлического сопротивления от чисел Re и Na . 1 — $2,9 < Na < 4$; 2 — $4 < Na < 7$; 3 — $7 < Na \leq 13$; 4 — $13 < Na < 17$; 5 — $17 < Na < 25$; 6 — $25 < Na < 40$; 7 — $40 < Na < 60$; 8 — $60 < Na < 80$; 9 — $80 < Na < 130$; I — IX — $Na = 3; 5; 10; 15; 20; 30; 50; 70; 100$

соответствующего турбулентному течению без МП и определяемого формулой Блазиуса, до значения, соответствующего чисто ламинарному течению с параболическим профилем скорости ξ_L . Иными словами, имея достаточно сильные МП, можно полностью ламинаризовать любое турбулентное течение. И наоборот, при постоянном числе Гартмана Na с увеличением числа Рейнольдса Re влияние МП ослабевает, коэффициент сопротивления ξ_L увеличивается, стремясь к ξ_T — величине, соответствующей турбулентному течению без МП.

График, построенный на рис. 1 позволяет получить зависимость для критического числа Рейнольдса $Re_{кр, Na} = 1125 \left(1 + \sqrt{1 + 0,92Na^2}\right)$.

Обобщение результатов по гидравлическому сопротивлению выполнено в виде зависимости приведённого коэффициента сопротивления $\tilde{\xi} = (\xi_1 - \xi_L) / (\xi_T - \xi_L)$ от чисел Гартмана Na и Рейнольдса Re . В результате в диапазоне чисел $Re = (4 - 500) \cdot 10^3$ получена зависимость

$$\begin{cases} \tilde{\xi} = 1 - \exp\left(-k\left(\frac{Re - Re_{кр, Na}}{Re_{кр, Na}}\right)^n\right) & \text{для } Re > Re_{кр, Na}; \\ \tilde{\xi} = 0 & \text{для } Re \leq Re_{кр, Na}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} k &= 3,25/Na^{0,7} & n &= 0,8 & \text{для } 3 \leq Na \leq 20 \\ k &= 0,4 & n &= 0,8 & \text{для } 20 < Na \leq 100 \end{aligned}$$

Полный коэффициент сопротивления $\xi_p = \xi_{Na} + \xi_1 - \xi_L$ учитывает как эффект подавления турбулентности, так и эффект Гартмана.

В уравнениях движения и энергии влияние поперечного МП на турбулентный перенос учитывается введением коэффициента подавления турбулентности γ :

$$(\varepsilon_\tau/\nu)_{\text{Ha}} = \gamma(\text{Re}, \text{Ha}) \cdot (\varepsilon_\tau/\nu)_0 \quad (3)$$

Для коэффициента подавления турбулентного переноса поперечным МП получена следующая зависимость:

$$\gamma = 1 - \exp \left[-k \left(\frac{\text{Re} - \text{Re}_{\text{кр, Ha}}}{\text{Re}_{\text{кр, Ha}}} \right)^{0,8} \right] \quad \text{при } \text{Re} \geq \text{Re}_{\text{кр, Ha}};$$

$$\gamma = 0 \quad \text{при } \text{Re} \leq \text{Re}_{\text{кр, Ha}}; \quad (4)$$

где $k = 3,75/\text{Ha}^{0,7}$ при $3 \leq \text{Ha} \leq 20$;
 $k = 0,46$ при $20 \leq \text{Ha} \leq 100$;

Проведены расчеты профилей температуры и коэффициентов теплоотдачи для чисел Прандтля Pr , равных 0,001; 0,005; 0,01 и 0,02 в интервале чисел Рейнольдса $\text{Re}=5000-500000$ и чисел Гартмана $\text{Ha}=0-100$.

Результаты расчётов теплообмена в отсутствие МП, ($\text{Ha} = 0$), как и для круглых труб, для всех чисел Прандтля Pr удаётся обобщить зависимостями:

$$\text{Однородный обогрев канала} : \text{Nu}_0 = 10 + 0,025 \cdot \text{Re}^{0,8}$$

$$\text{Односторонний обогрев канала} : \text{Nu}_0 = 5,35 + 0,017\text{Re}^{0,8}$$

Все расчётные данные по теплообмену в поперечном МП в указанных выше диапазонах изменения определяющих параметров хорошо обобщаются (с отклонением не более 2 – 3%) следующей зависимостью

$$\widetilde{\text{Nu}} = 1 - \exp \left[-0,25\text{Ha}^{0,25} \left(\frac{\text{Re} - \text{Re}_{\text{кр}}}{\text{Re}_{\text{кр}}} \right)^{0,8} \right], \text{ где } \widetilde{\text{Nu}} = \frac{\text{Nu} - \text{Nu}_\text{л}}{\text{Nu}_0 - \text{Nu}_\text{л}}. \quad (5)$$

Третья глава содержит описание экспериментального «Ртутного МГД-стенда». Описаны конструкции датчиков и измерительных зондов, методика эксперимента при исследовании течений ЖМ в круглой трубе и прямоугольном канале в поперечном и компланарном МП, а также оценка неопределенности основных характеристик.

В состав стенда входят три экспериментальных ртутных контура.

1. Экспериментальный контур РК-1, предназначенный для исследования процессов МГД-теплообмена и гидродинамики в *продольном МП*.
2. Экспериментальный ртутный контур ОИВТ РАН (РК-2), предназначенный для исследований в *поперечном МП*, который для наших задач был переоборудован, модернизирован, оснащён новыми зондами, датчиками и экспериментальными рабочими участками. Большинство экспериментальных исследований, результаты которых вошли в диссертацию, выполнены на РК-2.
3. Экспериментальный контур РК-3, предназначенный для исследований в *поперечном МП*. РК-3 создан "с нуля" при активном

участии автора, использовался на последних этапах диссертационного исследования, когда изучались характеристики МГД-теплообмена при повышенных значениях индукции МП и других режимных параметров.

Все три контура входят в объединённый экспериментальный комплекс МЭИ–ОИВТ РАН под официальным названием «Уникальная научная установка (УНУ) Ртутный МГД–стенд». УНУ «Ртутный МГД–стенд» был включён в перечень уникальных научных установок Современной исследовательской инфраструктуры Российской Федерации.

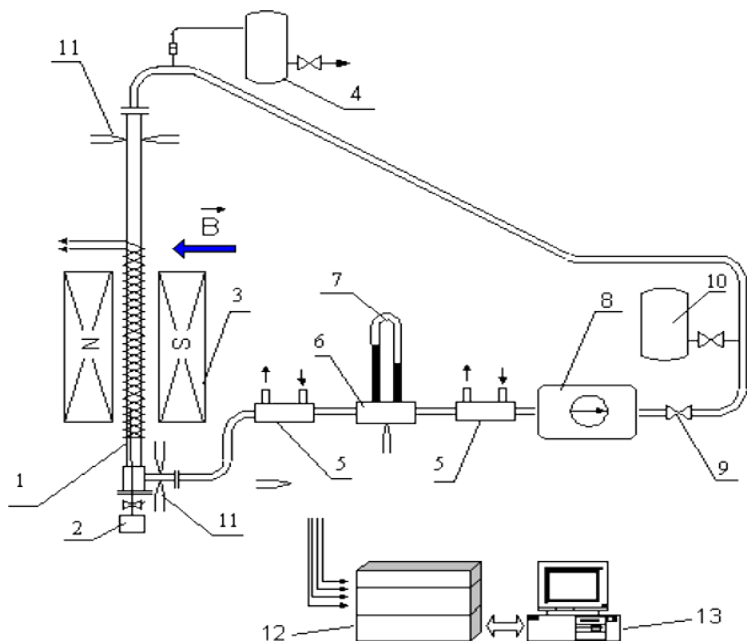


Рис. 2 — Схема экспериментального стенда РК-2 для исследования гидродинамики и теплообмена ЖМ в поперечном магнитном поле (б): 1 — рабочий участок ; 2 — зонд; 3 — электромагнит; 4 — компенсационная ёмкость; 5 — термообменники типа «труба в трубе»; 6 — расходомер; 7 — дифманометр; 8 — электромагнитный насос; 9 — регулировочный вентиль; 10 — ёмкость с ртутью; 11 — накладные термодатчики; 12 — измерительная приборная стойка; 13 — компьютер (ПК).

Экспериментальный стенд РК-2 Стенд РК-2 позволяет реализовать условия течения в следующем диапазоне режимных параметров: $Re = 5000 \div 120000$; $Ha = 0 \div 500$ (индукция МП $B = 0 \div 1$ Тл); $Gr_q = 0 \div 1.3 \cdot 10^8$, $Pe = 120 \div 2500$; $Ra = 0 \div 3 \cdot 10^6$, плотность теплового потока на стенке $q_c = 0 \div 55$ кВт/м².

Экспериментальный стенд РК-3 Основой нового стенда РК – 3 является уникальный электромагнит, созданный специалистами Института ядерной физики СО РАН (г. Новосибирск), который способен создавать однородное поперечное в помещённом в его зазор исследуемом теплообменном канале МП длиной до 1 м и индукцией до 3 Тл. Магнит массой 5 т подвешен на опорах на горизонтальной оси. Поворотный механизм позволяет поворачивать его на любой угол, придавая ему вертикальное, горизонтальное или наклонное положение, и именно это позволяет на одном стенде исследовать различные конфигурации теплообмена при подъёмных, опускных и горизонтальных течениях ЖМ в вертикальных, горизонтальных, наклонных трубах и каналах в широких диапазонах чисел Re , Gr , Na . Впервые в нашей экспериментальной практике новый стенд позволяет достичь чисел Гартмана до 2000, что крайне важно, поскольку близко к реальным значениям в ТЯР.

Эксперименты проводились на трёх типах рабочих участков (изготовлены и использовались несколько участков каждого типа).

Рабочий участок № 1 в опытах по исследованию теплообмена в вертикальной трубе с однородным по периметру обогревом представлял собой круглую трубу из нержавеющей стали длиной 2 м, внутренним диаметром 19 мм и с толщиной стенки $\delta = 0.5$ мм.

Рабочий участок № 2 спроектирован и изготовлен для обеспечения однородного по длине и неоднородного по периметру обогрева. Обогреваемый участок длиной 42 калибра, внутренним диаметром 19 мм с толщиной стенки 0,5 мм оборудован двухсекционным ленточным нагревателем.

Рабочий участок № 3 для исследований в компланарном МП («компланарным» мы называем поперечное МП, направленное параллельно длинной стороне прямоугольного канала) представляет собой канал прямоугольного сечения 17×56 мм, расположенный в зазоре между двумя полюсами описанного выше электромагнита постоянного тока.

Каждый канал имеет участок гидродинамической стабилизации, участок воздействия МП и обогрева, а также выходной участок с камерой смешения.

Для учёта тепловых потерь на нагревателях рабочих участков установлены тепломеры потерь, представляющие собой многокорольковые дифференциальные микротермопары. После установки на рабочих участках тепломеры индивидуально градуируются.

Зондовые измерения в потоке ЖМ

В качестве датчиков в потоке ртути использовались микротермопары с оголёнными спаями. Диаметр корольков термопар в разных опытах составлял 25–100 мкм. Для подавления помех общего вида мы стараемся применять трёхпроводную схему измерения, причём третий защитный электрод по возможности ввариваем непосредственно в корольк термопары.

Микротермопары вводятся в поток с помощью измерительных зондов различных конструкций.

При измерениях термопарными зондами в МП необходимо учитывать особенности обтекания датчиков. Образуется «передний след»:

возмущение вверх по потоку, вносимое обтекаемым телом. Характерный размер δ области возмущения определяется выражением $\delta/N_T^{0,5}$, где N_T — локальное число Стюарта, рассчитанное по диаметру обтекаемого тела. Это обстоятельство учтено при конструировании зондов. Результаты численного расчёта «переднего следа» для условий наших экспериментов будут представлены ниже.

Для измерений в одном сечении трубы использовался *рычажный зонд со сферическим шарниром*. Зонд представляет собой рычаг, способный поворачиваться вокруг шарнира «шар по конусу». Более длинное плечо рычага — телескопическая конструкция из трубок — вводится через сифон в трубу рабочего участка навстречу потоку. На конце рычага устанавливается микротермопара или датчик скорости. Другое плечо рычага связано с координатным механизмом, позволяющим перемещать датчик по сечению трубы и определять величину перемещения. Поскольку длина стержня зонда велика по сравнению с радиусом трубы, то можно считать, что датчик перемещается, оставаясь практически в одной и той же плоскости, перпендикулярной оси трубы.

Для трёхмерных измерений локальных характеристик поля температуры в потоке ЖМ использовался *зонд типа «гребёнка»* с микротермопарами. Зонд «гребёнка» позволяет измерять не только осредненные температуры, но и статистических характеристик турбулентных пульсаций. Зонд оснащён координатными механизмами, обеспечивающим его дистанционное перемещение по всей длине зоны обогрева и поворот вокруг продольной оси.

Результаты предварительных экспериментов с применением зонда «гребёнка» позволили автору доказать гидродинамическую и тепловую стабилизацию потока ЖМ в поперечном и компланарном МП в основных сериях экспериментов, выполненных зондами рычажного типа. Именно данные о стабилизированных полях температурны использованы для построения моделей МГД – турбулентности.

Для измерения компонент скорости использовались *корреляционные микротермопарные зонды*, которые позволяют производить корреляционные измерения продольной компоненты скорости V_z с использованием естественного фона турбулентных флуктуаций температуры, переносимых потоком.

Исследования вторичных течений термогравитационной природы потребовали регистрировать *поперечные* компоненты скорости. Для этих целей автором разработан кондукционный датчик скорости с температурной компенсацией (Патент RU (№ 91179)), а также разработана методика проведения измерений и расчётные рекомендации для поправок. Поскольку измерения проводятся в неизотермическом потоке, на полезный сигнал U накладывается термо ЭДС U_d , связанная с контактом медных электродов с ртутью и образованием дифференциальной термопары медь – ртуть – медь: $U_{из} = U + U_d$, где $U_{из}$ — где $U_{из}$ — измеряемый сигнал. К каждому медному электроду приварен константановый провод, что позволяет использовать его, как медь–константановую микротермопару. Одновременно с измерениями кондукционного сигнала

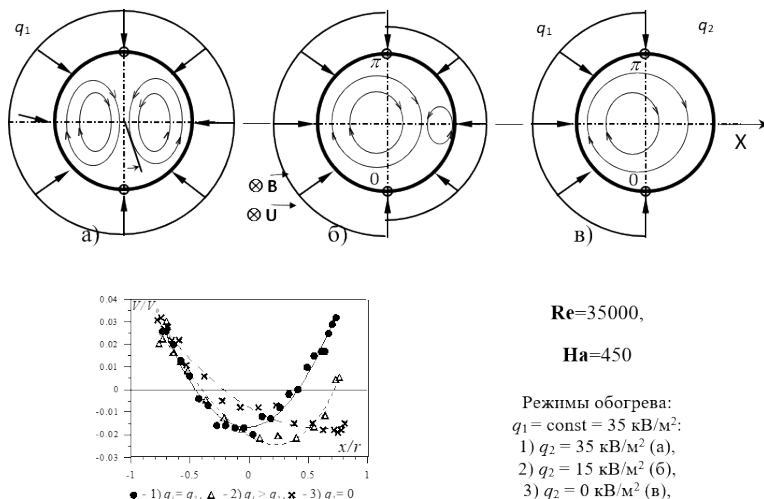


Рис. 3 — Профили вертикальной компоненты скорости V для случаев однородного и неоднородного («справа – слева») обогрева в продольном МП

регистрируются локальные температуры в потоке, на основании которых рассчитывается поправка на термо-ЭДС. Эта поправка весьма существенна, в некоторых случаях она может превышать значение полезного сигнала. Измерения скорости вторичных течений, с использованием электромагнитного датчика с температурной компенсацией позволили сделать выводы о наличии и характере ТГК при течении ЖМ в МП (рис. 3).

Методика эксперимента

Безразмерный местный КТО (число Нуссельта), безразмерная температура стенки определяются соотношениями:

$$\text{Nu} = \frac{q_c d}{\lambda(T_c - T_{\text{ж}})}, \quad \Theta_c = \frac{\lambda(T_c - T_{\text{ж}})}{q_c d}. \quad (6)$$

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

Плотность теплового потока на стенке определяется по параметрам электропитания нагревателей с учётом показаний тепломеров потерь:

Температура стенки определяется экстраполяцией показаний микротермопары зонда на стенку.

Среднемассовая температура на входе ($T_{\text{вх}}$) ЖМ в зону обогрева определяется по показаниям термопар. Температура на выходе из

зоны обогрева ($T_{\text{вых}}$) определяется по показаниям термопар (T_2), установленных в выходном патрубке с учётом поправки на тепловые потери в камере смешения.

Определение расхода ЖМ производится двумя способами: а) по показаниям расходомерного устройства; б) по тепловому балансу

Параметры МП определяются по параметрам электропитания магнита с учетом тарифовочных постоянных с неопределённостью порядка 2%. Границы области однородного МП определяются по снижению индукции на 5% от максимального значения.

Неопределённость локального числа Nu , безразмерной температуры на стенке Θ_c оценивается в 16%. Неопределённость определения интенсивности температурных пульсаций составляет 10%.

В **Четвёртой главе** приводятся результаты экспериментального исследования полей температуры, КТО и пульсаций температуры при опускном течении ЖМ в круглой трубе в поперечном МП в условиях однородного и неоднородного обогрева. В результате обобщения опытных данных построена алгебраическая модель турбулентного переноса, выполнено численное моделирование. Получены данные о полях температуры, КТО, температуре стенки, интенсивности турбулентных пульсаций температуры, корреляционные функции, спектры пульсаций.

В экспериментах установлено, что определяющее воздействие на поток ЖМ в условиях эксперимента оказывали два фактора: термогравитационная конвекция (ТГК) и поперечное МП.

Теплообмен в вертикальной трубе в поперечном МП при однородной по периметру тепловой нагрузке Рассмотрено опускное течение в трубе при **однородном** обогреве в диапазоне режимных параметров: $Re = 5000 \div 100000$; $Ha = 0 \div 500$; $Pe = 120 \div 2500$; $Ra = 0 \div 3 \cdot 10^6$; $Gr = 0.8 \div 1.3 \cdot 10^8$.

Воздействие эффекта Гартмана приводит к аксиальной асимметрии полей температуры в результате уплощения профиля скорости вдоль силовых линий МП — вдоль оси x , или вдоль диаметра, параллельного силовым линиям МП. Вследствие этого профиль температуры вдоль оси x менее вытянут по сравнению с профилем по оси y , вдоль диаметра, перпендикулярного силовым линиям МП. С увеличением числа Рейнольдса влияние эффекта Гартмана ослабевает.

Распределение температуры стенки по периметру трубы, а значит и локальных КТО (чисел Нуссельта), становится неоднородным, с образованием двух максимумов и минимумов. На рис. 4 представлена зависимость безразмерной температуры стенки $\Theta_c = \frac{T_c(\varphi) - T_{ж}}{q_c d / \lambda}$ и величины, обратной ей, $Nu = 1/\Theta_c(\varphi)$, где $T_c(\varphi)$ — температура стенки в зависимости от угла φ .

При низких числах Рейнольдса ($Re = 12000, 20000$), т. е. при условиях наибольшего воздействия на поток эффекта Гартмана локальные значения КТО в двух точках сечения трубы в поперечном МП опускаются до минимальных значений на уровне $Nu_{\text{л}} = 4.36$. При увеличении числа Re до 80000 неоднородность температуры стенки по периметру трубы при больших числах Гартмана ($Ha = 300 - - 500$) существенно

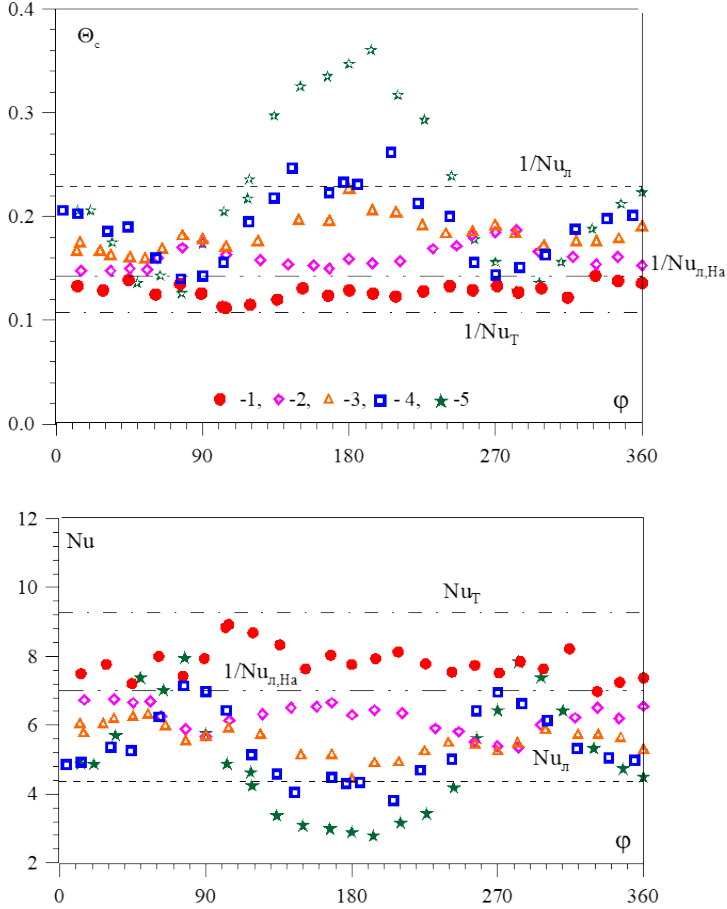


Рис. 4 — Распределение безразмерной температуры стенки Θ_c и числа Нуссельта $\text{Nu} = 1/\Theta_c$ по периметру в сечении трубы $z/d = 37$, $q_c = 35 \text{ кВт/м}^2$ ($\text{Gr} = 0.8 \cdot 10^8$), $\text{Re} = 12000$, в поперечном МП: 1) $\text{Ha} = 0$; 2) 100, 3) 200, 4) 300, 5) 500.

снижается, приближаясь к асимптотическому теоретическому значению при ламинарном течении ЖМ в трубе в поперечном МП в условиях $\text{Ha} \rightarrow \infty$.

На графике (рис. 5) приведены зависимости для осредненных по периметру чисел Нуссельта $\text{Nu} = (q_c d / \lambda) / (T_c - T_{\text{ж}})$ в зависимости от числа Пекле Pe в сечении $z/d = 37$ при однородном обогреве трубы в поперечном МП. Видно, что для данных, полученных в отсутствие

МП, осреднённое по периметру число Нуссельта совпадает с турбулентным числом Нуссельта при отсутствии ТГК Nu_T . При наличии МП поперечное МП подавляет как турбулентность, так и вторичные термогравитационные вихри. При этом значения числа Нуссельта с ростом числа Гартмана снижаются до значений, близких к Nu_d , $Ha = 7$, а при малых числах Re оказываются даже ниже этого уровня.

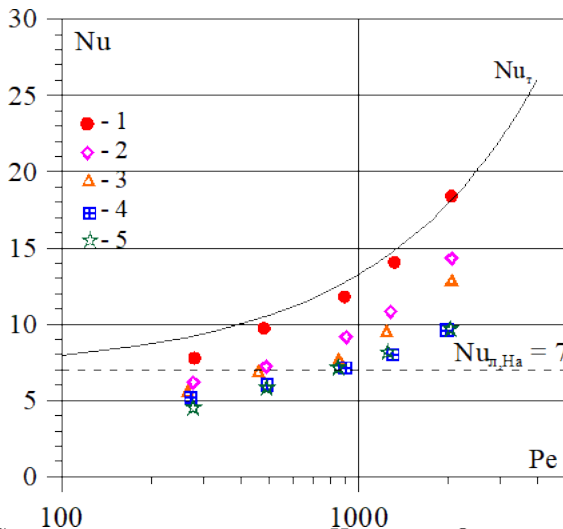


Рис. 5 — Средние по периметру числа Нуссельта Θ_c в поперечном МП $Ha = 0 \div 500$; $q_c = 35 \text{ кВт/м}^2$ ($Gr = 0.8 \cdot 10^8$)

Характерные осциллограммы пульсаций и спектры в районе максимума интенсивности показаны на рис. 6. $q_c = 35 \text{ кВт/м}^2$ ($Gr = 0.8 \cdot 10^8$), $Re = 12000$.

В большинстве режимов с ростом числа Гартмана МП подавляет турбулентность и интенсивность пульсаций температуры снижается практически до нуля.

Данные опытов свидетельствуют, что МП в некоторых случаях усиливает пульсации температуры вблизи стенки. Это необходимо учитывать, тем более что в теплообменнике ТЯР пульсации могут достигать десятков градусов. Результаты экспериментов, выявившие опасные для конструкции явления, предполагают дальнейшие исследования: необходимо определить диапазон режимных параметров, при которых возникают опасные пульсации, а также изучить течения ЖМ при неоднородной по периметру вертикальной трубы плотности теплового потока.

Теплообмен в вертикальной трубе в поперечном МП при неоднородной по периметру тепловой нагрузке

Рассмотрено опускное течение ЖМ (ртути) в вертикальной круглой трубе в поперечном МП в условиях **неоднородного** по периметру

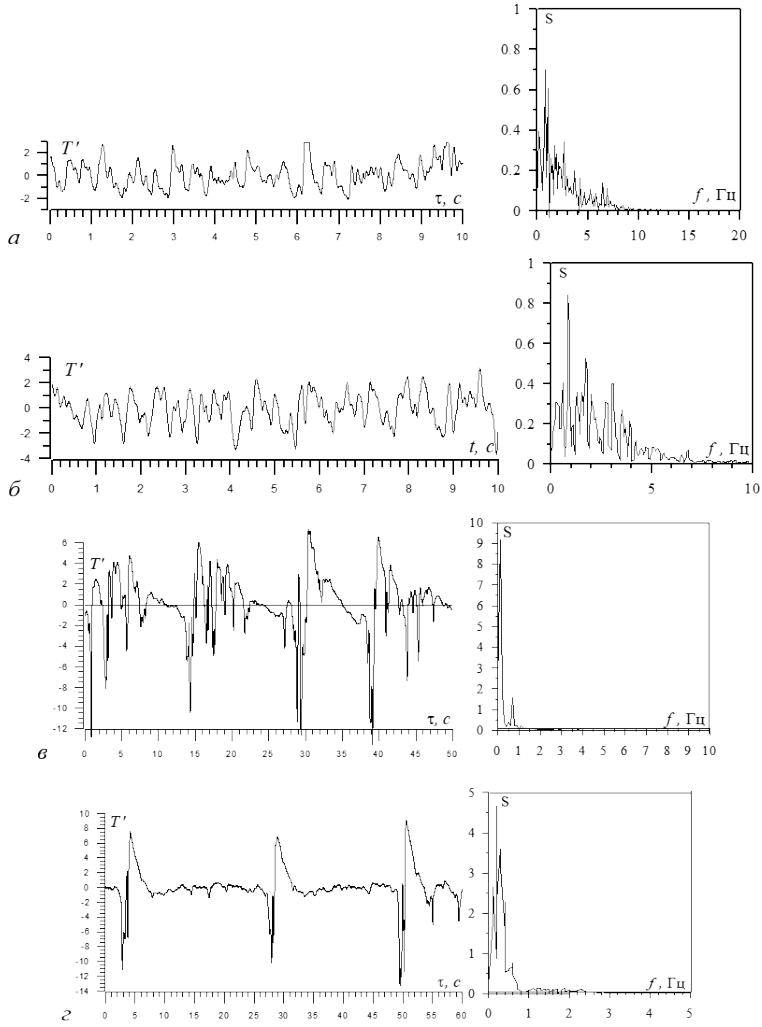


Рис. 6 — Характерные пульсации температуры и спектры: $z/d = 37$, $q_c = 35 \text{ кВт/м}^2$ ($Gr = 0.8 \cdot 10^8$), $Re = 12000$, вблизи максимума: а — $Ha = 0$, б — 100, в — 300, г — 500.

обогрева. Исследования проводились на экспериментальном стенде РК-2 с использованием тех же средств измерения, что и для случая однородного обогрева рабочего участка. Диапазон режимных параметров,

реализуемых на экспериментальном стенде: число $Re = 10^4 - - - 10^5$; число $Ha = 0 - - - 600$; число $Gr = 0 - 0,8 \cdot 10^8$. Определены поля температуры, интенсивностей пульсаций и КТО для сечения, находящегося на расстоянии 37 калибров от начала обогреваемой зоны.

Влияние МП на поле температуры изображено на рис. 7.

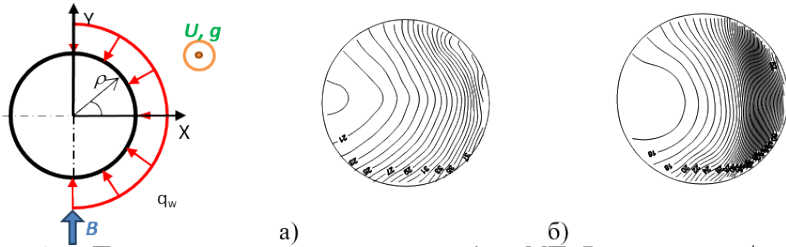


Рис. 7 — Поле температуры в сечении трубы в МП: $Re = 35000$, $q_1/q_2 = 55/0$ кВт/м², $Gr = 0.6 \cdot 10^8$. а) $Ha = 0$, б) 300.

Как и в опытах с однородным по периметру обогревом, были обнаружены режимы, характеризующиеся существенным влиянием ТГК на гидродинамику и теплообмен потока при наложении МП (рис. 8). Анализ основных закономерностей, а также границ проявления влияния ТГК проведём на основе полученных экспериментальных данных по температурам и полям интенсивности температурных пульсаций.

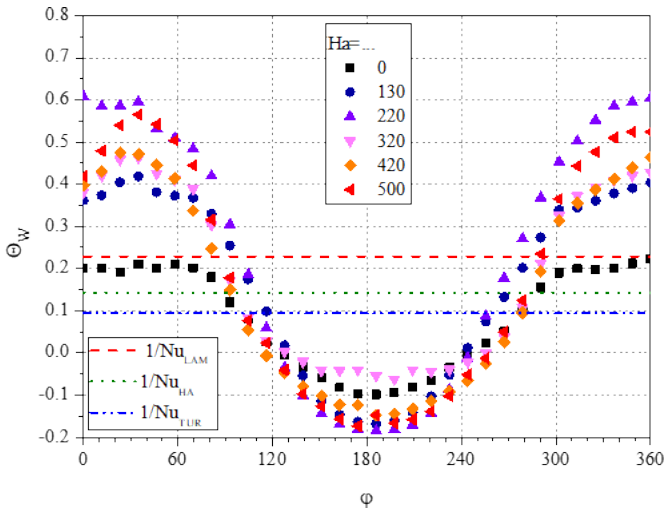


Рис. 8 — Распределение безразмерной температуры стенки по периметру трубы при различных числах Ha : $Re = 20000$, $q_1/q_2 = 55/0$ кВт/м², $Gr = 0.6 \cdot 10^8$

Экспериментальные результаты по температурным пульсациям в МП при различных числах Ha для режимов с $\frac{Gr}{Re^2} < 0.1$ показывают, что в этих режимах ТГК не оказывает существенного влияния на поток.

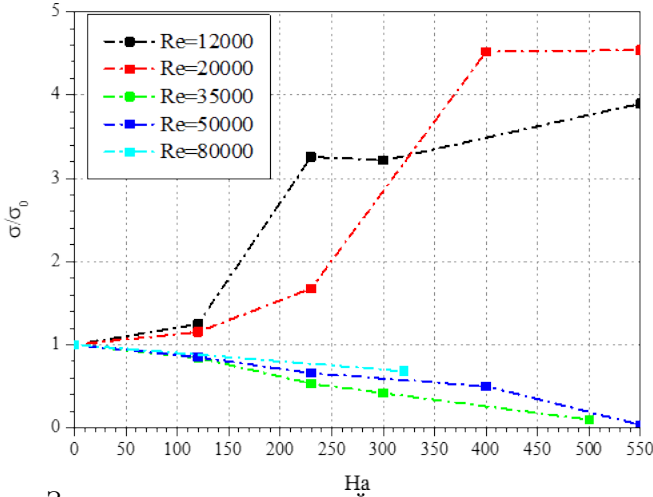


Рис. 9 — Зависимость относительной интенсивности температурных пульсаций от числа Re при различных значениях индукции МП: $q_1/q_2 = 55/0$ кВт/м², $Gr = 0.6 \cdot 10^8$

Построенные по результатам экспериментов характерные зависимости относительной интенсивности температурных пульсаций ($\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_0}$; где σ_0 — интенсивность пульсаций температуры без МП) от числа Гартмана для режимов с существенным влиянием ТГК и без него (рис. 9) выявляют два семейства кривых, по форме которых можно судить о влиянии ТГК на гидродинамику и теплообмен при течении ЖМ в поперечном МП.

С ростом числа Грасгофа Gr граница области, где существенно влияние ТГК, смещается в сторону больших чисел Рейнольдса Re . Такую границу удобно анализировать в координатах Ha^2/Re и Gr/Re^2 (рис. 10).

При значениях $\frac{Gr}{Re^2} > 0.2$ наложение даже слабого МП приводит к развитию в потоке вторичных течений. Уменьшение $\frac{Gr}{Re^2}$ приводит к тому, что влияние ТГК начинает проявляется при большей величине МП, и при $\frac{Gr}{Re^2} < 0.1$ ТГК не влияет на течение даже при максимальном реализуемом соотношении $\frac{Ha^2}{Re}$.

На основе полученных экспериментальных данных предлагается модель, учитывающая влияние поперечного МП на турбулентный перенос в круглой трубе, как при однородном, так и неоднородном обогреве. Использовались средние по сечению относительные интенсивности пульсаций температуры с различной тепловой нагрузкой 11.

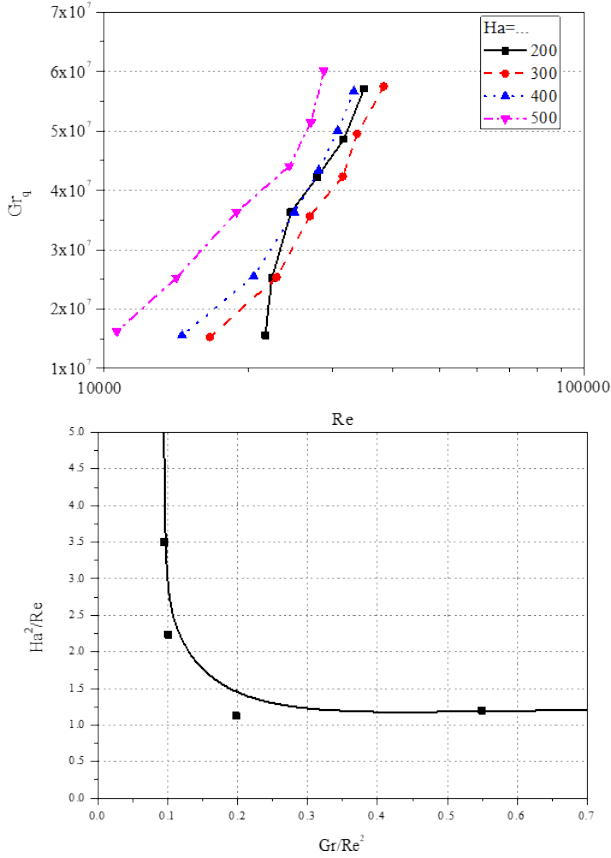


Рис. 10 — Границы проявления эффекта влияния ТГК

Получена зависимость для коэффициента подавления турбулентного переноса МП:

$$\frac{\varepsilon_T}{\nu} = \gamma(Ha, Re) \left(\frac{\varepsilon_T}{\nu} \right)_{Ha=0}, \gamma(Re, Ha) = e^{\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{Ha^2}{Re} \right)}$$

Область применимости модели: $Re = 35000 - 80000$; $Pe = 700 - 1600$; $Ha = 0 - 550$; $Gr = (0.3 - 0.8) \cdot 10^8$, $\frac{Gr}{Re^2} < 0.1$; $\frac{Ha^2}{Re} < 10$.

Разработаны расчётные коды численного моделирования МГД-теплообмена в трубе в поперечном МП во всем диапазоне режимных параметров.

Проведено моделирование обтекания измерительного зонда МГД-потокотом ЖМ. Установлено, что при обтекании зонда распространение

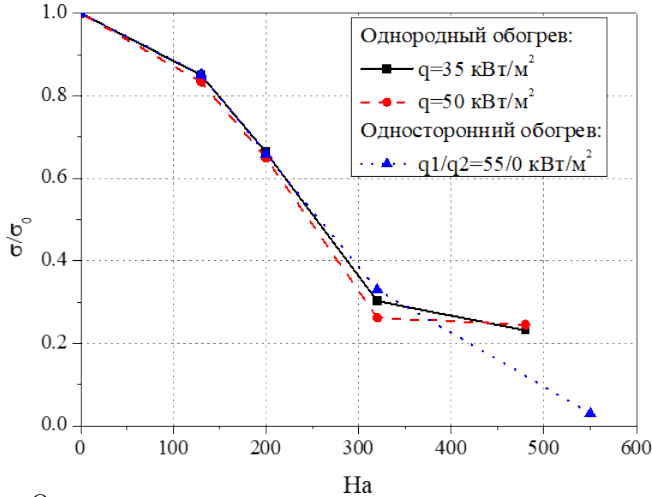


Рис. 11 — Относительная интенсивность температурных пульсаций в МП при различной тепловой нагрузке. $Re = 55000$.

возмущения в поле скорости распространяются вверх по потоку, но на незначительном удалении от королька термопары эти возмущения почти незаметны, влияние зонда в условиях эксперимента несущественно.

В **Пятой главе** приводятся результаты экспериментального исследования подъёмного и опускного течения ЖМ в прямоугольном канале с соотношением сторон 1:3 в условиях двустороннего обогрева в компланарном магнитном поле. Опыты при малых тепловых нагрузках, позволили исключить влияние ТГК на МГД-теплообмен. Обобщение экспериментальных данных по температурным пульсациям при опускном и подъёмном течениях позволило создать алгебраическую модель подавления турбулентности компланарным МП. Глава содержит результаты численного моделирования течения с использованием полученной модели.

Опытный участок представляет собой канал прямоугольного сечения 17×56 мм, расположенный в зазоре между полюсами электромагнита постоянного тока так, что МП направлено вдоль длинной стороны канала. Сечение, в котором измеряется профиль температуры, удалено на 0.6 м от начала обогрева и на 0.5 м от начала области однородного МП. Получены опытные данные по полям осредненной температуры, данные по локальным коэффициентам теплоотдачи и безразмерным температурам стенки, полям интенсивности температурных пульсаций, корреляционным и спектральным характеристикам этих полей. Диапазон режимных параметров, реализованный в экспериментах: $Re = V_0 2\delta/\nu = 10 \div 55 \cdot 10^3$; $Ha = B 2\delta(\sigma/\nu)^{0.5} = 0 \div 800$; $Gr_q = (g \beta q(2\delta)^4/\lambda \nu^2) = 0 \div 7 \cdot 10^8$; $Pr \sim 0.025$; $Pe = Re \cdot Pr = 50 \div 1400$.

На графике (рис. 12) представлены опытные данные по полям температуры, интенсивностям пульсаций температуры для опускного и подъёмного режимов течения.

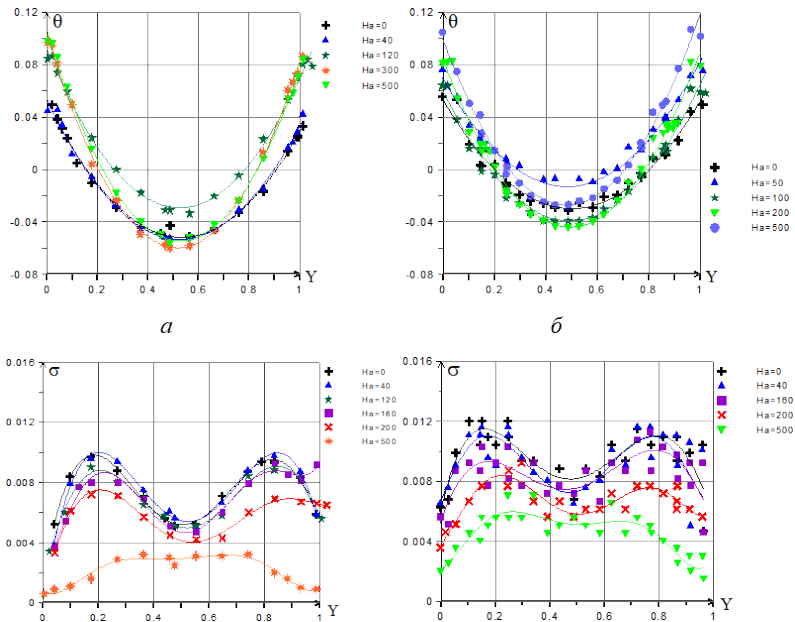


Рис. 12 — Поля температуры и интенсивности пульсаций температуры в поперечном сечении канала. $Re = 40000$, а — опускное течение, б — подъёмное течение.

При опускном течении МП и ТГК действуют на профиль температуры и интенсивность её пульсаций противоположно, реализуются режимы с неустойчивой стратификации плотности. Влияние ТГК приводит к образованию низкочастотных пульсаций аномальной интенсивности. При любой конфигурации обогрева наблюдаются режимы, в которых пульсации температуры высокой интенсивности наблюдаются и на внутренней, и на наружной стороне «горячей» и «холодной» стенок канала. При этом пульсации внутри и снаружи коррелируют друг с другом, размах пульсаций близок к полному температурному напору. Причина возникновения аномальных пульсаций — развитие в потоке тяжёлого ЖМ вторичных течений термогравитационной природы в форме крупных вихрей с осями, параллельными вектору магнитной индукции. При подъёмном течении реализуются режимы с устойчивой стратификацией плотности.

В экспериментах, целью которых было получение опытных данных для разработки учёта влияния компланарного МП на турбулентный перенос, нам удалось реализовать опускной и подъёмный режимы течения с незначительным влиянием ТГК.

Для разработки модели влияния компланарного поля на турбулентный перенос мы стремились реализовать также и режимы, в которых проявления ТГК сведены к минимуму.

Подход к построению модели аналогичен изложенному в главе 2 и заключается в корректировке коэффициента турбулентного переноса в зависимости от чисел Гартмана и Рейнольдса. За основу взяты экспериментальные данные по полям интенсивности температурных пульсаций. Для построения модели, описывающей влияние МП на течение ЖМ, необходимо было максимально ослабить ТГК. Специально для этого были получены экспериментальные данные с невысокими значениями плотности теплового потока на стенке ($q_c = 5000 \text{ Вт/м}^2$).

Данные по интенсивности пульсаций температуры свидетельствуют о том, что МП подавляет интенсивность пульсаций независимо от поперечной координаты. Следовательно, значение коэффициента подавления турбулентного переноса зависит только от режимных параметров, т.е. чисел Гартмана и Рейнольдса. Это подтверждается характерной эволюцией профилей интенсивности температурных пульсаций под действием МП с сохранением формы профилей.

В результате обобщения экспериментальных данных по пульсационным характеристикам потока получено распределение безразмерной интенсивности температурных пульсаций в зависимости от параметра МГД взаимодействия $N = \frac{\text{Ha}^2}{\text{Re}}$. Данные распределения для опускного и подъёмного режимов течения представлены на рис. 13.

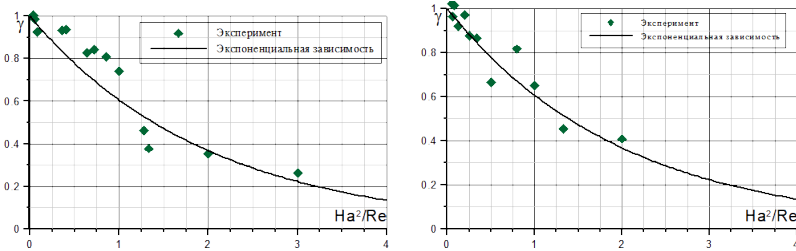


Рис. 13 — Коэффициент подавления турбулентности компланарным магнитным полем. Опускное и подъёмное течения.

Степень подавление турбулентного переноса компланарным МП, как и ранее, учтём с помощью коэффициента $\gamma_e(\text{Ha}, \text{Re})$ по зависимости

$$(\varepsilon_\tau/\nu)_{\text{Ha}} = \gamma_e(\text{Ha}, \text{Ra}) \cdot (\varepsilon_\tau/\nu)_0$$

где $(\frac{\varepsilon_\tau}{\nu})_{\text{Ha}=0}$ — коэффициент турбулентного переноса импульса без МП, $\gamma_e(\text{Ha}, \text{Re})$ — коэффициент подавления пульсаций МП, определяемый на основе экспериментальных данных.

В результате обобщения экспериментальных данных по пульсационным характеристикам потока, как при подъёмном, так и при опускном течении для коэффициента $\gamma_e(\text{Ha}, \text{Re})$ предложена зависимость учета степени подавления турбулентного переноса МП в диапазоне режимных параметров $\text{Gr}/\text{Re}^2 = 0 \div 0,25$; $\text{Ha}^2/\text{Re} = 0 \div 3$:

$$\gamma_e = \frac{\sigma}{\sigma_0} = e^{\left(-\frac{1}{2} \frac{\text{Ha}^2}{\text{Re}}\right)};$$

Разработаны расчётные коды и проведено численное моделирование МГД-теплообмена во всем диапазоне режимных параметров эксперимента.

В **Шестой главе** описаны принципы системной интеграции, на основе которых разработана и реализована система автоматизации теплофизического эксперимента. Представлены разработки тиражируемых АСНИ, а также результаты их внедрения в учебный процесс.

Так, например, автор диссертации, имеющий большой опыт построения сложных систем автоматизации для отраслей промышленности и науки, принял определяющее участие в реализации крупного проекта развития лабораторной базы кафедр НИУ «МЭИ» путем внедрения средств автоматизации эксперимента — создании «Единой территориально-распределенной системы автоматизации экспериментальной базы технического университета — АСНИ МЭИ». К началу работ 25 кафедр МЭИ из 60 располагали достаточно серьезными учебными или научными экспериментальными стендами, которые могли рассматриваться как объекты автоматизации. В итоге были созданы и внедрены на разных кафедрах НИУ «МЭИ» 12 локальных систем автоматизации эксперимента (САЭКС).

Все САЭКС построены в рамках единой прогрессивной концепции, на принципах НИИТ, по техническим требованиям разных кафедр, с учетом специфики различных учебных направлений: тепло-, электро-, радиопизики и др.

Важнейшей особенностью АСНИ МЭИ является ее концептуальное единство:

- все локальные системы имеют инвариантную базовую часть;
- используются единые средства программирования. Программное обеспечение создано на базе единой программно-аппаратной среды;
- пользователи проходят обучение по единой программе;
- создаётся банк уникальных приборов и модулей коллективного пользования.

Все локальные АС, являясь частями единой АСНИ МЭИ, тем не менее, отличаются друг от друга. Это объясняется тем, что инвариантная базовая часть каждой АС дополняется индивидуальной частью, построенной с учётом потребностей кафедры или подразделения. При этом возможности АС позволяют удовлетворить практически любые запросы по измерениям, сбору, хранению, обработке и представлению результатов, а также по управлению объектами автоматизации.

При разработке АСНИ МЭИ учитывались особенности в организации научно-исследовательской работы и учебного процесса, характерные для многопрофильного технического вуза, каким является МЭИ:

- разнообразие объектов исследования, которые различаются как по физической сути протекающих в них процессов, так и по масштабам экспериментальных установок (как правило — уникальных), скорости протекания процессов, перечню решаемых задач и т.п.;
- автономность установок и стендов, размещённых на различных кафедрах;
- аperiodичность использования: большинство установок и стендов включаются в работу по мере необходимости на ограниченный период; такой режим использования, как правило, требует, чтобы время приведения АС в рабочее состояние было минимальным;
- необходимость использования АСНИ в образовательном процессе. При этом речь идёт не только об ознакомлении специалистов, занимающихся экспериментальной деятельностью в какой-то конкретной области, с системами автоматизации эксперимента, но и о целенаправленной подготовке и переподготовке специалистов широкого профиля, в том числе и студентов, которые будут профессионально заниматься проблемами автоматизированного эксперимента и проектирования АС различного назначения.

Эти особенности накладывают отпечаток на способ реализации АС, хотя в целом она сохраняет основные черты, присущие системам общего назначения. Это касается перечня тех типовых функций, которые обычно возлагаются на подобные системы: Сбор и преобразование информации, Обработка информации, Представление исходной информации и результатов обработки, Накопление информации, Интерпретация результатов, Контроль и управление экспериментом, Дистанционный доступ к экспериментальному и лабораторному оборудованию, как правило, с учётом требований автоматизированного лабораторного практикума удалённого доступа (АЛП УД).

С момента ввода в эксплуатацию АСНИ МЭИ прошло уже несколько лет, поэтому с уверенностью можно говорить, что проект состоялся. Все 12 локальных САЭКС введены в эксплуатацию своевременно и в настоящее время работают, а некоторые из них развиты пользователями путем закупок и подключения дополнительного оборудования. Кроме того, локальные САЭКС доказали свою эффективность как в учебном процессе, так и в научных исследованиях, о чем свидетельствует, например, большое количество защищенных диссертаций.

По многочисленным отзывам пользователей, АС доказали свою эффективность и надежность и «прижились» на кафедрах, что, на наш взгляд, крайне важно для технического университета, которому предстоит решать задачи цифровизации образования в рамках с цифровизации экономики всей страны.

Ряд учебных, научно-исследовательских и промышленных организаций заключил контракты на разработку и ввод в эксплуатацию подобных экспериментальных АСНИ. Под руководством и при участии автора были реализованы несколько десятков подобных комплексов,

эксплуатирующихся в российских и зарубежных компаниях. С использованием разработанных автором технологий разработан и выпущен отраслевой стандарт ОСТ 9.2-98 (Система разработки и постановки продукции на производство. Учебная техника для образовательных учреждений. Системы автоматизированного лабораторного практикума). Стандарт введён Приказом Министерства общего и профессионального образования Российской Федерации от 14.10.98 N 2610.

Автором разработаны и читаются учебные курсы по программам "Новые информационно-измерительные системы и технологии "АСНИ в теплофизическом эксперименте" для студентов "НИУ "МЭИ". Группы специалистов нескольких десятков предприятий РФ прошли повышение квалификации и обучение по соответствующим программам.

В **Заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. При участии автора модернизирован и развит уникальный «Ртутный МГД – стенд», включенный в Реестр уникальных экспериментальных установок России, представляющий собой территориально – распределённый экспериментальный комплекс МЭИ – ОИВТ РАН и состоящий из трех автоматизированных МГД – стендов для исследований теплообмена электропроводных жидкостей. Комплекс допускает дистанционное управление и коллективное использование в режиме удалённого компьютерного доступа.
2. Под руководством и при участии автора разработаны и внедрены в практику теплофизического эксперимента оригинальные методики автоматизированных исследований процессов гидродинамики и теплообмена перспективных теплоносителей, физики МГД – турбулентности. При исследованиях используются авторские разработки датчиков, измерительных зондов, аппаратных средств, алгоритмов и программ измерений и анализа сложных процессов.
3. Впервые проведены комплексные исследования МГД – теплообмена жидкого металла в вертикальных круглых трубах в поперечном магнитном поле при однородном и неоднородном обогреве в условиях существенного влияния ТГК, а также в вертикальных плоских каналах в компланарном магнитном поле при симметричном обогреве. Исследования выполнены при соотношениях режимных параметров — критериев Рейнольдса, Пекле, Гартмана, Рэлея, приближенных к реальным в проектируемых теплообменных системах термоядерного реактора – ТОКАМАКа. Получены опытные данные о средних и локальных коэффициентах теплоотдачи, полях осредненной температуры и температурных пульсаций. Полученные в работе опытные данные могут быть использованы для верификации кодов численного моделирования МГД теплообмена.
4. Впервые определена область существенного влияния свободной конвекции в исследуемой конфигурации МГД – теплообмена в трубе в зависимости от соотношения критериев Рейнольдса и Грасгофа. Показано, что развитие вторичных течений термогравитационной природы в условиях магнитного поля приводит к появлению при некоторых соотношениях режимных параметров ($Gr_q/Re^2 > 0,3$) низкочастотных

пульсаций температуры аномально высокой амплитуды, представляющих опасность для материала стенки теплообменника. Впервые доказана возможность полного подавления этих опасных пульсаций температуры при увеличении индукции поперечного магнитного поля (числа Гартмана).

5. Впервые проведены комплексные исследования полей осредненной температуры и статистических характеристик температурных пульсаций при подъёмном и опускном течении ртути в плоском канале в компланарном магнитном поле. Конфигурация МГД – теплообмена соответствует реальному проекту системы охлаждения blankets реактора – ТОКАМАКа. Опытные данные использованы для построения модели подавления турбулентного переноса магнитным полем. Впервые в данной конфигурации обнаружены опасные низкочастотные пульсации температуры высокой амплитуды. Обнаружено сильное влияние термогравитационной конвекции на характеристики теплообмена.
6. Впервые на основе экспериментальных данных предложена простая расчётная алгебраическая модель подавления турбулентного переноса в поперечном магнитном поле. Модель является универсальной и применима для инженерных расчётов характеристик течения и теплообмена в прямоугольном канале и в трубе в поперечном и компланарном магнитном поле.
7. Разработаны расчётные коды численного моделирования в среде ANES. Результаты численного моделирования с использованием предложенной модели влияния магнитного поля на турбулентный перенос хорошо согласуются с данными, полученными в экспериментах.
8. Впервые разработан функциональный ряд типовых тиражируемых систем автоматизации теплофизического эксперимента, испытаний и технической диагностики энергообъектов. Системы построены на базе информационно – измерительных технологий нового поколения, внедрены и применяются в НИУ «МЭИ» и других университетах, в институтах РАН, на предприятиях энергетики, транспорта, оборонного и аэрокосмического комплексов.
9. По материалам диссертации впервые подготовлен и включён в учебный план подготовки студентов – теплофизиков лекционный курс «Новые информационно – измерительные системы и технологии в теплофизике» с лабораторно – практическими занятиями. Создан и под руководством автора действует в структуре повышения квалификации специалистов НИУ «МЭИ» сертифицированный учебный Центр новых информационно-измерительных систем и технологий (ЦНИИСТ).

Результаты работ были неоднократно представлены на выставках и научных конференциях и отмечены дипломами. Автор является победителем международной выставки-конференции NIWeek-1996, награждён грамотами Министра образования РФ, дипломом лауреата ВВЦ, премией РАО ЕЭС РФ.

Работы по теме диссертации проводились при финансовой поддержке РФФИ, РНФ, Министерства образования РФ, научно-производственной фирмы ООО "ЦАТИ".

Публикации автора по теме диссертации

В рецензируемых научных изданиях

1. Исследование теплообмена жидкого металла в прямоугольном вертикальном канале в компланарном магнитном поле применительно к системе охлаждения реактора-токамака [Текст] / И. А. Беляев [и др.] // Теплоэнергетика. — 2018. — Т. 12. — С. 37–43.
2. Experimental Studies of Coolant Temperature and Velocity on an Integrated Water Model of a Fast Reactor in Different Operating Regimes [Текст] / A. N. Opanasenko [и др.] // Atomic Energy. — 2017. — Т. 123, № 1.
3. Temperature correlation velocimetry technique in liquid metals [Текст] / I. A. Belyaev [и др.] // Flow Measurement and Instrumentation. — 2017. — Т. 55. — С. 37–43.
4. Особенности теплообмена при течении жидкого металла в вертикальном канале в компланарном магнитном поле [Текст] / П. И. Костычев [и др.] // ВАНТ, Сер. термоядерный синтез. — 2017. — Т. 40, № 3. — С. 68–77.
5. Экспериментальный стенд для исследований теплообмена перспективных теплоносителей ядерной энергетики [Текст] / И. А. Беляев [и др.] // Теплоэнергетика. — 2017. — Т. 11.
6. Experimental investigation of MHD heat transfer in a vertical round tube affected by transverse magnetic field. [Текст] / I. A. Melnikov [и др.] // Fusion Engineering and Design. — 2016. — Т. 112. — С. 505–512.
7. *Пятницкая, Н. Ю.* Экспериментальное исследование опускного и подъемного течения жидкого металла в прямоугольном канале в компланарном магнитном поле [Текст] / Н. Ю. Пятницкая, Е. В. Свиридов, Н. Г. Разуванов // Тепловые процессы в технике. — 2016. — Т. 12. — С. 531–536.
8. Исследование режимов теплообмена при течении жидкого металла в условиях термоядерного реактора [Текст] / И. И. Поддубный [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. — 2015. — Т. 38, № 3. — С. 5–15.
9. Исследования режимов теплообмена при течении жидкого металла в условиях термоядерного реактора [Текст] / И. И. Поддубный [и др.] // ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез. — 2015. — Т. 38. — С. 5–15.

10. *Пятницкая, Н. Ю.* Гидродинамика и теплообмен при течении жидкого металла в прямоугольном канале в компланарном магнитном поле [Текст] / Н. Ю. Пятницкая, Е. В. Свиридов, Н. Г. Разуванов // Тепловые процессы в технике. — 2015. — Т. 12. — С. 546—551.
11. Исследование теплообмена жидкого металла при течении в вертикальной трубе с неоднородным обогревом в поперечном магнитном поле [Текст] / И. А. Мельников [и др.] // Теплоэнергетика. — 2013. — Т. 5, № 52—59.
12. Построение и использование современных автоматизированных систем научных исследований, испытаний, мониторинга и технической диагностики тепловых процессов [Текст] / И. А. Беляев [и др.] // Тепловые процессы в технике. — 2013. — Т. 12. — С. 562—572.
13. Гидродинамика и теплообмен при течении электропроводных жидкостей в круглой трубе в поперечном магнитном поле [Текст] / Л. Г. Генин [и др.] // Теплоэнергетика. — 2000. — Т. 6. — С. 61—65.
14. A Technique for Scanning Probe Measurement of Temperature Fields in a Liquid Flow. [Текст] / I. A. Belyaev [и др.] // Thermal Engineering. — 2019. — Т. 66, № 6. — С. 377—387.
15. *Pyatnitskaya, N.* Evolution of temperature fluctuations in transverse magnetic field at flow in basic shaped channels [Текст] / N. Pyatnitskaya, I. Melnikov, N. e. a. Razuvanov // Magnetohydrodynamics. — 2019. — Т. 55, № 1. — С. 167—174.
16. Features of MHD heat transfer in simple channels [Текст] / I. A. Belyaev [и др.] // Magnetohydrodynamics. — 2018. — Т. 54, № 3. — С. 245—259.
17. Investigation of the liquid metal flow in a vertical rectangular channel applied to the tokamak reactor cooling system [Текст] / N. Y. Pyatnitskaya [и др.] // Journal of Physics: Conference Series, art. no. 012040. — 2018. — Т. 1133, № 1.
18. Temperature fluctuations in a MHD flow of a liquid metal in a vertical hot pipe [Текст] / I. A. Belyaev [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — Т. 1128, № 1. — art. no. 012008.
19. Temperature fluctuations in a nonisothermal mercury pipe flow affected by a strong transverse magnetic field [Текст] / I. Belyaev [и др.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2018. — Т. 127. — С. 566—572.
20. Peculiarity of the heat transfer of liquid metal downward flow in vertical duct in coplanar magnetic field [Текст] / P. V. Kostychev [и др.] // Problems of Atomic Science and Technology, Series Thermonuclear Fusion. — 2017. — Т. 40, № 3. — С. 68—77.
21. The experimental facility for investigation of MHD heat transfer in perspective coolants in nuclear energetics. [Текст] / B. M. Batenin [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Т. 891, № 1. — С. 68—77.

22. Turbulent MHD heat transfer in liquids with the prandtl number $Pr > 1$ [Текст] / A. V. Kotlyar [и др.] // Magnetohydrodynamics. — 2017. — Т. 53, № 3. — С. 483–494.
23. Experimental study of liquid metal heat transfer in a vertical heated channel affected by a coplanar magnetic field. [Текст] / N. G. Razuvanov [и др.] // Magnetohydrodynamics. — 2016. — Т. 52, № 1. — С. 171–180.
24. *Pyatnitskaya, N. Y.* Hydrodynamics and heat transfer for downward liquid metal flow in a rectangular channel in the presence of a coplanar magnetic field. [Текст] / N. Y. Pyatnitskaya, E. V. Sviridov, N. G. Razuvanov // Magnetohydrodynamics. — 2016. — Т. 52, № 1. — С. 155–162.
25. Modernization of the experimental base for studies of MHD heat exchange at advanced nuclear power facilities. [Текст] / V. M. Batenin [и др.] // High Temperature. — 2015. — Т. 53, № 6. — С. 904–907.
26. Direct numerical simulations of heat transfer and convection in mhd liquid metal flow in a pipe. [Текст] / Y. Listratov [и др.] // Magnetohydrodynamics. — 2013. — Т. 49, № 1. — С. 87–99.
27. *Genin, L. G.* Hydrodynamics and heat transfer under conditions of flow of conducting liquid in a flat channel in transverse magnetic field [Текст] / L. G. Genin, T. E. Krasnoshchekova, E. V. Sviridov // High Temperature. — 1998. — Т. 36, № 3. — С. 438–445.

Зарегистрированные патенты

28. *Патент на полезную модель №RU 188420 U1.* Микротермопарный зонд для трёхмерных измерений полей температуры в неизотермических потоках жидких металлов [Текст] / И. А. Беляев [и др.] (Российская Федерация) ; Н. «МЭИ» ; патент. — Заявл. 31.10.2018 ; опубл. 11.04.2019, приоритет 31.10.2018, Бюлл №11 (RU). — 5 с. : ил.
29. *Патент на полезную модель №RU 196379 U1.* Измеритель полей скорости в замкнутом пространстве [Текст] / И. А. Беляев [и др.] (Российская Федерация) ; Н. «МЭИ» ; патент. — Заявл. 16.09.2019 ; опубл. 16.09.2020, приоритет 16.09.2019, Бюлл №11 (RU). — 5 с. : ил.
30. *Патент на полезную модель №RU 91179 U1.* Электромагнитный датчик скорости в потоке электропроводной среды. [Текст] / Л. Г. Генин [и др.] (Российская Федерация) ; Н. «МЭИ» ; патент. — № RU91179U1 ; заявл. 27.01.2010 ; опубл. 27.01.2010, приоритет 27.01.2010 (Рос. Федерация). — 5 с. : ил.

В сборниках трудов конференций

31. Развитие исследований МГД - теплообмена перспективных теплоносителей ядерной энергетики [Текст] / В. М. Батенин [и др.] // Тезисы докладов XXI Школы - семинара под руководством А. И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». Т. 1. — С. -Петербург. — С. 27–28.

32. Influence of the coplanar magnetic field on the liquid metal flow in a rectangular vertical channel under the influence of thermal load [Текст] / I. Melnikov [и др.] // Russian conference on MHD. Book of Abstracts. — Russia, 06.2018. — С. 109.
33. Модель подавления турбулентности компланарным магнитным полем при течении жидкого металла в прямоугольном канале [Текст] / И. А. Мельников [и др.] // Тезисы докладов Научно-технической конференции ТЕПЛОФИЗИКА. — Обнинск, 2018. — С. 66—67.
34. Температурные пульсации, сопровождающие МГД-теплообмен жидкого металла в вертикальных каналах [Текст] / И. А. Беляев [и др.] // Тезисы докладов 111 Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика». — Ялта, Крым, 2018. — С. 19.
35. Теплообмен при смешанной конвекции жидкого металла в присутствии магнитных полей [Текст] / И. А. Беляев [и др.] // Тезисы докладов Научно-технической конференции ТЕПЛОФИЗИКА. — Обнинск, 2018. — С. 71.
36. Теплообмен при смешанной конвекции жидкого металла в присутствии магнитных полей [Текст] / И. А. Беляев [и др.] // Тезисы докладов Научно - технической конференции ТЕПЛОФИЗИКА. — Обнинск, 2018. — С. 71.
37. Развитие исследований теплообмена перспективных теплоносителей ядерной энергетики [Текст] / В. М. Батенин [и др.] // Тезисы докладов XXXIII Сибирского теплофизического семинара. — 06.2017. — С. 242.
38. Experimental investigations on MGD heat transfer applied to TOKAMAK - fusion neutron source [Текст] / I. A. Belyaev [и др.] // Russian Conf. on MHD. Book of Abstracts. — Perm, 2015. — С. 89.
39. Probe simulation in MHD - flow [Текст] / I. A. Belyaev [и др.] // Russian Conference on MHD. Book of Abstracts. — Perm, 06.2015. — С. 13.
40. Heat transfer of MHD - flow: experimental and numerical research [Текст] / I. A. Melnikov [и др.] // The 9 - th International PAMIR Conference on Fundamental and Applied MHD, Riga, Latvia. Т. 1. — 2014. — С. 65—69.
41. Liquid metal heat transfer in a TOKAMAK reactor [Текст] / I. A. Belyaev [и др.] // The 9 - th International PAMIR Conference on Fundamental and Applied MHD. Т. 1. — Riga, Latvia, 2014. — С. 85—89.
42. Беляев, И. А. Применение накладных датчиков температуры в теплофизическом эксперименте [Текст] / И. А. Беляев, В. С. Загорский, Е. В. Свиридов // Тезисы докладов Шестой Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 1. — М. , Изд. дом МЭИ, 2014. — С. 47—48.

43. Исследование гидродинамики течения воздуха в круглой трубе [Текст] / Е. В. Свиридов [и др.] // Труды международной научно-методической конференции «Информатизация инженерного образования-ИНФОРИНО-2014». — М., Изд. МЭИ, 2014. — С. 377—378.
44. Методы и средства измерений теплофизических величин в МГД потоке жидкого металла [Текст] / И. А. Беляев [и др.] // Тезисы докладов Шестой Российской национальной конференции по теплообмену. — М., Изд. дом МЭИ, 2014. — С. 49—50.
45. Развитие экспериментальной базы исследований гидродинамики и теплообмена жидкометаллических теплоносителей применительно к ядерной и термоядерной энергетике [Текст] / В. М. Батенин [и др.] // Тезисы докладов Шестой Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 1. — М., Изд. дом МЭИ, 2014. — С. 45—46.
46. Современные технологии при исследовании МГД - теплообмена [Текст] / И. А. Мельников [и др.] // Труды Международной научно-методической конференции «Информатизация инженерного образования-ИНФОРИНО - 2014». — М., Изд. МЭИ, 2014. — С. 375—376.
47. Современные технологии при исследовании МГД - теплообмена [Текст] / И. А. Мельников [и др.] // Труды Международной научно-методической конференции «Информатизация инженерного образования-ИНФОРИНО - 2014». — М., Изд. МЭИ, 2014. — С. 375—376.
48. Технологии и построения АСНИ при проведении теплофизического эксперимента [Текст] / И. А. Беляев [и др.] // Тезисы докладов Шестой Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 1. — М., Изд. дом МЭИ, 2014. — С. 51—52.
49. Технологии National Instruments при исследовании МГД-теплообмена [Текст] / И. А. Мельников [и др.] // XII ежегодная конференция компании NI 2013. — 11.2013. — С. 47—49.
50. Автоматизированная учебная лаборатория техники теплофизического эксперимента. [Текст] / В. В. Гайдученко [и др.] // Труды Международной научно-методической конференции «Информатизация инженерного образования-ИНФОРИНО - 2012». — М., Изд. дом МЭИ, 2012. — С. 277—278.
51. АСНИ МЭИ: единая территориально - распределенная система автоматизации лабораторий технического университета [Текст] / А. И. Карякин [и др.] // Труды международной научно-методической конференции «Информатизация инженерного образования-ИНФОРИНО - 2012». — М., Изд. дом МЭИ, 2012. — С. 293—295.
52. Исследование МГД - теплообмена жидкометаллического теплоносителя в условиях термоядерного реактора - токамака [Текст] / Б. И. А. [и др.] // Национальная конференция «Повышение эффективности, надежности и безопасности работы энергетического оборудования ТЭС и АЭС», тезисы докладов. — М., Издательский дом МЭИ, 2012. — С. 169—170.

53. Исследование неизотермической МГД - турбулентности методом прямого численного моделирования (DNS) [Текст] / О. Ю. Зиканов [и др.] // Тезисы докладов Российской конференции по МГД. — Пермь. ИМСС УРО РАН, 2012. — С. 44.
54. *Листратов, Я. И.* Многофункциональная тиражируемая система автоматизации лабораторного физического эксперимента [Текст] / Я. И. Листратов, В. Г. Свиридов, Е. В. Свиридов // Труды международной научно - методической конференции «Информатизация инженерного образования-ИНФОРИНО - 2012». — М. Изд. дом МЭИ, 2012. — С. 303—304.
55. Особенности теплообмена жидкометаллического теплоносителя в термоядерном реакторе-токамаке [Текст] / Л. Г. Генин [и др.] // Российская конференция по магнитной гидродинамике. Пермь. ИМСС УРО РАН. — 2012. — С. 27.
56. Учебный центр новых информационно - измерительных систем и технологий (ЦНИИСТ) [Текст] / Т. Е. Краснощекова [и др.] // Труды международной научно - методической конференции «Информатизация инженерного образования-ИНФОРИНО - 2012». — М. , Изд. дом МЭИ, 2012. — С. 287—298.
57. Центр новых информационно - измерительных систем и технологий (ЦНИИСТ): 15 лет развития. [Текст] / А. И. Карякин [и др.] // Национальная конференция «Повышение эффективности, надежности и безопасности работы энергетического оборудования ТЭС и АЭС», тезисы докладов. — М. , Издательский дом МЭИ, 2012. — С. 173—174.
58. Liquid metal heat transfer in a vertical tube affected by transverse magnetic field [Текст] / L. G. Genin [и др.] // Proceeding of the 8th International PAMIR Conference on Fundamental and Applied MHD. — France, 2011. — С. 31—37.
59. Влияние вторичных вихрей на гидродинамику и теплообмен жидкометаллического теплоносителя в условиях термоядерного реактора - токамака [Текст] / И. А. Беляев [и др.] // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках. Тезисы докладов четвертой международной конференции. — М. Издательский дом МЭИ, 2011.
60. Разработка автоматизированной системы сбора и обработки информации для экспериментального стенда «Тепловыделяющая сборка» [Текст] / А. Т. Комов [и др.] // X Международная НПК «Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments - 2011». — 2011.
61. Liquid Metal Heat Transfer Investigations Applied to Tokamak Reactor [Текст] / V. G. Sviridov [и др.] // Proceeding of the International Heat Transfer Conference IHTC14. — Washington DC. USA, 2010. — С. 1—8.
62. Моделирование теплообмена при течении жидкого металла в трубе применительно к реактору - токамаку [Текст] / Л. Г. Генин [и др.] // Труды Пятой Российской национальной конференции по теплообмену РНКТ-5. Т. 2. — 2010. — С. 103—106.

63. Моделирование МГД - теплообмена при течении жидкого металла применительно к реактору - токамаку. [Текст] / Л. Г. Генин [и др.] // Труды научно - технической конференции «Проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии». — М. Издательство МЭИ, 2009. — С. 99—103.
64. The experimental liquid metal heat transfer investigations applied to fusion reactor [Текст] / V. G. Sviridov [и др.] // Proceeding of the 7th International PAMIR Conference on Fundamental and Applied MHD, France. — 2008. — С. 885—890.
65. The experimental liquid metal heat transfer investigations applied to fusion reactor [Текст] / L. G. Genin [и др.] // VI Minsk International Heat and Mass Transfer Forum. T. 2. — Abstracts, 2008. — С. 249—250.
66. Влияние вторичных течений на теплообмен жидкого металла в горизонтальной трубе при неоднородном обогреве в магнитном поле. [Текст] / В. Г. Свиридов [и др.] // Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках. Материалы третьей международной конференции. — М. Издательский дом МЭИ, 2008. — С. 89—90.
67. Системы автоматизации научного эксперимента, испытаний и диагностики энергетических установок [Текст] / В. В. Гайдученко [и др.] // Пятая международная научно - практическая конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». — С. -Петербург, Изд - во Политехнического университета, 2008. — С. 478—479.
68. Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках [Текст] / В. Г. Свиридов [и др.] // Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках. Материалы третьей международной конференции. — М. Издательский дом МЭИ, 2008.
69. ЦНИИСТ: обучение и повышение квалификации в области новых информационно - измерительных технологий [Текст] / Т. Е. Краснощекова [и др.] // Пятая международная научно - практическая конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». — С. -Петербург, Изд - во Политехнического университета, 2008. — С. 526—528.
70. Новые информационно - измерительные технологии при проведении теплофизического эксперимента [Текст] / А. И. Карякин [и др.] // Труды IV Российской конференции по теплообмену. Т. 1. — М. Издательский дом МЭИ, 2006. — С. 190—193.
71. Экспериментальное исследование теплообмена при течении жидкого металла в поперечном магнитном поле. [Текст] / В. Г. Жилин [и др.] // Теплофизика процессов горения и охрана окружающей среды. Материалы V и VI Всероссийских научно-технических конференций. — Рыбинск, 2004. — С. 207—208.
72. Использование уникальных научных стендов при создании распределенной учебной лаборатории коллективного доступа [Текст] / под ред. Л. Г. Генин [и др.]. — Янус-К, 2002. — С. 14—17.

73. Liquid metal MHD heat transfer investigations applied to fusion TOKAMAK reactor [Текст] / L. G. Genin [и др.] // Fourth International PAMIR Conf. on MHD. France. — 2000. — С. 763—766.
74. Гидродинамика и теплообмен при течении жидкого металла в круглой трубе в поперечном магнитном поле [Текст] / Л. Г. Генин [и др.] // IV Минский Международный форум. Т. 1. — ММФ, 2000. — С. 439—446.
75. Учебный центр новых информационно - измерительных систем и технологий (ЦНИИСТ) [Текст] / под ред. Т. Е. Краснощекова [и др.]. — Труды конф. «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии NI». ESEA-NI-03, 2003.

Свиридов Евгений Валентинович

Методы и результаты исследования МГД-теплообмена жидкого металла в
вертикальных каналах применительно к созданию систем охлаждения
термоядерного реактора – ТОКАМАКа

Автореф. дис. на соискание ученой степени докт. тех. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 2. Тираж 100 экз.

Типография _____