

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской



академии наук
академик РАН

С.В. Алексеенко

“ 18 ” ноября 2016 г.

О Т З Ы В

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук на диссертацию Мамыкина Андрея Дмитриевича “Турбулентный теплоперенос при конвекции натрия в длинных цилиндрах”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

В диссертации Мамыкина Андрея Дмитриевича систематизированы результаты экспериментальных исследований термогравитационной конвекции расплава натрия в двух металлических цилиндрических полостях, имеющих различные абсолютные и относительные размеры. Эксперименты проведены при дискретном наборе углов наклона цилиндрических полостей относительно вектора силы тяжести. Проведены многоточечные измерения статистических характеристик полей температуры в объеме расплава и изучена их зависимость от перепада температуры между торцами цилиндрических полостей и углов наклона полостей. Разработана методика обработки данных о полях температуры, позволяющая оценить средние скорости конвективного течения и сделать выводы о возможных особенностях пространственной структуры конвективных течений. Интерес к результатам исследований обусловлен широким спектром их практических технологических приложений. С фундаментальной точки зрения интересен вклад в решение проблем, связанных с моделированием процессов термогидродинамики, происходящих в системах с жидкометаллическими теплоносителями.

Актуальность темы работы определяется в первую очередь наличием большого разнообразия технологических процессов и систем с использованием жидкометаллических сред и расплавов с металлическими свойствами (кремний, германий), и необходимостью разработки методов управления режимами

конвективного теплообмена в таких системах. В первую очередь необходимы знания о возможных режимах течения в зависимости от заданных перепадов температуры, размеров и пространственного расположения теплоотдающих и принимающих стенок. Технологическими примерами с подобными жидкими средами являются конвективные процессы в тиглях в методах Бриджмена-Стокбаргера и Чохральского с донным, боковым и донно-боковым нагревом, используемых для получения совершенных монокристаллов. Есть варианты ампульных технологий получения монокристаллов с произвольной ориентацией контейнеров с расплавами относительно вектора силы тяжести. Полученные в работе данные могут быть полезными при анализе процессов конвективного теплообмена и в технологиях непрерывного получения слитков (например, непрерывная разливка стали). Но наиболее очевидная необходимость исследований тепло-массообмена в жидких металлах обусловлена применением легкоплавких металлов в качестве теплоносителей в ядерных энергетических установках. Рабочее вещество в данных исследованиях – натрий используется в качестве теплоносителя в реакторных установках на быстрых нейтронах. В конструкции реакторных установок заложен принцип достаточно эффективного отвода тепла из активной зоны в режиме свободной конвекции натрия даже в отсутствие вынужденной прокачки. Поэтому востребованы результаты экспериментальных исследований свободной конвекции натрия в конвективных петлях и в длинных замкнутых цилиндрических полостях, ориентированных под различными углами к направлению силы тяжести.

Связь работы с планами отраслей науки и народного хозяйства определяется тем, что она выполнялась в соответствии с заданиями по программам:

1. Договор 54-4 с ОАО «ОКБМ Африкантов» «Экспериментальное исследование характеристик конвективного течения натрия в цилиндрическом канале».
2. Грант РФФИ 13-01-96042 р_урал_a «Течение жидкого металла в цилиндрическом канале при наличии и отсутствии конвекции и взаимодействия с магнитным полем».
3. РФФИ 16-01-00459а «Турбулентная конвекция жидкого натрия».

Структура и содержание диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, содержащих обзор литературы и основные результаты, заключения и списка литературы, содержащего 124 наименования.

Во введении, кратко обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, перечислены полученные в диссертации новые результаты, их практическая ценность, а также описана структура диссертации.

В первой главе приведен обзор работ по теме диссертации и сформулирована цель исследований. В качестве базовой задачи рассмотрена турбулентная конвекция Рэлея-Бенара в полостях цилиндрической геометрии с равномерным подогревом снизу. Представлены результаты теорий, обобщающих имеющиеся данные экспериментальных и численных исследований. Обсуждаются результаты исследований влияния геометрии полости и её ориентации относительно вектора силы тяжести на структуру течения и закономерности теплообмена. Дан анализ особенностей конвекции в жидких металлах и технологических особенностей измерений характеристик течений жидкометаллических сред и разработанных методов решения возникающих трудностей.

Во второй главе приведено описание рабочих участков экспериментальной установки и системы измерения характеристик потока, методики исследований, особенностей изучения жидкометаллических жидкостей и сложностей, возникающих в экспериментах из-за отклонений от идеальности в задании граничных условий, дан анализ дополнительных факторов, влияющих на пространственную форму конвективных течений и теплообмен. Экспериментальный стенд состоит из двух рабочих участков: два цилиндрических канала с разными отношениями длины к диаметру L/D . Короткий канал с $L/D \approx 5$ имел длину 850 мм и диаметр 168 мм. Длинный канал с $L/D \approx 20$ имел длину 1980 мм, диаметр 96 мм. Оба канала изготовлены из трубы из нержавеющей стали с толщиной стенки 6 мм. С одного торца каждого канала располагался регулируемый горячий теплообменник с электрическим нагревателем. С другого торца канала был установлен холодный теплообменник. Боковые стенки цилиндрических каналов покрыты теплоизоляцией. Установка имеет систему дистанционного контроля и управления параметрами нагрева и охлаждения. Описаны система измерения, способ монтажа датчиков. Кратко описан кросскорреляционный метод оценки средней скорости течения жидкого металла, используя многоточечные измерения температуры.

В третьей главе представлены результаты двух циклов экспериментов для цилиндра с $L/D \approx 5$. В первом цикле изучена зависимость числа Нуссельта от чисел Рэлея и Прандтля при дискретном наборе углов наклона цилиндра (на 0, 2, 45 и 90 градусов от вертикали). Показано, что при всех числах Рэлея теплоперенос наиболее эффективен в наклоненном на 45° цилиндре. Наименее эффективна теплопередача при вертикальном положении полости. Во втором цикле выполнено сравнение результатов трех экспериментов при горизонтальном, наклонном (под углом 45° к вертикали) и вертикальном положении цилиндра при примерно одинаковом значении числа Рэлея (рассчитанного по диаметру полости) $Ra \approx 5 \times 10^6$. При различных углах наклона цилиндра получены распределения относительной температуры и средней скорости по продольной координате. Представлены результаты обработки сигналов от термопар и типичные функции кросскорреляции для трех положений цилиндра. Определены времена задержки между возмущениями температуры на двух соседних термопарах и сделаны выводы о существовании крупномасштабного течения расплава натрия во всей полости. В случае вертикально установленного цилиндра по виду кросскорреляционной функции сделан вывод об отсутствии крупномасштабного течения, захватывающего всю полость. При всех положениях цилиндра получены спектры пульсаций температуры в центральном по высоте сечении. Из анализа спектров сделан вывод, что наиболее развитая турбулентность наблюдается в случае вертикально расположенного цилиндра, при котором интервал со степенным законом, близким к “-5/3” распространяется на полторы декады. В наклоненной на 45° полости уровень турбулентных пульсаций ниже, чем в вертикальной, хотя спектры температуры указывают на интенсивные пульсации в широком диапазоне частот. Спектры пульсаций температуры при горизонтальном положении полости указывают на качественно иной вид течения. Полученная информация использована для объяснения зависимости числа Нуссельта от угла наклона. Максимальные значения числа Нуссельта коррелируют с развитием наиболее интенсивного течения, охватывающего всю полость. Сделан правильный вывод, что в случае горизонтально расположенного цилиндра, крупномасштабная циркуляция менее интенсивна, и мелкомасштабное течение находится в состоянии перехода к турбулентности.

В четвертой главе представлены экспериментальные результаты для цилиндра с относительной длиной $L/D \approx 20$. При трех углах наклона (на 0, 45 и 90 градусов от

вертикали) получена зависимость числа Нуссельта от числа Рэлея в диапазоне $10^6 \leq Ra \leq 6 \times 10^6$. Показано, что наиболее эффективный теплоперенос, также как и в случае с более коротким цилиндром, наблюдается для наклонного (45°) положения. Для случая числа Рэлея $Ra_D \approx 3,4 \times 10^6$ получены распределения значений относительной температуры (для всех трех углов наклона) и средней скорости (для углов 45 и 90 градусов) по продольной координате. Показано, что в наклонном цилиндре средняя скорость крупномасштабного течения почти в два раза выше, чем в горизонтальном. Получены спектры пульсаций температуры в центральном сечении цилиндра, которые показывают, что наиболее развитая турбулентность наблюдается в наклоненном на 45° цилиндре, для которого спектр имеет хорошо различимый участок с наклоном, близким к “ $-5/3$ ”. Амплитуды пульсаций температуры натрия в вертикальном цилиндре немного меньше, чем в наклонном, что обусловлено ослаблением колебаний температуры с частотами от 0.1 Гц и выше. Спектры пульсаций температуры при горизонтальном положении полости имеют качественно иной вид, говорящий об отсутствии в этом случае развитой турбулентности.

При фиксированном значении числа Рэлея $Ra = 2,4 \times 10^6$ исследована зависимость теплопереноса и среднеквадратичных пульсаций температуры от угла наклона длинного цилиндра. Полученные данные подтверждают ранее сделанный вывод, что конвективный теплоперенос определяется в основном скоростью крупномасштабной циркуляции расплава натрия. Турбулентные пульсации максимальны при небольших углах наклона ($\alpha = 20-30^\circ$) и ослабляют поток тепла вдоль канала, хотя в пределе малых углов (вертикальная труба) устойчивой крупномасштабной циркуляции нет и конвективный теплоток, на порядок превышающий молекулярный, обеспечивается только мелкомасштабным (турбулентным) течением.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертации.

Научная новизна работы. В работе впервые экспериментально исследована турбулентная конвекция жидкого натрия в протяженных цилиндрических полостях (при двух значениях отношения длины к диаметру – 5 и 20), расположенных под различными углами наклона от вертикали (от 0 до 90 градусов). Измерены распределения средней температуры по продольной координате и получены спектры пульсаций температуры. Получены зависимости числа Нуссельта и Рейнольдса от чисел Рэлея и Прандтля для длинных цилиндров при различной ориентации

относительно направления вектора силы тяжести. Показано, что конвективный теплоперенос в относительно длинных цилиндрах при умеренных числах Рэлея определяется, в основном, скоростью крупномасштабной циркуляции расплава натрия и более эффективен в наклоненных цилиндрах – в этом случае развивается более выраженное среднее течение при наличии развитой турбулентности. Наиболее подробное исследование зависимости эффективности теплообмена от угла наклона было проведено для цилиндра с отношением длины к диаметру равному примерно 20: число Нуссельта в исследованном диапазоне углов наклона изменяется на порядок с максимумом в области наклона на 65 градусов от вертикали. Установлено, что в случае более вытянутого цилиндра значения степени в зависимости числа Нуссельта от числа Рэлея больше, чем в случае менее вытянутого, и значительно превосходят известные значения степени для задачи Рэлея-Бенара (когда диаметр цилиндра равен или превосходит его длину) в том же диапазоне чисел Рэлея.

Достоверность результатов обеспечивается использованием апробированных современных методик измерения и обработки данных, детальным теоретическим анализом результатов и сравнением с данными других авторов.

Научная и практическая ценность работы.

Результаты экспериментальных исследований, представленные в диссертации и в публикациях автора диссертации, важны с фундаментальной и с практической точек зрения. Они вносят существенный вклад в развитие знаний о процессах теплообмена в режимах термогравитационной конвекции, происходящих в замкнутых полостях (фрагментах труб) с натриевым теплоносителем при различной ориентации относительно вектора силы тяжести. Полученные зависимости интегрального безразмерного коэффициента теплопередачи от числа Рэлея могут быть использованы для оптимизации различных технологических устройств, верификации и усовершенствования CFD пакетов. Полученные результаты заслуживают внимание специалистов, занимающихся исследованием турбулентной термогравитационной конвекции жидких металлов в вытянутых цилиндрах и трубах.

Полученные экспериментальные данные были использованы для верификации CFD-кодов в ОКБМ "Африкантов", а также для тестирования численных моделей в лаборатории физической гидродинамики ИМСС УрО РАН. Установленные зависимости влияния угла наклона и относительных размеров цилиндрических

полостей на теплоперенос могут быть полезны при проектировании различных технологических устройств. В частности узлов контуров охлаждения нового реактора на быстрых нейтронах БН-1200.

Разработанный метод оценки средней скорости крупномасштабной циркуляции, адаптированный для работы в жидких металлах и основанный на многоточечных измерениях характеристик поля температуры, может быть рекомендован для использования в других исследованиях течений жидкометаллических сред.

По рецензируемой диссертации необходимо сделать следующие **замечания**:

1. В главе 1 – в обзоре литературы в качестве основной исходной задачи подробно анализируются результаты проведенных исследований Рэлей-Бенаровской конвекции. Но, во-первых, конвекция в высоких цилиндрических полостях, подогреваемых снизу, особенно при больших отношении длины к диаметру, имеет специфику, характерную для длинных каналов и на которую обратили внимание и выделили в отдельную задачу Г.З. Гершуни и Е.М. Жуховицкий в монографиях 1972г и 1989г, а еще раньше Г.А. Остроумов в монографии 1952г. Во-вторых, не случайно конвекция в наклоненных слоях Г.З. Гершуни и Е.М. Жуховицким в своих монографиях и оригинальных работах (как и многими другими авторами) выделена в отдельный класс задач. В главе 1 нет четкого и ясного обозначения отличий пространственных форм течений в вертикальных и наклоненных на различные углы от вертикали длинных полостях. А отличия пространственных форм и интенсивностей течения приводят к существенным отличиям процессов ламинарно-турбулентных переходов и параметров вторичных течений в режимах трехмерных нестационарных (турбулентных) течений. Течения в вытянутых по горизонтали полостях с продольным градиентом температуры на границах и с торцевыми вертикальными стенками, нагретыми до разных температур, так же выделены в отдельный класс задач, в которых структура течений и процессы ламинарно-турбулентного перехода, механизмы генерации вторичных течений зависят от граничных условий на горизонтальных границах. Это в обзоре не обсуждается. Это важный момент, потому что усредненное течение сохраняет свою исходную пространственную форму при переходе к существенно трехмерной и нестационарной локальной структуре.

2. В определениях чисел Рэля во всех главах не понятно почему отсутствует учет угла наклона полостей.

3. В главе 1 встречаются такие некорректные по физическому смыслу выражения: например, на стр.12 “теплопередача эффективней конвекции”, “перенос тепла за счет конвекции становится более эффективным, чем теплопередача”, “Характерная скорость может быть определена ... через ... величину поля скорости в различных точках, ... через время оборота или по пикам на спектре температурных пульсаций”.

Все, что написано о физическом смысле числа Рейнольдса и целесообразности его расчета на стр. 12-13, изложено сумбурно, нелогично и из текста непонятно зачем. В то же время четкое определение числа Рейнольдса необходимо, так как оно используется в главах 3 и 4 и характеризует интенсивность средних течений в анализируемых задачах. Оно должно было присутствовать в неправильно записанной формуле (1.15).

4. В главе 2 при описании рабочих участков неоправданно много внимания уделено описанию второстепенных деталей, но нет конкретных данных, позволяющих оценить эффективность теплоизоляции, потери тепла с горячего теплообменника, градиенты температуры и перетечки тепла вдоль стенок нержавеющей труб. Эти данные и оценки определяют достоверность оценок чисел Нуссельта в различных режимах течения. Параметры термопарных датчиков – их чувствительность в рабочих диапазонах температуры в $\mu\text{В/К}$ и точность измерения ТЭДС, процедуры определения частотных характеристик термопарных датчиков в металлических чехлах не описаны и не указаны. Влияние температуры холодных концов термопар на точность измерений не обсуждается. В результате не понятно насколько точно контролируется и измеряется температура стенок и в центре слоя, насколько стабильно поддерживаются граничные условия? Оценки продольных градиентов температуры на стенках необходимы для понимания причин потери устойчивости в пограничных слоях при наклоне полостей и оценок волновых чисел вторичных течений (особенно при горизонтальном положении полости).

5. Методика определения характеристик поля скорости по результатам измерений характеристик полей температуры заслуживает более подробного описания и обоснования. В тексте диссертации и автореферата указано, что параллельно были проведены численные исследования в близких режимах течения. Поэтому было бы естественно привести полученные численные данные о средних скоростях, о пространственных характеристиках и скоростях переноса вторичных течений.

Сопоставление с примерами аналоговых записей сигналов (подобных представленным на рис.3.6) и обоснование выбора полосы пропускания при фильтрации (см. стр. 73-75) тоже были бы полезны при обосновании достоверности результатов анализа.

6. В автореферате, в главе 3 на стр.83-85, в главе 4 на стр.107 есть абсолютно неверное утверждение “При горизонтальном положении *поперечный теплоперенос происходит главным образом за счет теплопроводности, что приводит к стратификации температуры натрия* (в верхней части полости течет “горячий” натрий, а в нижней – “холодный”) и, как следствие, к заметному отличию показаний термопар F4 и B2.” Всем занимающимся свободной конвекцией хорошо известно и понятно, что возникающее конвективное течение выносит горячую жидкость в верхнюю часть полости, а холодную вниз. Следствием этого является устойчивая стратификация текучей среды. И жидкий натрий в данном случае ничем не отличается от других жидкостей.

7. На стр.21 рис1.1 естественно назвать диаграммой существования различных режимов, но никак не фазовой диаграммой. Кроме того рисунок дан в таком масштабе и без пояснений значков, что его понять достаточно трудно. На стр. 100 рис.3.11 оформлен так, что прочесть параметры невозможно.

8. Приведенные в главах 3 и 4 степенные зависимости чисел Нуссельта от чисел Рэлея и Прандтля получены экспериментально, поэтому требуется указывать их точность. Вопрос о погрешностях измерений в работе вообще не обсуждается.

Сформулированные выше замечания не снижают ценности диссертационной работы в целом. Несмотря на замечания экспериментальные результаты, полученные в работе, являются уникальными и достоверными, а основные выводы являются обоснованными. Автореферат отражает содержание диссертации. Материалы диссертации прошли хорошую апробацию на большом числе авторитетных международных и всероссийских конференций. Основные результаты диссертации опубликованы в 17 работах, включая 4 статьи в журналах из списка ВАК, 3 статьи в трудах международных и российских конференций, и 10 в тезисах докладов. Публикации соответствуют теме диссертационного исследования и раскрывают основные положения всех содержательных глав диссертации. Рукопись диссертации в целом написана достаточно ясным языком. Автор диссертации владеет материалом и

является квалифицированным специалистом в данной области науки. Серьезных замечаний по оформлению диссертации и автореферата диссертации нет.

Заключение. На основании анализа представленных в диссертации А.Д. Мамыкина материалов можно сделать обоснованное заключение о том, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи экспериментального исследования влияния жидкометаллических свойств текучей среды на режимы конвективного течения и теплообмена, имеющей существенное значение для отрасли знаний - механика жидкости, газа и плазмы в области термогравитационной конвекции. Работа соответствует требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ, 24.09.2013), а автор диссертации Андрей Дмитриевич Мамыкин, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа А.Д. Мамыкина полностью заслушана на семинаре отдела физической гидродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (протокол №__7__ от «_25_» _октября_ 2016 г.). Настоящий отзыв составлен на основании решения семинара и с учетом сделанных по диссертации замечаний.

Отзыв подготовил:

Заведующий лабораторией
свободноконвективного теплообмена

ИТ СО РАН, д.ф.-м.н.

18 ноября 2016 г.

Подпись В.С. Бердникова удостоверяю:

Ученый секретарь ИТ СО РАН,

д.ф.-м.н.



Бердников Владимир Степанович



Куйбин Павел Анатольевич

Сведения о лицах, подписавших отзыв:

1. Алексеенко Сергей Владимирович, директор ИТ СО РАН, профессор,

академик РАН, доктор физико-математических наук, диссертация защищена по специальности 01.04.14 <Волновое течение пленок жидкости>. Адрес: 630090, Новосибирск-90, пр. ак. Лаврентьева, 1, тел. (383) 330-70-50, e-mail: aleks@itp.nsc.ru.

2. Бердников Владимир Степанович, заведующий лабораторией свободноконвективного теплообмена ИТ СО РАН, доктор физико-математических наук, диссертация защищена по специальности 01.02.05 <Структура течений и теплообмен у поверхностей различной ориентации в режимах свободной и смешанной конвекции>. Адрес: 630090, Новосибирск-90, пр. ак. Лаврентьева, 1, контактный телефон: 8 (383) 316 53 32, e-mail: berdnikov@itp.nsc.ru.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН). Адрес организации: 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1. Телефон: +7 (383) 330-70-50. E-mail: aleks@itp.nsc.ru. Web-сайт: <http://www.itp.nsc.ru>