

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.012.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 08.12.2016 № 140

О присуждении *Мамыкину Андрею Дмитриевичу*, гражданину России,
ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Турбулентный теплоперенос при конвекции натрия в длинных цилиндрах» по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 06 октября 2016 г., протокол № 128, диссертационным советом Д 004.012.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева 1, утвержденном приказом Минобрнауки России от 11.04.2012 № 105/нк.

Соискатель Мамыкин Андрей Дмитриевич 1990 г. рождения, в 2012 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Пермский государственный национальный исследовательский университет (ФГБОУ ВПО ПГНИУ) по специальности «Радиофизика и электроника». С 11.2012 по 10.2016 обучался в очной аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИМСС УрО РАН). Работает младшим научным сотрудником лаборатории Физической гидродинамики ИМСС УрО РАН. Диссертация выполнена в лаборатории Физической гидродинамики ИМСС УрО РАН.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Физической гидродинамики ИМСС УрО РАН Фрик Пётр Готлобович.

Официальные оппоненты:

1) Свиридов Валентин Георгиевич, доктор технических наук, профессор кафедры инженерной теплофизики имени В.А. Кириллина, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (г. Москва);

2) Перминов Анатолий Викторович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (г. Пермь),

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института теплофизики им. С.С.Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТФ СО РАН), г. Новосибирск, в своем положительном заключении, подписанном Бердниковым Владимиром Степановичем, заведующим лабораторией свободно-

конвективного теплообмена ИТ СО РАН, доктором физико-математических наук, и утвержденном на семинаре отдела физической гидродинамики ФГБУН ИТ СО РАН (протокол № 7 от «25» октября 2016 г.), указала, что диссертация А.Д.Мамыкина 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 А.Д.Мамыкин заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Соискателем опубликовано 17 научных работ, из них 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки. В работах представлены результаты экспериментального исследования турбулентного теплопереноса при конвекции натрия в замкнутых цилиндрических полостях (отношения длины к диаметру – 5 и 20.6), расположенных под различными углами к направлению силы тяжести. Получены зависимости числа Нуссельта и Рейнольдса от чисел Релея, Прандтля и Грасгофа. Показано, что конвективный теплоперенос в протяженных цилиндрах определяется, в основном, скоростью крупномасштабной циркуляции натрия и более эффективен в наклоненных цилиндрах – в этом случае развивается выраженное течение на фоне развитой турбулентности. Проведено подробное исследование зависимости эффективности теплообмена от угла наклона для цилиндра с отношением длины к диаметру равному 20.6: число Нуссельта в рассматриваемом диапазоне углов наклона изменяется на порядок с максимумом в области наклона 65 градусов от вертикали.

Наиболее значительные работы:

1. Колесниченко И.В., Мамыкин А.Д., Павлинов А.М., Пахолков В.В., Рогожкин С.А., Фрик П.Г., Халилов Р.И., Шепелев С.Ф. Экспериментальное исследование свободной конвекции натрия в длинном цилиндре // Теплоэнергетика. 2015. № 6. С. 31-39.
2. Васильев А.Ю., Колесниченко И.В., Мамыкин А.Д., Фрик П.Г., Халилов Р.И., Рогожкин С.А., Пахолков В.В. Турбулентный конвективный теплообмен в наклонной трубе, заполненной натрием // Журнал Технической Физики. 2015. Т. 85. № 9. С. 45-49.
3. Frick P., Khalilov R., Kolesnichenko I., Mamykin A., Pakholkov V., Pavlinov A., Rogozhkin S. Turbulent convective heat transfer in a long cylinder with liquid sodium // Europhysical Letters. 2015. Vol. 109. № 1. P. 14002.
4. Mamykin A., Frick P., Khalilov R., Kolesnichenko I., Pakholkov V., Rogozhkin S., Vasiliev A. Turbulent convective heat transfer in an inclined tube with liquid sodium // Magnetohydrodynamics. 2015. Vol. 51. № 2. P. 329-336.

На диссертацию поступили отзывы от ведущей организации и оппонентов.

1) Положительный отзыв ведущей организации утвержден директором ФГБУН ИТФ СО РАН, д.ф.-м.н., профессором, академиком РАН С.В.Алексеевко. В отзыве отмечается актуальность темы диссертации, связь работы с планами отраслей науки и народного хозяйства, научная новизна работы, достоверность результатов, научная и практическая ценность. Ведущая организация в отзыве приводит несколько замечаний:

- 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 отношениях длины к диаметру, имеет специфику, характерную для длинных каналов. Во-вторых, не случайно конвекция в наклоненных слоях 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.
- В определениях чисел Рэля отсутствует учет угла наклона полостей.
- В главе 1 встречаются некорректные по физическому смыслу выражения. 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).
- 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 термомпарных датчиков – их чувствительность в рабочих диапазонах температуры в $\mu\text{В/К}$ и точность измерения ТЭДС, процедуры определения частотных характеристик термомпарных датчиков в металлических чехлах не описаны и не указаны. Влияние температуры холодных концов термомпар на точность измерений не обсуждается. 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).
- 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 численно 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.

- 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.” Между тем, возникающее конвективное течение выносит горячую жидкость в верхнюю часть полости, а холодную вниз, создавая устойчивую стратификация текучей среды. И жидкий натрий в данном случае ничем не отличается от других жидкостей.
- На стр.21 рис.1.1 естественно назвать диаграммой существования различных режимов, а не фазовой диаграммой. Рисунок дан в таком масштабе и без пояснений значков, что его понять трудно. Рис.3.11 оформлен так, что прочитать параметры невозможно.
- 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.

2) Положительный отзыв официального оппонента В.Г.Свиридова. В нем отмечается, что тема диссертации является весьма актуальной и практически важной, проведенные диссертантом исследования обладают необходимой для диссертации научной новизной, теоретической и практической значимостью, а результаты являются обоснованными и достоверными. Оппонент отмечает следующие замечания:

- По мнению оппонента, физические выводы в работе вполне разумны, однако построены на ограниченном экспериментальном материале, а именно – на температурных измерениях и корреляционных измерениях термопарами, помещенными в фиксированные точки потока. К сожалению, не удалось применить кондукционные датчики скорости из-за влияния термо-ЭДС на показания датчиков. Однако в списке литературы приведена работа МЭИ, в которой успешно применены кондукционные датчики с компенсацией термо-ЭДС. Хотелось бы посоветовать автору использовать опыт коллег из МЭИ в дальнейших экспериментах.
- В тексте диссертации не приведены графики тарировки и АЧХ термопар, а также не сделана оценка точности определения скорости по методу кросскорреляции. Для применения кросскорреляционного метода измерения скорости термопары установлены слишком далеко друг от друга. Поэтому измерялся скорее средний расход натрия.
- В тексте диссертации не приведено однозначного объяснения того, что наиболее эффективный теплообмен (максимальное число Нуссельта) регистрируется при наклоне цилиндра на 65 градусов от вертикали с физической точки зрения.

3) Положительный отзыв официального оппонента А.В.Перминова. В отзыве указано, что работа является оригинальным законченным научным исследованием. Отмечена актуальность, новизна, научная и практическая значимость, а также достоверность полученных результатов. Оппонент приводит следующие замечания:

- Каков конкретный вклад диссертанта в написание статей относящихся к так называемому списку ВАК.

- В диссертации для измерения скорости крупномасштабной циркуляции применялся метод кросскорреляционного анализа. На стр. 47 приводится общий вид кросскорреляционной функции, без достаточных пояснений. Например, не поясняется смысл индексов m и n . Далее строятся графики зависимости кросскорреляционной функции от времени (см. рис. 3.4 и 4.3) из которых делаются выводы о скорости и структуре крупномасштабной циркуляции. Процедуры построения этих графиков и методы их анализа описаны в диссертации очень не внятно.
- В таблицах 3.1 и 4.1 приведены значения чисел Прандтля, Релея и Грасгофа, которые определяются через материальные параметры среды, зависящие, очевидно, от температуры. В частности, эта зависимость видна из представленных в таблицах значений числа Прандтля. Из текста диссертации не ясно, как определялись, значения вязкости и температуропроводности в различных режимах при различных температурах.
- На рис. 3.7 и 4.4 приведены «спектральные плотности энергии пульсаций температуры». Использованный термин «энергия пульсаций температуры», на взгляд оппонента, не корректен. Если вспомнить физический смысл температуры, то получается, что на графиках приведена «спектральная плотность энергии пульсаций энергии». В диссертации не поясняется, каким образом измеренные значения температуры пересчитываются в энергию. Исходя из размерности, приведенной на графиках, «спектральная плотность энергии пульсаций температуры» пропорциональна квадрату температуры умноженному на время. Каков коэффициент пропорциональности?
- В тексте диссертации присутствуют в достаточно большом количестве орфографические и стилистические ошибки.

На автореферат поступило 5 отзывов:

1) Положительный отзыв от к.ф.-м.н., зав. кафедрой радиоэлектроники и защиты информации ФГБОУ ВПО Пермский государственный национальный исследовательский университет Лунегова И.В.;

2) Положительный отзыв от д.ф.-м.н., зав. кафедрой теоретической физики ФГБОУ ВПО Пермский государственный национальный исследовательский университет Демина В.А.;

3) Положительный отзыв от к.ф.-м.н., декана физического факультета ФГБОУ ВО Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет Полежаева Д.А.;

4) Положительный отзыв от д.ф.-м.н., зав. кафедрой гидроаэродинамика, горение и теплообмен ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого Смирнова Е.М.;

5) Положительный отзыв от к.т.н., научного сотрудника ФГБУН Объединенного института высоких температур РАН Теплякова И.О.

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

- В тексте автореферата применительно к рис.4б был применен термин «расширенная функция кросскорреляции», значение которого не было раскрыто. Для более ясного понимания данного рисунка, хотелось бы знать его четкое определение.
- В автореферате не отражено, на какие работы опирался автор при работе над диссертацией. Обычно в автореферате их приводят в разделах, связанных с актуальностью

работы или при описании постановки задачи. Как правило, это 3-4 базовые работы, из которых «выросла» диссертация.

- В подписи к рис.4 перепутаны описания графиков 4б и 4в. В описании кросскорреляционных функций отсутствует информация о том, при каких условиях они получены.
- В начале автореферата при обсуждении научной новизны работы автор указывает на то, что им получены зависимости числа Рейнольдса от других безразмерных параметров. В диссертации такие результаты приведены, в автореферате нет. Возможно, учитывая содержание пункта «Научная новизна работы», следовало и в автореферате привести данные о числах Рейнольдса.
- Сопоставляя рис.3а и рис.3б, можно заключить, что при варьировании числа Рейлея, число Прандтля изменялось весьма существенно. Было бы желательно в автореферате дать информацию о диапазоне изменения средних температур и числа Прандтля в проведенных экспериментах.
- В работе использовались различные методы измерения скорости – ультразвуковой и корреляционный, но ничего не сказано о погрешности проведенных измерений.
- Эксперименты были проведены при отношениях длины цилиндра к диаметру 5 и 20. Не сказано, чем обусловлен такой выбор. Можно ли экстраполировать полученные результаты на другие отношения?
- В работе говорится, что экспериментальные результаты были использованы для верификации расчетов, но сравнения не приведено.

Вместе с тем, в положительных отзывах отмечено, что диссертация является завершенным научно-квалификационным исследованием, представляющим научный и практический интерес, тема работы является актуальной, полученные результаты достоверны и имеют высокую научную ценность.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются известными ведущими специалистами в области гидродинамики, имеют публикации по данному направлению в рецензируемых научных изданиях, обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация ФГБУН ИТ СО РАН хорошо известна своими достижениями в области механики жидкости и газа, в институте активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования в области гидродинамики.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны средства измерения температуры и скорости потоков, адаптированные для работы в химически агрессивных непрозрачных средах и реализованные на примере жидкого натрия;

экспериментально выявлена зависимость эффективности теплообмена в цилиндрическом контейнере с жидким натрием от угла его наклона относительно силы тяжести и **предложена** физическая интерпретация;

доказано, что конвективный теплоперенос в жидких металлах в относительно длинных цилиндрах при умеренных числах Релея определяется, в основном, скоростью крупномасштабной циркуляции натрия и более эффективен в наклоненных цилиндрах;

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано:

– в длинных замкнутых полостях конвективный теплоперенос в жидких металлах определяется интенсивностью крупномасштабной циркуляции и интенсивностью мелкомасштабной турбулентности;

– для цилиндра с отношением длины к диаметру 20 число Нуссельта в исследованном диапазоне углов наклона изменяется на порядок с максимумом в области наклона 65 градусов от вертикали;

– в случае более протяженного цилиндра значения степени в зависимости числа Нуссельта от числа Релея больше, чем в случае менее протяженного, и значительно превосходят известные значения степени для задачи Релея-Бенара (диаметр цилиндра равен или превосходит его длину) в таком же диапазоне чисел Релея.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов)

использованы современные экспериментальные методы исследования теплопереноса в условиях развитой турбулентной конвекции при малых числах Прандтля;

изложены новые результаты, устанавливающие для случая жидкого натрия существенную зависимость средней скорости крупномасштабной циркуляции, интенсивности турбулентности, а также величины теплового потока вдоль цилиндра, от угла наклона;

раскрыты особенности влияния интенсивности крупномасштабного вихря на конвективный теплоперенос в относительно длинных цилиндрах при умеренных числах Релея.

изучены зависимости числа Нуссельта и Рейнольдса от чисел Релея, Прандтля и Грасгофа для длинных цилиндров при различной ориентации к направлению силы тяжести и определены степенные показатели;

проведена модернизация холодного торцевого теплообменника, позволившая в несколько раз поднять его тепловую мощность и, следовательно, достичь больших чисел Релея.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработана методика проведения экспериментов по исследованию турбулентных конвективных течений в химически агрессивной непрозрачной среде – жидком натрии;

определена зависимость эффективности теплообмена вдоль цилиндров с разными аспектными отношениями от угла их наклона относительно силы тяжести;

создана методика эксперимента для определения средних по времени и объему значений скорости крупномасштабных течений жидкого натрия при помощи кросскорреляционного анализа температурных сигналов;

представлены результаты экспериментального исследования турбулентного теплопереноса при конвекции натрия в замкнутых цилиндрических полостях, расположенных под различными углами к направлению силы тяжести, пригодные для верификации численных кодов, применяемых, в том числе, на предприятиях атомной энергетики.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

экспериментальные результаты получены при помощи термопарных измерений, проведенных с использованием калиброванных термопар;

теория развитой турбулентной конвекции основана на фундаментальных представлениях о свободной конвекции в природе и технологических устройствах и подкреплена множеством экспериментальных и численных работ;

идея базируется на обобщении имеющегося опыта теплофизических измерений в жидких металлах, изучения турбулентной конвекции в замкнутых полостях и конвективного теплопереноса в технологических устройствах;

использованы современные экспериментальные методики и программные комплексы для обработки полученных данных;

установлено качественное соответствие полученной в работе зависимости эффективности теплопереноса от угла наклона с закономерностями, зафиксированными в ряде экспериментальных и численных работ.

Личный вклад соискателя состоит в участии в конструировании и монтаже экспериментальных установок. Им выполнены монтаж и настройка систем измерения. Соискатель принимал участие во всех экспериментах, отвечая за регистрацию и обработку данных термопарных измерений, лично участвовал в анализе всех полученных данных и подготовке публикаций.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием плана исследований, обладающего понятной внутренней логикой; постановкой проблем сначала в общей форме, а затем расщеплением их на последовательность частных задач.

На заседании 8 декабря 2016 г. диссертационный совет принял решение присудить Мамыкину А.Д. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящего в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 17, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель
диссертационного совета



/Матвеенко Валерий Павлович

Ученый секретарь
диссертационного совета

/Зуев Андрей Леонидович

08.12.2016 г.