

На правах рукописи

**Мамыкин Андрей Дмитриевич**

**ТУРБУЛЕНТНЫЙ ТЕПЛОПЕРЕНОС ПРИ КОНВЕКЦИИ НАТРИЯ В  
ДЛИННЫХ ЦИЛИНДРАХ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор Фрик Петр Готлобович

**Официальные оппоненты:** Свиридов Валентин Георгиевич,  
доктор технических наук, профессор,  
Московский энергетический институт

Перминов Анатолий Викторович,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент, Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет

Ведущая организация: Институт Теплофизики им.  
С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Защита состоится “8” декабря 2016 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.012.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Акад. Королева, 1; тел: (342) 2378461; факс: (342) 2378487; сайт: [www.icmm.ru](http://www.icmm.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института механики сплошных сред УрО РАН.

Автореферат разослан “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, доцент



/Зуев А.Л.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Теплоперенос в жидких средах посредством турбулентной конвекции широко распространен и в природе, и в технологических процессах. Интерес к тепломассопереносу в жидких металлах вызван как задачами металлургии, так и применением металлов в качестве теплоносителей в ядерных, термоядерных и космических энергетических установках и теплообменниках. Натрий используется в качестве теплоносителя в реакторных установках (РУ) на быстрых нейтронах. По опыту эксплуатации отечественных РУ БН-350 и БН-600 известно, что при определенной компоновке трубопроводов в них может возникать свободная конвекция натрия, приводящая к прогреву трубопроводов и существенному теплотоку даже в отсутствие прокачки. В этой связи чрезвычайно востребованными становятся результаты экспериментальных исследований свободной конвекции натрия в длинных замкнутых цилиндрических сосудах, ориентированных под различными углами к направлению силы тяжести. Результаты таких исследований могут быть использованы как при проектировании новых РУ, так и при верификации расчетных кодов (CFD), используемых в атомной энергетике.

Переносу тепла при турбулентной конвекции в замкнутых полостях посвящено огромное число работ. Анализ результатов исследования конвекции Рэля-Бенара в вертикальном цилиндре, высота которого равна диаметру, показывает, что даже для этой простой и наиболее изученной геометрии на плоскости параметров число Рэля – число Прандтля можно выделить до десятка областей, отличающихся характером тепломассопереноса в пограничных слоях и ядре и приводящих, в результате, к различным зависимостям числа Нуссельта (являющегося мерой интенсивности конвективного теплопереноса) от чисел Рэля и Прандтля. Для длинных каналов наблюдается сильная зависимость интенсивности теплопереноса вдоль канала от угла наклона. Случай малых чисел Прандтля (жидкие металлы, для которых  $Pr \sim 0.01$  и менее) остается наименее изученным даже для коротких цилиндров, а работы по свободной конвекции жидких металлов в длинных цилиндрах отсутствуют.

**Целью работы** является экспериментальное изучение турбулентного теплопереноса при конвекции натрия в замкнутых цилиндрических полостях, расположенных под различными углами к направлению силы тяжести.

### **Научная новизна работы**

1. Экспериментально исследована турбулентная конвекция жидкого натрия в протяженных цилиндрических полостях (отношения длины к диаметру – 5 и 20), расположенных под различными углами к вертикали (от 0 до 90 градусов).
2. Получены зависимости числа Нуссельта и Рейнольдса от чисел Рэля, Прандтля и Грасгофа для длинных цилиндров при различной ориентации к направлению силы тяжести.

3. Показано, что конвективный теплоперенос в относительно длинных цилиндрах при умеренных числах Релея определяется, в основном, скоростью крупномасштабной циркуляции натрия и более эффективен в наклоненных цилиндрах – в этом случае развивается выраженное течение на фоне развитой турбулентности. Подробное исследование зависимости эффективности теплообмена от угла наклона было проведено для цилиндра с отношением длины к диаметру равному 20: число Нуссельта в исследованном диапазоне углов наклона изменяется на порядок с максимумом в области наклона 65 градусов от вертикали.
4. Установлено, что 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.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Результаты экспериментального исследования турбулентной конвекции жидкого натрия в двух протяженных цилиндрических полостях.
2. Метод оценки средней скорости крупномасштабной циркуляции, адаптированный для работы в жидких металлах.
3. Степенные зависимости числа Нуссельта от числа Релея, полученные для различных ориентаций цилиндров с разными аспектными отношениями.
4. Вывод о сильной зависимости средней скорости крупномасштабной циркуляции, интенсивности турбулентности, а также величины тепловой мощности, передаваемой вдоль цилиндра, от угла наклона.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Полученные экспериментальные данные были использованы для верификации CFD-кодов в ОКБМ "Африкантов", а также для тестирования численных моделей в лаборатории физической гидродинамики ИМСС.
2. Установленные зависимости влияния угла наклона и аспектного отношения на теплоперенос могут быть полезны при проектировании различных технологических устройств. В частности узлов контуров охлаждения нового реактора на быстрых нейтронах БН-1200.

#### **Методология и методы исследования**

Вся экспериментальная информация была построена на измерении поля температуры. Для получения данных о температуре жидкого натрия использовались хромель-алюмелевые термопары как фабричного, так и самостоятельного изготовления. Для измерения пульсаций скорости жидкого натрия предусматривалось применение ультразвукового доплеровского анемометра DOP2000 (SignalProcessing, Швейцария) с датчиком TR30405, а также кондукционных датчиков скорости, модифицированных для работы в агрессивной среде при высоких температурах. Однако достоверные данные

по оценке средней по времени скорости крупномасштабной циркуляции натрия удалось осуществить только с помощью кросскорреляционного анализа сигналов температурных датчиков. Сбор данных с датчиков температуры производился измерительными платами с температурной компенсацией NI-9213, установленными в шасси NI cDAQ-9188, позволяющее одновременный сбор данных со всех датчиков с частотой 75 Гц.

**Обоснованность и достоверность** результатов обеспечивается тщательным тестированием методов измерений, использованием качественного измерительного оборудования, а также сравнением там, где это возможно, с экспериментами и теоретическими результатами других авторов.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях: Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 2013, 2015 гг.); Международная конференция «Lomonosov-2013» (Москва, 2013 г.); Пермские гидродинамические научные чтения (Пермь, 2013, 2014, 2015 гг.); Международная конференция «9-th International PAMIR conference on Fundamental and Applied MHD, Thermo Acoustic and Space Technologies» (Рига, Латвия, 2014 г.); Проблемы механики и материаловедения (Ижевск, 2014 г.); Международная конференция «15-th European turbulence conference» (Дельфт, Нидерланды, 2015 г.); Международная конференция «3-rd International Workshop on Measuring Techniques for Liquid Metal Flows» (Дрезден, Германия, 2015 г.); Международная конференция «Russian conference on Magnetohydrodynamics» (Пермь, 2015 г.); Международная конференция «International Conference on Rayleigh-Benard Turbulence» (Гёттинген, Германия, 2015 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 17 работ, из них 4 в журналах из списка ВАК, 3 статьи в трудах международных и российских конференций, и 10 в тезисах докладов.

**Личный вклад автора.** Автор диссертации лично участвовал в конструировании и монтаже обеих экспериментальных установок. Им выполнены монтаж и настройка систем измерения. Ввиду сложности и небезопасности работы с жидким натрием при высоких температурах, все эксперименты проводились командой, состоящей не менее чем из 4 человек. Автор принимал участие во всех экспериментах, отвечая за регистрацию и обработку данных термометрических измерений. Автором проведен анализ полученных данных и принято участие в подготовке к публикации всех статей.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 124 наименования. Полный объем диссертации 145 страниц, 42 рисунка и 4 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** 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** представлен обзор публикаций, близких к теме диссертации. Рассмотрены особенности развитой турбулентной конвекции Релея-Бенара, а также различные теории, задача которых обобщить накопленные экспериментальные и численные данные и установить строгие закономерности. Изучен вопрос о влиянии геометрии полости и её ориентации к силе тяжести на структуру течения и теплоперенос. Изложено обсуждение особенностей конвекции в жидких металлах, а также сложностей, возникающих при измерении характеристик потока и путей их преодоления.

**Вторая глава** посвящена описанию экспериментальной установки и системы измерения характеристик потока. Экспериментальная установка включает два цилиндрических канала с разными аспектными отношениями:

- «короткий» канал ( $\Gamma^* = L / D \approx 5$ ): длина 850 мм, диаметр 168 мм (рис.1);
- «длинный» канал ( $\Gamma^* = L / D \approx 20$ ): длина 1980 мм, диаметр 96 мм (рис.2).

Оба канала изготовлены из толстостенной трубы (6 мм) из нержавеющей стали. С одного торца каждого канала располагается регулируемый горячий теплообменник с электрическим нагревателем. С другого торца канала установлен холодный теплообменник: в случае короткого цилиндра – жидкостный, подключаемый к внешнему термостату, а в случае длинного – воздушный игольчатого типа. Боковая стенка цилиндрического канала покрыта теплоизоляцией. Установка имеет систему дистанционного контроля и управления параметрами нагрева и охлаждения. Подробно описаны система измерения, способ монтажа датчиков, а также кросскорреляционный метод оценки средней скорости крупномасштабной циркуляции пригодный для использования в жидких металлах.

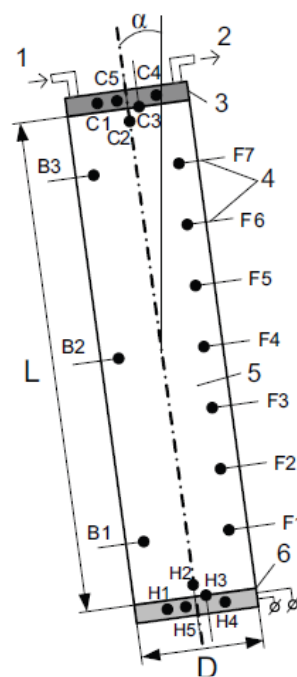


Рис. 1. Схема короткого цилиндра: 1, 2 – вход и выход масла, 3 – холодильник, 4 – датчики температуры, 5 – натрий, 6 – нагреватель.

В третьей главе представлены результаты двух циклов экспериментов для цилиндра с  $\Gamma^* = 5$ . Управляющими параметрами в рассматриваемой задаче являются: число Прандтля  $Pr$ , число Релея  $Ra$  и аспектное соотношение  $\Gamma^*$

$$Pr = \frac{\nu}{\chi}, Ra_D = \frac{g\beta D^3 \Delta T}{\nu\chi}, \Gamma^* = \frac{L}{D},$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\beta$  – коэффициент теплового расширения,  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $\chi$  – температуропроводность и  $\Delta T$  – перепад температуры между теплообменниками, определенный по термопарам H2-C2. В качестве характерного размера при определении числа Релея используется диаметр цилиндра  $D$  по причине того, что при рассмотрении длинных каналов важным становится продольный градиент. Кроме того, при расчете числа Релея через длину полости  $L$ , в цилиндре с  $\Gamma^*=20$  получается явное завышение его численного значения. Характеристикой конвективного теплообмена является число Нуссельта

$$Nu = \frac{4(Q - Q_l)L}{\pi D^2 \lambda \Delta T},$$

где  $\lambda$  – теплопроводность натрия,  $Q$  – электрическая мощность, потребляемая нагревателем для поддержания заданной разности температуры  $\Delta T$ ,  $Q_l$  – мощность нагревателя, необходимая для поддержания нулевой разности температуры (учет тепловых потерь).

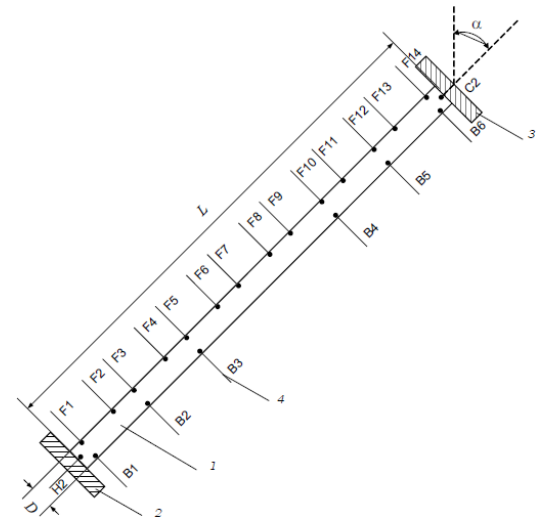


Рис. 2. Схема длинного цилиндра: 1 – натрий, 2 – нагреватель, 3 – холодильник, 4 – датчики температуры.

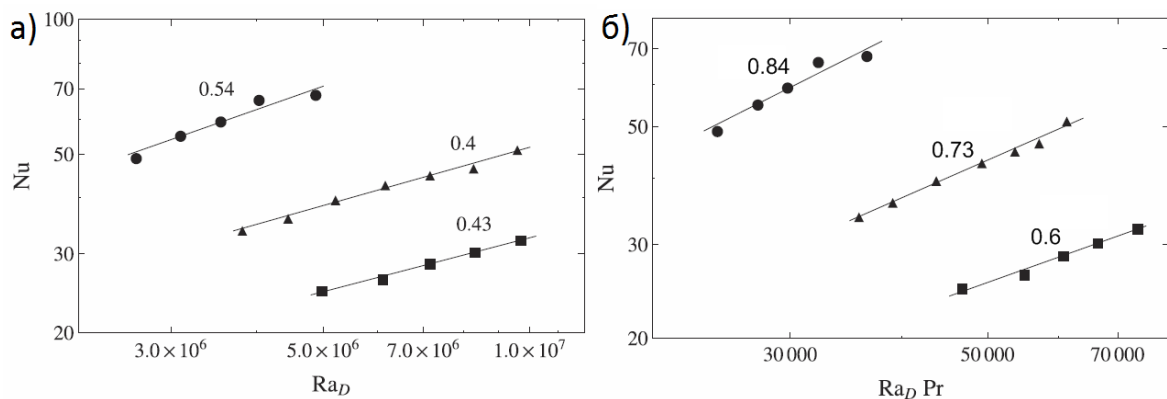


Рис. 3. Зависимости числа Нуссельта от числа Релея (а) и от произведения чисел Релея и Прандтля (б) в логарифмическом масштабе для вертикального (квадраты), наклонного (круги) и горизонтального (треугольники) положений короткого цилиндра.

В первом цикле изучались режимы с разными числами Релея в диапазоне  $(2-10) \cdot 10^6$  для цилиндра, наклоненного на 0, 2, 45 и 90 градусов от вертикали. Для всех положений цилиндра построены зависимости числа Нуссельта от чисел Релея и Прандтля (рис. 3). Независимо от числа Релея

теплоперенос наиболее эффективен в наклоненном на  $45^\circ$  цилиндре, наименее – в вертикальном. Промежуточные значения числа Нуссельта получаются для горизонтально расположенного цилиндра. Во втором цикле выполнено детальное сравнение результатов трех экспериментов при горизонтальном, наклонном (под углом  $45^\circ$  к вертикали) и вертикальном положении цилиндра. Число Рэлея (рассчитанное по диаметру полости) для трех экспериментов примерно одинаково и равно  $5 \cdot 10^6$ . На рисунке 4 содержится схематичное изображение цилиндра при различных углах наклона с нанесенными на него значениями относительной температуры и средней скорости для указанных экспериментов. При вертикальном положении полости показания термопар F4 и B2 одинаковы и примерно равны средней температуре натрия, что объясняется интенсивным теплопереносом поперек цилиндра. При горизонтальном положении теплоперенос поперек трубы 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.

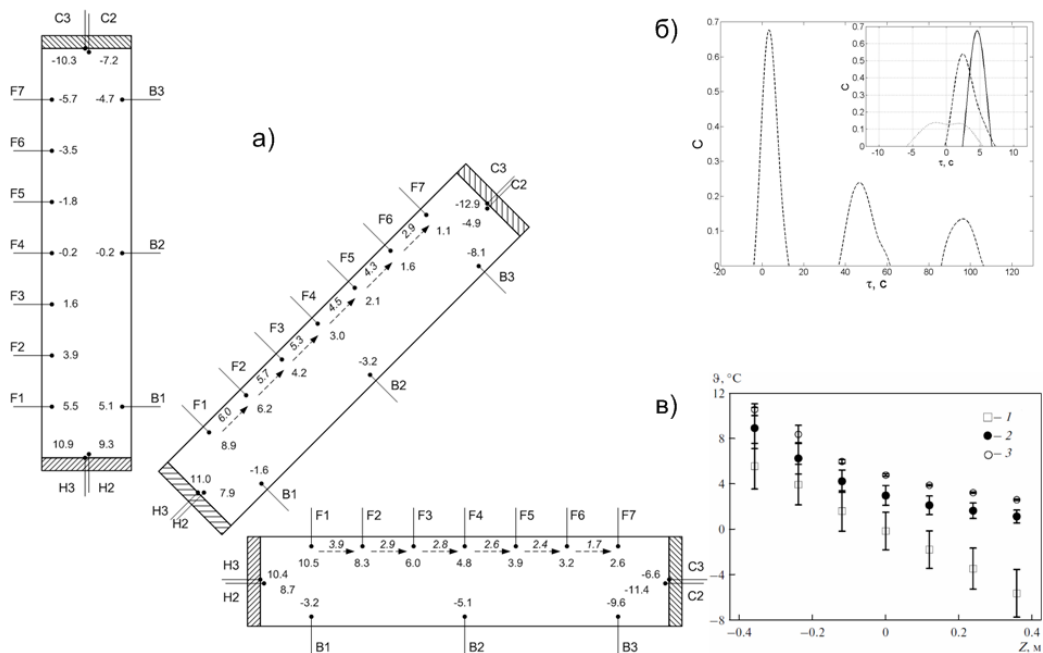


Рис. 4. Средняя относительная температура и средняя скорость натрия, см/с (а). Распределение относительной температуры натрия вдоль линейки термопар F1–F7 и её среднеквадратичные пульсации при вертикальном (1), наклонном (2) и горизонтальном (3) положении трубы (б). Кросскорреляционные функции  $C$  для термопар F3 и F4 при вертикальном (1), наклонном (2) и горизонтальном (3) положении трубы (в).  $Ra_D = 5 \cdot 10^6$ .

На рис.4б показаны результаты обработки сигналов от термопар F3 и F4 – типичные функции кросскорреляции для трех положений цилиндра (на внутреннем графике). Для горизонтального и наклонного на  $45^\circ$  положений полости кросскорреляционные функции имеют четко выраженные



максимумы, по которым можно определить время задержки между возмущениями температуры на двух соседних термопарах. В этих случаях можно говорить о существовании крупномасштабного течения натрия во всей полости. В вертикально установленном цилиндре вихрь, захватывающий всю полость, не устанавливается, о чем говорит вид кросскорреляционной функции. На основном графике рисунка 4б показана расширенная функция кросскорреляции для случая наклонного цилиндра, иллюстрирующая тот факт, что сильные колебания температуры сохраняются в течение нескольких оборотов КМЦ, о чем говорят небольшие, но различимые пики для первого и второго поворота. Время между этими пиками дает оценку средней скорости КМЦ, которая согласуется со скоростями, полученными из анализа основного максимального пика функции. На рис.4в показано распределение температуры натрия вдоль линейки термопар F1–F7 с указанием среднеквадратичных пульсаций. В случае горизонтального и наклонного положений цилиндра продольный градиент температуры непостоянен, он увеличивается по мере приближения рассматриваемого сечения к нагревателю. При вертикальном положении градиент температуры вдоль цилиндра практически неизменен.

На рис.5 для каждого положения цилиндра приведены спектры пульсаций температуры для термопары F4. Из анализа спектров следует, что наиболее развитая турбулентность наблюдается в случае вертикально расположенного цилиндра, при котором интервал со степенным законом, близким к “ $-5/3$ ” распространяется на полторы декады.

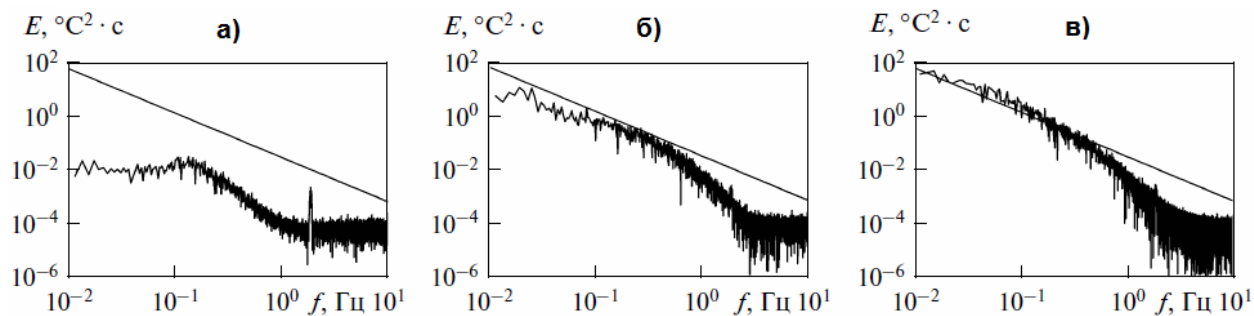


Рис. 5. Спектральные плотности энергии пульсаций температуры  $E$  для термопары F4 при горизонтальном (а), наклонном (б) и вертикальном (в) положении трубы ( $f$  – частота). Прямая линия соответствует закону “ $-5/3$ ”.  $Ra_D = 5 \cdot 10^6$ .

В наклоненной на  $45^\circ$  полости уровень турбулентных пульсаций ниже, чем в вертикальной, хотя спектры температуры также указывают на интенсивные пульсации в широком диапазоне частот. Основное отличие содержится в низкочастотной части спектра – при наклонном положении спектральная плотность отклоняется вниз от прямой линии,

соответствующей степенному закону “ $-5/3$ ”. Спектры пульсаций температуры при горизонтальном положении полости указывают на качественно иной вид течения. В спектрах пульсаций имеется характерное плато в области низких частот, что согласуется с низкими среднеквадратичными пульсациями температуры, показанными на рис.4в.

Полученная информация о структуре течения при различных положениях цилиндра, но близких значениях числа Релея позволяет объяснить зависимость числа Нуссельта от угла наклона. В рассмотренных экспериментах максимальное число Нуссельта, равное 68, зафиксировано при наклонном положении полости, когда на фоне мелкомасштабной турбулентности во всем объеме развивается наиболее интенсивное крупномасштабное течение. В случае горизонтально расположенного цилиндра, крупномасштабная циркуляция менее интенсивна, и мелкомасштабное течение находится в состоянии перехода к турбулентности, число Нуссельта равно 40. Минимальное число Нуссельта, равное 25, получено при вертикальном положении полости, когда имеет место развитая турбулентность во всем её объеме.

Экспериментальные результаты, полученные для цилиндра, наклоненного на  $2^\circ$  практически неотличимы от результатов в случае строго вертикального цилиндра. Тщательное сравнение временных характеристик температуры (спектров пульсаций температуры) также не выявило существенных различий между этими двумя положениями. Следовательно, отклонение цилиндра от вертикали на угол  $2^\circ$  не привело к возникновению крупномасштабной циркуляции во всем объеме цилиндра. Таким образом, был сделан вывод о возможности установки в технологических устройствах труб с большим аспектным отношением  $\Gamma^*$  не строго вертикально, но с небольшой погрешностью. Однако величина этой погрешности, очевидно, зависит также и от аспектного отношения конкретной трубы.

С помощью полученных результатов была проведена верификация численных моделей, разработанных в ОКБМ «Африкантов» и в лаборатории физической гидродинамики ИМСС. В случае с ОКБМ, в результате уточнения их численных моделей и более подробного моделирования теплообменников, было получено хорошее согласие усредненных параметров, таких как температура в точках расположения термпар и скорость крупномасштабной циркуляции. Эволюция течения в цилиндре со временем также была рассчитана верно, о чем свидетельствуют близкие

значения среднеквадратичных отклонений температуры в точках измерения, а также совпавшие спектры энергии пульсаций температуры.

Наиболее серьезная проблема состояла в том, чтобы согласовать граничные условия для численного счета с реализуемыми в эксперименте. Так как в эксперименте распределение температуры на торцах цилиндра было неоднородным, а наложенная разность температуры определялась по двум термопарам, отстоящим от торцов на некоторое расстояние, было бы не правильным задать в расчете граничные условия первого рода по этим же двум термопарам. Поэтому, задание граничных условий при моделировании в ИМСС осуществлялось двумя способами. Сначала, используя известные значения теплопотока, поступающего в цилиндр и выходящего из него, задавались граничные условия второго рода. Теплопоток принимался равномерным. В результате было подсчитано неравномерное распределение температуры на торцах цилиндра. Далее проводилось усреднение температуры на этих торцах, и по этим значениям считалась задача с граничными условиями первого рода. Одним из результатов верификации (ИМСС и ОКБМ) стал вывод о преимуществе, в плане точности моделирования, граничных условий второго рода. Именно задание теплового потока на торцах цилиндра приводит к наилучшему согласию численных расчетов и эксперимента.

**В четвертой главе** представлены экспериментальные результаты для цилиндра с  $\Gamma^* = 20$ . Изучались режимы с разными числами Релея в диапазоне  $(1-6) \cdot 10^6$  для цилиндра, наклоненного на 0, 45 и 90 градусов от вертикали. Показано, что наиболее эффективный теплоперенос, также как и в случае с первым цилиндром, наблюдается для наклонного (45°) положения. Полученная зависимость числа Нуссельта от чисел Релея и Прандтля (рис. 6) в виде  $Nu \sim (RaPr)^x$  дает  $x \approx 1$  для горизонтального и  $x \approx 0.8$  для вертикального и наклонного положений, что значительно превосходит значения известные для коротких цилиндров (диаметр которых равен или превосходит высоту) в случае развитой ( $x = 2/7$ ) и сверхразвитой ( $x = 1/2$ ) конвекции. Для анализа экспериментальных данных были выбраны режимы, сопоставленные разным ориентациям цилиндра, и такие, для которых число Релея было бы примерно одинаковым и равным  $Ra_D = 3.4 \cdot 10^6$ . На рис.7г схематично изображен цилиндр при различных углах наклона с нанесенными на него значениями относительной температуры и средней скорости. Термопары, показания которых отсутствуют на схеме, вышли из строя в течение экспериментов под действием высоких температур в сочетании с

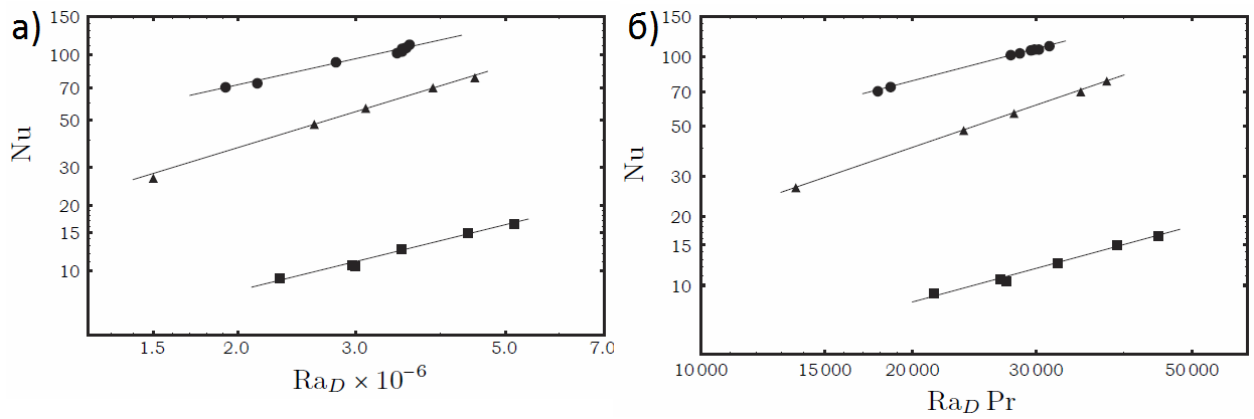


Рис. 6. Зависимости числа Нуссельта от числа Релея (а) и от произведения чисел Релея и Прандтля (б) в логарифмическом масштабе для вертикального (квадраты), наклонного (круги) и горизонтального (треугольники) положений длинного цилиндра.

химической агрессивностью среды. При вертикальном положении полости показания термопар F10 и B4, а также F14 и B6 попарно одинаковы, что объясняется интенсивным теплопереносом поперек цилиндра. При горизонтальном положении теплоперенос поперек полости происходит главным образом за счет теплопроводности, что приводит к стратификации температуры натрия и, как следствие, к заметному отличию показаний термопар F10 и B4, равно как и термопар F14 и B6.

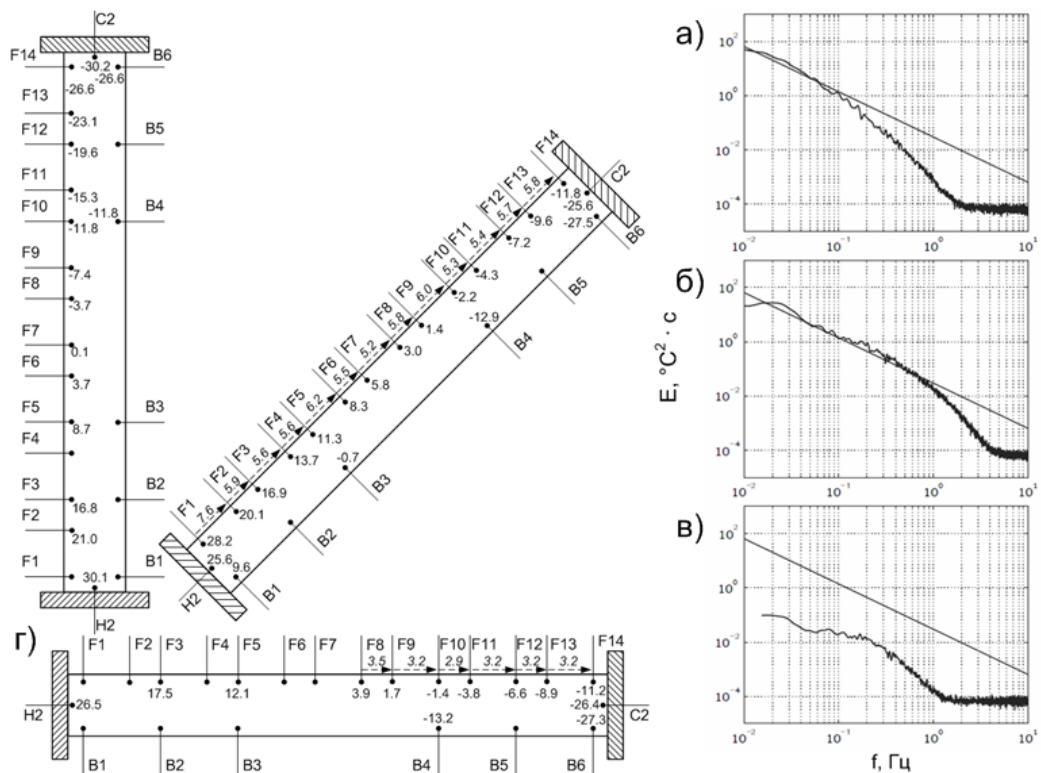


Рис. 7. Спектральные плотности энергии пульсаций температуры  $E$  для термопар F8 при вертикальном (а), наклонном (б) и горизонтальном (в) положении цилиндра. Прямая линия соответствует закону “ $-5/3$ ”. Средняя относительная температура и средняя скорость натрия, см/с (г).  $Ra_D = 3.4 \cdot 10^6$ .

При одних и тех же значениях числа Релея в наклонном цилиндре развивается более интенсивное течение, чем в горизонтальном: средняя скорость КМЦ отличается почти в два раза. Скорости вдоль канала дают

близкие значения, показывая незначительное снижение по мере приближения к холодному торцу – по-видимому, это объясняется тем, что вблизи горячего теплообменника поток в большей степени “поджат” к верхней стенке.

Представленные на рис.7а-в спектры пульсаций температуры в центральном сечении цилиндра (для термопары F8) указывают на хаотический режим конвекции. Наиболее развитая турбулентность наблюдается в наклоненном на  $45^\circ$  цилиндре, для которого спектр имеет хорошо различимый участок с наклоном, близким к “-5/3”. Пульсации 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.

Проведено подробное исследование зависимости теплопереноса от угла наклона длинного цилиндра. Эксперименты выполнены для фиксированного числа Рэлея  $Ra = 2.4 \cdot 10^6$  и различных углов наклона трубы к вертикали. Выявлена сильная зависимость мощности, передаваемой вдоль трубы, от угла наклона: число Нуссельта в исследованном диапазоне углов наклона изменяется на порядок с максимумом в области наклона  $65^\circ$  от вертикали (рис. 8а). Представленные характеристики крупномасштабной циркуляции и турбулентных пульсаций температуры показывают, что конвективный теплоперенос определяется в основном скоростью крупномасштабной циркуляции натрия (рис. 8б). Турбулентные пульсации максимальны при небольших углах наклона ( $\alpha = 20-30^\circ$ ) и ослабляют поток тепла вдоль канала, хотя в пределах малых углов (вертикальная труба) устойчивой крупномасштабной циркуляции нет и конвективный теплопоток, на порядок превышающий молекулярный, обеспечивается только мелкомасштабным (турбулентным) течением (рис. 8с).

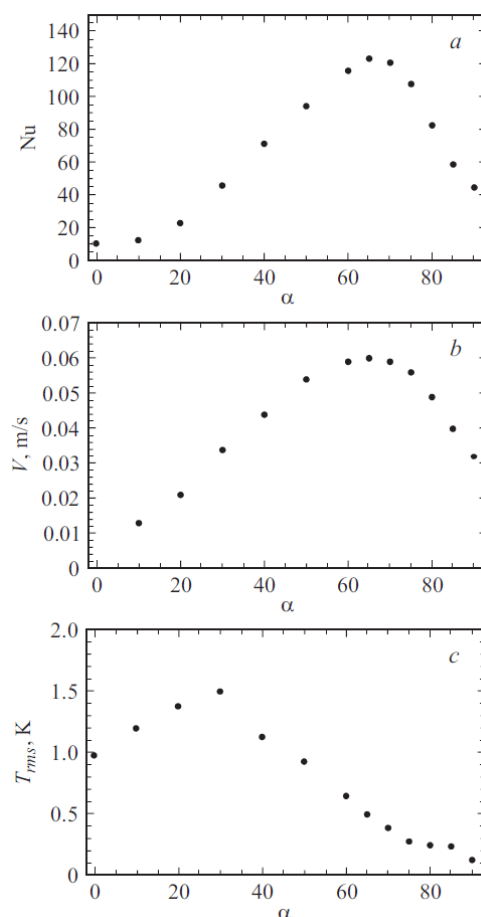


Рис. 8. Число Нуссельта (а), средние значения продольной компоненты скорости на участке между термопарами F4-F5 (б) и среднеквадратичные пульсации температуры на термопаре F8 (с) в зависимости от угла наклона трубы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Экспериментально исследована турбулентная конвекция жидкого натрия в протяженных цилиндрических полостях (с отношением длины к диаметру 5 и 20, соответственно), расположенных под различными углами к вертикали (от 0 до 90 градусов).
2. Исследована зависимость эффективности теплопереноса, характеризуемой числом Нуссельта, от приложенного перепада температуры для трех положений цилиндров - вертикального, горизонтального и наклоненного на 45°. В исследуемом диапазоне чисел Релея теплоперенос наиболее эффективен в наклонной полости, когда на фоне развитой мелкомасштабной турбулентности во всем объеме развивается интенсивная крупномасштабная циркуляция. Теплоперенос менее эффективен в случае горизонтально цилиндра, в котором крупномасштабная циркуляция менее интенсивна, а мелкомасштабная турбулентность слаба. Наименее эффективно тепло передается через вертикальный цилиндр, хотя в нем и имеет место наиболее интенсивная турбулентность во всем её объеме, но отсутствует крупномасштабная циркуляция.
3. Построены зависимости числа Нуссельта от чисел Релея и Прандтля для трех положений короткого и длинного цилиндров. В случае короткого цилиндра степени в зависимости  $Nu(RaPr)^n$  для вертикальной, горизонтальной и наклонной ориентации имеют значения  $\eta=0.6, 0.73$  и  $0.84$ , соответственно. В случае длинного цилиндра наклоны становятся еще больше:  $0.84, 0.8$  и  $1.05$ . Значения степеней в полученных зависимостях превышают известные для задачи Релея-Бенара (вертикальное положение цилиндра, диаметр которого равен или превосходит его длину) в том же диапазоне чисел Релея.
4. Выполнено детальное исследование зависимости эффективности теплопереноса (числа Нуссельта) от угла наклона для длинного цилиндра. Показано, что конвективный теплоток в цилиндре, наклоненном на 65 градусов к вертикали, почти втрое выше, чем в горизонтальном, и более чем в десять раз превосходит конвективный поток тепла в вертикально расположенной полости. Во всех случаях, кроме строго вертикального, в трубе устанавливается крупномасштабное течение. С увеличением угла наклона цилиндра средняя скорость крупномасштабной циркуляции возрастает, достигая максимума при  $\alpha \approx 65^\circ$  и затем монотонно убывая. Зависимость  $Nu(\alpha)$  в целом воспроизводит вид функции  $V(\alpha)$ , что свидетельствует о том, что именно возникающая в трубе крупномасштабная циркуляция определяет мощность, передаваемую вдоль канала.
5. Полученные экспериментальные данные использованы для верификации CFD-кодов в ОКБМ "Африкантов", а также для

тестирования численных моделей в лаборатории физической гидродинамики ИМСС.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО  
В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

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.
5. Мамыкин А. Д. Измерение скорости неизотермических потоков жидких металлов методом кросскорреляции // сборник трудов "Проблемы механики и материаловедения", Ижевск, 2014. С. 111-115.
6. Mamykin A., Frick P., Khalilov R., Kolesnichenko I., Pakholkov V., Pavlinov A., Rogozhkin S. Turbulent convective heat transfer in a long cylinder with liquid sodium // Proceedings of 9-th International PAMIR conference on Fundamental and Applied MHD, Thermo Acoustic and Space Technologies, Riga, Latvia, June 16-20, 2014. V.1. P.90-94.
7. Mamykin A., Khalilov R., Kolesnichenko I., Vasiliev A., Frick P. Sodium convection in inclined pipe // Proceedings of 15th European Turbulence Conference (ETC15), 25-28 August 2015, Delft, The Netherlands. P. 425.
8. Мамыкин А.Д., Фрик П.Г., Колесниченко И.В., Халилов Р.И., Павлинов А.М. Об особенностях турбулентной конвекции в цилиндрических полостях при низких числах Прандтля // XVIII Зимняя Школа по механике сплошных сред, Тезисы докладов. Пермь, 2013. С. 242.
9. Мамыкин А.Д., Павлинов А.М., Фрик П.Г., Колесниченко И.В., Халилов Р.И. Особенности измерений локальных характеристик конвективного течения в жидком натрии // XVIII Зимняя Школа по механике сплошных сред, Тезисы докладов. Пермь, 2013. С.241.

10. Мамыкин А.Д., Фрик П.Г., Колесниченко И.В., Халилов Р.И., Павлинов А.М. Об особенностях турбулентной конвекции в цилиндрической полости при низких значениях числа Прандтля // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2013», Тезисы докладов. Москва, 2013. CD-ROM.
11. Мамыкин А.Д., Колесниченко И.В., Павлинов А.М., Халилов Р.И., Фрик П.Г. Турбулентная конвекция натрия в вертикальном и слабонаклоненном цилиндрах // Пермские гидродинамические чтения, 2013. Тезисы докладов. CD-ROM.
12. Мамыкин А. Д., Васильев А.Ю., Колесниченко И. В., Фрик П. Г., Халилов Р. И., Рогожкин С. А., Пахолков В. В. Конвекция натрия в наклонной трубе // Пермские Гидродинамические чтения, 2014. Тезисы докладов. CD-ROM.
13. Мамыкин А.Д., Васильев А.Ю., Колесниченко И.В., Фрик П.Г., Халилов Р.И. Конвективный теплоперенос натрия в наклонном цилиндре // XIX Зимняя Школа по механике сплошных сред, Тезисы докладов. Пермь, 2015. С.195.
14. Mamykin A., Khalilov R., Kolesnichenko I., Pavlinov A., Frick P. Cross-Correlation velocimetry applied to convective and forced turbulent flows of liquid sodium // 3rd international Workshop on Measuring Techniques for Liquid Metal Flows (MTLM 2015), April 15 – 17, 2015. Dresden, Germany. Book of Abstracts. P.67.
15. Mamykin A., Frick P., Vasiliev A., Khalilov R., Kolesnichenko I., Pakholkov V., Pavlinov A., Rogozhkin S., Turbulent convective heat transfer in cylindrical enclosures with liquid sodium // Russian conference on Magnetohydrodynamics, RMHD-2015, Perm, Russia, June 22-25, 2015. Book of Abstracts. P.60.
16. Frick P., Khalilov R., Kolesnichenko I., Mamykin A., Pakholkov V., Pavlinov A., Rogozhkin S., Vasiliev A. Turbulent convective heat transfer in long cylinders with liquid sodium // International Conference on Rayleigh-Benard Turbulence 2015, 1-5 June 2015, Max Planck Institute for Dynamics and Self-Organization, Goettingen, Germany. Book of Abstracts. P.99.
17. Васильев А.Ю., Колесниченко И. В., Мамыкин А. Д., Фрик П. Г., Халилов Р. И. Особенности турбулентной конвекции натрия в длинных цилиндрах // 3-я Всероссийская конференция Пермские Гидродинамические научные чтения, 13-14 ноября 2015. Тезисы докладов. CD-ROM.