

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук  
Перминова Анатолия Викторовича  
на диссертационную работу **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

Диссертация Мамыкина А.Д. посвящена экспериментальному изучению турбулентного теплопереноса при конвекции натрия в замкнутых цилиндрических полостях, расположенных под различными углами к направлению силы тяжести. В работе: представлены **новые** результаты экспериментального исследования турбулентной конвекции жидкого натрия в двух протяженных цилиндрических полостях; предложен адаптированный для работы в жидких металлах метод оценки средней скорости крупномасштабной циркуляции; получены **неизвестные ранее** степенные зависимости числа Нуссельта от числа Релея, для различных ориентаций цилиндров с разными аспектными отношениями; **впервые** подробно исследована зависимость средней скорости крупномасштабной циркуляции, интенсивности турбулентности и величины тепловой мощности, передаваемой вдоль цилиндра, от угла наклона полости.

**Актуальность темы** связана с тем, что турбулентный теплоперенос в жидких средах широко распространен. Интерес к тепломассопереносу в жидких металлах связан с приложениями в металлургии. Жидкий натрий применяется в качестве теплоносителя в реакторных установках на быстрых нейтронах. В трубопроводах реакторных установок при определенных условиях может возникать свободная конвекция натрия, приводящая к существенному теплотокоту и прогреву трубопроводов. В этой связи **актуальными** становятся результаты экспериментальных исследований свободной конвекции натрия в длинных замкнутых цилиндрических сосудах, ориентированных под различными углами к направлению силы тяжести.

**Практическая и теоретическая значимость** результатов диссертационного исследования связана в первую очередь с проектированием новых реакторных установок в ядерной энергетике. Результаты могут быть полезны для верификации численных кодов, используемых для инженерных и научных расчетов свободно-конвективных течений в жидких металлах.

**Достоверность** результатов диссертационной работы обеспечивается тщательным тестированием методов измерений, использованием качественного измерительного оборудования, а также сравнением с экспериментами и теоретическими результатами других авторов.  
льнейшую обработку

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

**Во введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы и определена степень её разработанности, четко сформулированы цель и задачи диссертационной работы, описана научная новизна работы и перечислены полученные в диссертации новые результаты, указана практическая и теоретическая ценность работы, описана методология и методы экспериментальных исследований, определен личный вклад автора в полученные результаты.

**В первой главе** представлен достаточно подробный и качественный обзор публикаций по тематике диссертации. В обзоре описаны особенности развитой турбулентной конвекции Релея-Бенара, а также различные теории, обобщающие результаты натурных и численных экспериментов. Отдельно изучен вопрос о влиянии геометрии полости и её ориентации к силе тяжести на структуру течения и теплоперенос. Описаны особенности конвекции в жидких металлах. В конце главы обсуждались сложности, возникающие при экспериментальных измерениях характеристик потока и возможности их преодоления.

**Вторая глава** посвящена описанию экспериментальной установки и системы измерения характеристик потока.

Собственно результатам экспериментальных исследований посвящены **третья и четвертая глава** диссертации. В третьей главе диссертации представлены результаты экспериментов для короткого цилиндра длина которого в 5 раз превышает диаметр (аспектное соотношение  $\Gamma^* = 5$ ). В четвертой главе представлены экспериментальные результаты для длинного цилиндра с аспектным соотношением  $\Gamma^* = 20$ . В качестве управляющих параметров выбирались числа Прандтля и Релея, а так же аспектное соотношение  $\Gamma^*$ . Конвективный теплообмен характеризовался числом Нуссельта. Изучались режимы с разными числами Релея в диапазоне  $(2-10) \cdot 10^6$  для короткого цилиндра и в диапазоне  $(1-6) \cdot 10^6$  для длинного цилиндра. Проведено подробное исследование зависимости теплопереноса от угла наклона цилиндра. В ходе экспериментов было выяснено, что в указанных диапазонах чисел Релея теплоперенос наиболее эффективен в наклонных цилиндрах, где на фоне мелкомасштабной турбулентности развивается интенсивная крупномасштабная циркуляция. Во всех случаях, кроме строго вертикального, в цилиндрах устанавливается крупномасштабное течение. В горизонтальных цилиндрах крупномасштабная циркуляция менее интенсивна, поэтому теплоперенос в них менее эффективен. Хуже всего тепло передается через вертикальные цилиндры, в которых отсутствует крупномасштабная циркуляция. Показано, что в случае короткого цилиндра степени в зависимости  $Nu(RaPr)^\eta$  для вертикальной, горизонтальной и наклонной ориентации ( $\alpha=45^\circ$ ) имеют значения  $\eta=0.6, 0.73$  и  $0.84$ , соответственно. В случае длинного цилиндра степени становятся больше:  $0.84, 0.8$  и  $1.05$ . Значения степеней в полученных зависимостях

превышают известные для задачи Релея-Бенара в том же диапазоне чисел Релея. Определено, что конвективный теплоток в длинном цилиндре, расположенном по углом  $\alpha=65^\circ$  к вертикали, втрое выше, чем в горизонтальном, и в десять раз превосходит конвективный поток тепла в вертикальном цилиндре. С увеличением угла наклона длинного цилиндра средняя скорость крупномасштабной циркуляции возрастает, достигая максимума при  $\alpha \approx 65^\circ$ , и затем монотонно убывает. В работе делается вывод о том, что именно возникающая в цилиндре крупномасштабная циркуляция определяет мощность, передаваемую вдоль него.

К достоинствам диссертации следует отнести, приведенный автором, литературный обзор; использование диссертантом оригинальной экспериментальной установки и адаптацию кросскорреляционного анализа температурных сигналов для измерения скорости крупномасштабной циркуляции. Диссертант показал владение современными методами экспериментальных исследований конвективных течений в сложных с точки зрения проведения натуральных экспериментов средах. К достоинствам полученных в диссертации экспериментальных результатов следует отнести тот факт, что они использованы для верификации численных кодов в ОКБМ «Африкантов», а также для тестирования численных моделей в лаборатории физической гидродинамики ИМСС и на кафедре общей физики ПНИПУ.

К работе могут быть высказаны следующие замечания:

1. На стр. 9 описывается личный вклад диссертанта, где говорится, что «автором проведен анализ полученных данных и принято участие в подготовке к публикации всех статей». Каков конкретный вклад диссертанта, например, в написание статей относящихся к так называемому списку ВАК?
2. 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.
3. 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, например, значения вязкости и температуропроводности в различных режимах при различных температурах.
4. На рис. 3.7 и 4.4 приведены «спектральные плотности энергии пульсаций температуры». Использованный термин «энергия пульсаций температуры» 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?

5. В тесте диссертации присутствуют в достаточно большом количестве орфографические и стилистические ошибки.

Диссертация Мамыкина А.Д. выполнена на хорошем научном уровне. Автореферат отражает содержание диссертации. Приведенные замечания не снижают **общего положительного впечатления** от работы. Диссертационная работа **Мамыкина Андрея Дмитриевича** представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертационным работам по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, а ее автор заслуживает присуждения степени **кандидата физико-математических наук**.

Доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры Общей физики факультета Прикладной математики и механики ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

614990, Пермский край, г. Пермь - ГСП, Комсомольский проспект, д. 29, а. 245, [perminov1973@mail.ru](mailto:perminov1973@mail.ru), +7 (342) 2-198-025

Перминов Анатолий Викторович  
09.11.2016

Я, Перминов Анатолий Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую ~~обработку~~.



ЗАВЕРЯЮ:  
Пермский секретарь ПНИПУ  
В.М. Макаревич

09 11 2016 г.