

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Яссина Халила Фархана Яссина «Ламинарный свободно-конвективный теплообмен в вертикальном канале с отрывом потока», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

### **Актуальность темы исследования**

Диссертация Яссина Халила Фархана Яссина посвящена численному исследованию ламинарных режимов свободной конвекции в плоских вертикальных гладких и оребренных каналах с изотермическими и адиабатическими стенками. Актуальность темы обусловлена широтой применения вертикальных каналов в различных технических приложениях, включая печные и дымовые трубы котельных и тепловых станций, вентиляционные шахты производственных помещений, солнечные коллекторы, системы охлаждения элементов микроэлектронной аппаратуры.

Рассматриваемая задача свободной конвекции внутри вертикальных каналов имеет глубокую историю, но при этом многие вопросы, например, связанные с интенсификацией теплопереноса в коротких и длинных каналах, до сих пор полностью не исследованы. Для изучения открытых вопросов наиболее эффективным подходом представляется использование возможностей вычислительной техники и численных методов теплофизики и механики жидкости и газа в связи с многопараметричностью задачи.

В рассматриваемой диссертационной работе соискатель на основе численного моделирования детально изучил гидродинамику и теплоперенос внутри вертикального канала при наличии тепловых граничных условий первого и второго (условие теплоизоляции) рода на стенках канала, а также с учетом влияния одиночных ребер на термогидродинамические характеристики.

Следует также отметить, что проведенные исследования полностью соответствуют приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации (Указ Президента РФ от 07 июля 2011 года № 899) «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» и связаны с реализацией критических технологий Российской Федерации (26. Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии).

### **Структура и объем диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Работа изложена на 136 страницах и содержит 80 рисунков и 3 таблицы. Список литературы включает 187 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность исследования, сформулирована цель работы, показаны научная новизна и практическая значимость, описаны личный вклад автора и основные

положения, выносимые на защиту, а также приводится краткое описание диссертационной работы.

**Первая глава** содержит обзор работ, посвященных численным и экспериментальным исследованиям режимов свободной конвекции в вертикальных гладких и оребренных каналах. Показано, что несмотря на актуальность проблемы, гидродинамика и теплоперенос в вертикальных плоских каналах с изотермическими и адиабатическими стенками при наличии ребер различной высоты изучены недостаточно.

**Во второй главе** приведена постановка стационарной двумерной задачи ламинарной свободной конвекции в зазоре между двумя изотермическими или адиабатическими пластинами бесконечной длины при возможном наличии одиночного ребра. Математическая модель включает уравнения Обербека-Буссинеска, сформулированные в безразмерных естественных переменных «скорость – давление – температура», с соответствующими граничными условиями. Для приближенного решения дифференциальных уравнений в частных производных используется метод контрольного объема. Следует отдельно отметить особенность решаемой задачи, которая учитывается на этапе перехода к разностным схемам. Исходя из отсутствия условий во входном и выходном сечениях канала, область решения была дополнена прямоугольными участками около этих сечений с мягкими граничными условиями. Такой подход позволяет корректно описать гидродинамику и теплоперенос в зонах входа и выхода из канала. Разработанный численный алгоритм протестирован на множестве сеток, а также верифицирован с использованием экспериментальных и численных данных других авторов.

**Третья глава** посвящена исследованиям течения и теплопереноса в вертикальном канале с адиабатическими стенками с учетом влияния оребрения. Соискатель подробно описал влияние числа Рэлея и относительной высоты канала на структуру течения и теплоперенос в случае теплоизолированных стенок. Показано изменение расхода газа и коэффициента трения на стенке в широком диапазоне определяющих параметров. Впервые установлен режим инверсии ( $Ra \sim 350-400$ ), характеризующий отсутствие зависимости конвективной тяги от высоты канала. Отдельно проведено сопоставление с простейшими одномерными гидростатическими моделями, иллюстрирующее очень хорошее совпадение для короткого канала. Проанализированы транспортные режимы массы, импульса и энергии при симметричной установке ребер на противоположных стенках канала, отразившие сильное снижение конвективной тяги вследствие роста гидравлических потерь.

**Четвертая глава** включает в себя основные результаты численного моделирования свободноконвективного теплопереноса в плоском вертикальном канале с изотермическими стенками. В этой главе была еще раз дана геометрическая постановка задачи с соответствующими граничными условиями. Исследовано влияние геометрического параметра и числа Рэлея на профили скорости и температуры, а также на число Нуссельта, среднемассовую температуру и

расход газа. Показана возможность обобщения полученных результатов за счет введения модифицированных чисел Рэлея и Рейнольдса для зоны умеренных и высоких чисел Рэлея. Отдельно продемонстрирована возможность использования приближенных методов для описания гидродинамики в вертикальных каналах в режиме свободной конвекции.

**В пятой главе** представлены результаты численного анализа гидродинамики и теплопереноса в вертикальном оребренном канале с изотермическими стенками. Соискателем проведен глубокий анализ влияния числа Рэлея, высоты одиночного ребра и расположения двух симметричных ребер на структуру течения и теплоперенос. Установлено, что число Рэлея имеет существенное влияние на интенсивность теплообмена, в то время как возвратные течения, формирующиеся позади ребер, оказывают значительно меньшее воздействие. Получены корреляционные соотношения для среднего числа Нуссельта в зависимости от числа Рейнольдса.

**В заключении** диссертационной работы сформулированы основные выводы по проведенному анализу и указаны возможные направления дальнейших исследований.

**Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации,** обеспечивается корректностью математических постановок задач, использованием апробированных вычислительных алгоритмов и расчетных схем, а также сравнением результатов численного анализа с теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

- впервые проведен численный анализ свободноконвективного течения и теплопереноса в вертикальных гладких и оребренных каналах с изотермическими и адиабатическими стенками в широком диапазоне изменения числа Рэлея и высоты канала;
- в каналах с адиабатическими стенками обнаружен режим инверсии ( $Ra \sim 350-400$ ), когда расход газа через канал не зависит от высоты ребра. Показано, что основной причиной снижения интегрального теплообмена и конвективной тяги в оребренных каналах является рост гидравлического сопротивления за счет внезапного сужения и отрыва потока;
- получены новые данные для ламинарной свободной конвекции в канале с изотермическими стенками. Использование модифицированных значений чисел Рэлея и Рейнольдса позволило обобщить численные данные для каналов различной длины и различного уровня термогравитационных сил.

**Практическая значимость** диссертационного исследования заключается в

- разработке методики моделирования свободноконвективного теплопереноса в вертикальных каналах с неизвестными условиями во входном и выходном сечениях;
- установлении корреляционных соотношений для интегрального теплообмена, позволяющих проводить инженерный анализ свободноконвективных режимов тепломассопереноса;

– разработке дополнительных глав учебных дисциплин для обучающихся кафедры «Техническая теплофизика» Новосибирского государственного технического университета.

Содержание **автореферата** полностью отражает содержание диссертации, а сам автореферат отвечает всем предъявляемым требованиям.

Основные положения диссертации апробированы на всероссийских и международных конференциях. По результатам исследований опубликовано 15 печатных работ, в том числе 4 научные статьи – в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, 11 работ опубликованы в трудах международных и всероссийских конференций.

### **Замечания к диссертационной работе**

1. Представляется, что с целью более корректного изложения полученных результатов сначала напрашивается анализ гидродинамики и теплопереноса в случае изотермических стенок (тепловые граничные условия первого рода), а затем для случая адиабатических стенок (тепловые граничные условия второго рода).

2. Следовало более подробно описать используемые численные подходы для решения сформулированных задач (разностные схемы, расчетная сетка, размеры дополнительных зон вблизи входного и выходного сечений). Не совсем понятны используемые методы и схемы, например, «Система алгебраических уравнений решается методом развертки неявно линейной схемой исключения Гаусса» или «Для приближения конвективных членов в уравнениях движения и энергии используется гибридная схема потока».

3. В разделе 2.4, посвященном тестированию численной модели, для понимания рассматриваемых тестовых задач необходимо было дать их физическое описание. Желательно также привести сравнения не только для чисел Нуссельта, но и для локальных распределений скорости и температуры.

4. Представляется, что тепловое излучение может оказать существенное влияние на результат с учетом оптических свойств ограждающих стенок.

5. Корреляционные соотношения (5.1) и (5.2) для интегрального теплообмена нуждаются в указании диапазона изменения числа Рейнольдса. По всей видимости, пороговое значение числа Рейнольдса, соответствующее переходу от одной зависимости к другой, определяется физическими особенностями процесса.

6. В тексте диссертации и автореферата встречаются опечатки и неточности.

Сформулированные замечания не являются принципиальными и не снижают общей высокой положительной оценки диссертационной работы.

### Заключение

В целом диссертация Яссина Халила Фархана Яссина «Ламинарный свободно-конвективный теплообмен в вертикальном канале с отрывом потока» является завершенной научно-исследовательской работой, выполненной на актуальную тему, и содержит новое решение научной задачи свободноконвективного теплопереноса в вертикальных гладких и оребренных каналах, имеющей значение для развития теплофизики и механики жидкости и газа.

Работа соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а автор диссертации, Яссин Халил Фархан Яссин, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент,  
заведующий кафедрой теоретической механики  
федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Национальный исследовательский  
Томский государственный университет», доктор  
физико-математических наук (01.02.05 – Механика  
жидкости, газа и плазмы), доцент

Шерemet Михаил Александрович

18 января 2019

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36,  
Тел. (3822) 52-98-52, факс (3822) 52-95-85  
rector@tsu.ru; <http://tsu.ru>



Я СЬ УДОСТОВЕРЯЮ  
ий документовед  
ения делами  
ихеева



Я, Шерemet Михаил Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Яссина Халила Фархана Яссина «Ламинарный свободно-конвективный теплообмен в вертикальном канале с отрывом потока», и их дальнейшую обработку.

Поступил в совет 23.01.2019  
И.с. секретарь ДС Ю.В. Боруси О.В.)

С ОТЗЫВОМ ОЗНАКОМЛЕН 24.01.2019

Яссин Х.Ф.