

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель директора  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
«Удмуртский федеральный  
исследовательский центр Уральского  
отделения Российской академии наук».

А.Б. Семенихин

«17» 09 2018 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Ни Александра Эдуардовича «Ламинарные и турбулентные режимы термогравитационной конвекции в замкнутых областях с локальными источниками радиационного нагрева», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

**Актуальность темы диссертационной работы.** Проблема энергосбережения и эффективного использования энергии остро стоит в современном мире – как в регионах, где имеется нехватка источников энергии, так и в развитых регионах с запасом мощностей, где в случаях несвоевременного обслуживания и обновления оборудования по генерации и транспортированию могут образовываться временные перебои в поставке энергии. Кроме того, важно отметить такую экономическую составляющую вопроса сбережения энергии, как снижение производственных затрат на изготовление продукции и услуг с повышением конкурентоспособности в результате снижения конечной цены.

Одним из основных способов передачи энергии является лучистая теплопередача. Несмотря на достаточную проработку теории переноса энергии излучением, имеется очень мало информации о сопутствующих процессах, протекающих при излучении – конвективном и кондуктивном теплопереносе. Так, совместный перенос теплоты естественной конвекцией и излучением встречается во многих инженерных системах. В качестве примеров стоит отметить охлаждение электроники, солнечные коллекторы, выращивание кристаллов, обогрев производственных и жилых помещений и т.д. Таким образом, сопутствующие лучистой теплопередаче процессы вносят вклад в энергоэффективность общей системы.

Для эффективного использования лучистых источников нагрева необходима теория, адекватно описывающая комплекс процессов, протекающих при нагреве локальных ограниченных (или полуограниченных) в пространстве объемов источниками лучистого нагрева (например, газовыми инфракрасными излучателями).

Экспериментальное изучение основных закономерностей процессов теплопереноса в замкнутых областях с локальными источниками радиационного нагрева затруднено необходимостью привлечения больших временных и материальных ресурсов. Выбор параметров систем локального лучистого нагрева как крупных, так и относительно малых по размерам объектов проводится эмпирически, в связи с отсутствием теории, обеспечивающей достоверный прогноз характеристик таких систем нагрева.

Кроме того, тематика диссертационной работы относится к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ (п.8. «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика») и входит в перечень критических технологий РФ («Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии»). Таким образом, диссертационная работа Ни А.Э. «Ламинарные и турбулентные режимы термогравитационной конвекции в замкнутых областях с локальными источниками радиационного нагрева», посвященная теоретическому исследованию газодинамических и теплофизических процессов, протекающих при естественной конвекции, возникающей при наличии источников лучистой энергии, является актуальной.

**Характеристика содержания диссертационной работы.** Цель диссертационной работы заключается в численном исследовании особенностей совместно протекающих процессов кондуктивного, конвективного и радиационного теплопереноса в замкнутых областях с лучистыми тепловыми источниками при ламинарном и турбулентном режимах течения газовой среды. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, изложенных на 208 страницах машинописного текста, включая 111 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 160 наименований.

**Во введении** показана актуальность, поставлены цель и задачи исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта новизна исследуемой тематики, отмечена теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, указаны сведения об апробации работы и публикациях автора.

**В первой главе** представлен подробный обзор литературы по тематике диссертационной работы. Автором выделено шесть основных направлений исследования теплопереноса конвекцией и излучением, сгруппированных по геометрической

конфигурации исследуемой области, поглощающей способности газа и условиям теплообмена, определяемым на поверхности контакта газа и стенок.

На основании проведенного обзора показано, что в условиях теплообмена в результате естественной конвекции учет излучения приводит к изменению скорости течения газовой среды. В основном, изучение процессов газодинамики и теплообмена проводится на областях с прямоугольным поперечным сечением, заполненных воздухом.

В обзоре приведены постановки задач, размеры расчетных сеток, алгоритм решения уравнений и полученные результаты. Не смотря на большое разнообразие представленных в литературе данных, автором показано, что до сих пор остаются открытыми такие вопросы как, например, степень влияния величины коэффициента теплоотдачи на внешних границах области решения на интенсивность теплопередачи, характер протекания кондуктивного, конвективного и лучистого теплообмена с учетом теплопередачи в твердых стенках, влияния их теплофизических и геометрических параметров.

**Вторая глава** диссертации посвящена описанию сформулированной математической модели для изучения совместного кондуктивного, конвективного и радиационного теплообмена в замкнутых областях при наличии локальных источников радиационного нагрева. Расчетная область представляется в виде прямоугольной области, ограниченной твердыми теплопроводными стенками конечной толщины с газовой средой внутри области. В качестве локального источника лучистой энергии, в работе используется инфракрасный излучатель, расположенный в верхней части расчетной области.

Перечислены принятые в работе допущения. Используется подход Буссинеска для аппроксимации исходных уравнений Навье-Стокса. Уравнения записаны в двумерной постановке. Приведены уравнения энергии газа, стенок и источника лучистого нагрева. Сформулированы граничные и начальные условия. Исходные уравнения записываются в переменных «функция тока – завихренность» и обезразмериваются. Описана модель теплопереноса излучением.

Приводятся аппроксимации дифференциальных операторов исходных уравнений: конвективные слагаемые аппроксимируются монотонной схемой Самарского, диффузионные – центрально-разностной схемой второго порядка, временная производная – схемой Эйлера. Для решения уравнений используется метод переменных направлений. Получаемая на каждом полушаге система линейных алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей коэффициентов решалась методом прогонки. Алгоритм решения реализован в среде программирования matlab.

Проводится тестирование разработанной автором методики исследования совместного кондуктивного, конвективного и радиационного теплообмена в замкнутых областях при наличии локальных источников радиационного нагрева на известных

решениях задач конвективного, кондуктивно-конвективного и конвективно-радиационного теплопереноса.

Рассмотрены естественная конвекция в замкнутой квадратной полости, естественная конвекция в области с нагретой изотермической горизонтальной пластиной, сопряженная ламинарная свободная конвекция в полости, заполненной воздухом и естественная конвекция и излучение в замкнутой квадратной области. Сравнение с известными данными проведено как по температуре и скорости газовой фазы, так и по числу Нуссельта. Показано хорошее согласование распределений газодинамических и теплофизических параметров газовой фазы, а также локальных характеристик сопряженного теплообмена.

**Третья глава** посвящена параметрическим исследованиям кондуктивного, конвективного и радиационного процесса теплопередачи в замкнутых областях с локальными источниками лучистой энергии. Рассмотрено четыре варианта описания распределения радиационных потоков по поверхностям полости, поступающих от источника лучистого нагрева. В качестве лучистого источника энергии использовался как изотермический, так и неизотермический инфракрасные нагреватели. Первая часть главы посвящена теплопередаче при ламинарном режиме течения газа в области. Исследовалось влияние таких параметров как число Рэлея, поперечный размер излучателя, мощность излучателя, степень черноты поверхности стенок камеры, толщина стенок камеры, относительный коэффициент теплопроводности газа и материала стенок камеры, геометрические размеры области. Представлена структура течения газа внутри камеры и распределение температуры. Проведен анализ полученных результатов.

Рассмотрен турбулентный режим течения газа внутри камеры. Оценено влияние теплоотвода в стенки на параметры теплообмена при варьировании количества участвующих в теплопередаче стенок. Проведено исследование гидродинамических процессов и теплопереноса при варьировании высоты подвеса источника лучистой энергии и степени черноты стенок. Проведен сравнительный анализ инфракрасных излучателей и системы «теплый пол». Получено хорошее согласование результатов расчетов с известными экспериментальными данными по распределению температуры на нижней поверхности и в газовой среде под излучателем.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Среди полученных в диссертационной работе **новых** результатов следует выделить следующие:

- Сформулирована математическая модель совместно протекающих процессов конвективного, кондуктивного и лучистого теплопереноса в замкнутых прямоугольных областях в условиях ламинарного и турбулентного течения газа в

сопряженной постановке в системе «газ-твердое тело» при наличии локального источника лучистого нагрева.

- Разработан вычислительный алгоритм для расчета задачи гидродинамики и теплообмена, а также выполнена его программная реализация в программном пакете matlab.
- Обоснована возможность использования закона Ламберта при описании распределения лучистой энергии по поверхностям нагрева на основании проведенных сравнений результатов расчетов с известными экспериментальными данными.
- Показано, что пренебрежение толщиной стенок камеры недопустимо. Так, кроме существенного изменения структуры течения и распределения температуры газовой среды, при учете толщины стенок, например, при числе Релея  $10^8$  наблюдается значительное снижение средней температуры воздуха.
- Впервые проведено сравнение двух энергосберегающих систем отопления помещений: «теплый пол» и панельно-лучистое отопление. Показано, что при использовании инфракрасного излучателя изменение степени черноты внутренней поверхности камеры в пределах от 0 до 0.9 приводит к существенному возрастанию средней безразмерной температуры газа в отличие от использования системы «теплый пол».
- Установлено, что при изменении безразмерной высоты подвеса инфракрасного излучателя в диапазоне от 0.5 до 0.9 происходит уменьшение числа Нуссельта на нижней поверхности камеры на 30 % при относительном коэффициенте теплопроводности газа и материала стенок камеры 1.3.

**Достоверность** полученных автором в диссертационной работе результатов обеспечивается использованием фундаментальных законов сохранения, апробацией используемых методов решения (в том числе в высокорейтинговом зарубежном издании), хорошим согласованием результатов численного моделирования с опубликованными в литературе экспериментальными данными.

**Теоретическая и практическая значимость результатов исследований.** Разработанная автором математическая модель, методика численных расчетов и реализованные в виде программного комплекса алгоритмы могут найти применение как в учебном процессе, так и в исследованиях, направленных на развитие теории механики жидкости и газа, в частности – конвективных течений в замкнутых областях, возникающих при наличии локальных источников радиационного нагрева, в различных научных и учебных заведениях: Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск), Московский государственный технический университет

имени Н.Э. Баумана, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова (г. Санкт-Петербург), Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН (г. Ижевск), а также в других организациях.

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, могут быть использованы в качестве рекомендаций при проектировании и модернизации систем отопления жилых и производственных помещений и пассивных систем охлаждения тепловыделяющих элементов.

**Автореферат** в полной мере отражает содержание диссертации, в нем последовательно раскрыты поставленные цели и задачи исследования, представлены все основные результаты работы, сформулированы положения, выносимые на защиту. Результаты и выводы исследования в автореферате соответствуют поставленным целям и задачам.

Основные научные результаты диссертации **опубликованы** в 27 работах, в том числе в 2 статьях в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук, 13 статей в научных изданиях, индексируемых в Web of Science и/или Scopus, 1 статья в научном журнале, 7 публикаций в сборниках материалов международных научных и научно-практических конференций, симпозиума, форума и всероссийской научной конференции, получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

По работе имеется ряд **замечаний**:

1. В уравнении (2.6.2) (стр. 47 диссертации) и (2.8.5) (стр. 50 диссертации) имеется

слагаемое  $V_{i,j}^n \frac{\Phi_{i,j+1}^{n+1/2} - \Phi_{i,j-1}^{n+1/2}}{2\ell}$  ( $\varphi = \{\Omega, \Theta\}$  соответственно), сформулированного в

неявном виде, появление которого приведет к образованию пятидиагональной матрицы коэффициентов. Каким образом в данном случае решалась результирующая система линейных алгебраических уравнений?

2. В работе отмечено, что «Также для упрощения вычислительного кода и, соответственно, уменьшения времени расчета программы лучистый теплообмен явно не моделировался» (стр. 167 диссертации). Предпринимались ли попытки ускорить вычисления за счет использования неравномерной расчетной сетки?
3. Насколько адекватно представление излучения по закону Ламберта моделирует реальное распределение радиационного потока на поверхностях для различных

- видов инфракрасных обогревателей, используемых для обогрева производственных помещений?
4. На рисунке 3.6.5.11 стр. 181 диссертации и рисунке 10 стр. 16 автореферата представлено сравнение расчетной и измеренной температуры воздуха в области вблизи излучателя. Наблюдалось ли в расчетах нестационарное течение в окрестности излучателя (число Релея  $2 \cdot 10^9$ )? Сравнение каких температур представлено на рисунке – мгновенных или осредненных по времени? Если мгновенных – в какой момент времени?
  5. В сформулированной в работе математической модели представлено уравнение неразрывности в несжимаемом виде ( $\partial u_i / \partial x_i = 0$ ) в различных вариантах записи: уравнение (2.2.3) стр. 36 диссертации, в переменных «функция тока – завихренность» уравнение (2.2.14) стр. 37 диссертации и в безразмерном виде уравнение (2.2.16) стр. 38 диссертации и уравнение (2) стр. 9 автореферата. При этом в результатах работы у компонент скорости  $U$  (например, при  $Q_v = 20$  на рисунке 3.5.6 (а) стр. 130 диссертации) и  $V$  (например, при  $\tau = 600, 800$  на рисунке 3.5.2 (б) стр. 124 диссертации,  $Q_v = 20, 40, 80$  на рисунке 3.5.6 (б) стр. 130 диссертации и рисунок 3.5.9 (б) стр. 134 диссертации) все значения имеют один знак. Каким образом данное распределение скоростей согласуется с уравнением неразрывности, представленным в математической модели?

Отмеченные замечания не противоречат основным положениям, полученным результатам и не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

**Заключение.** Диссертация Ни А.Э. соответствует отрасли «физико-математические науки», а содержательная часть и полученные результаты соответствуют паспорту научной специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы по областям исследования «Ламинарные и турбулентные течения», «Физико-химическая гидромеханика (течения с химическими реакциями, горением, детонацией, фазовыми переходами, при наличии излучения и др.)», «Тепломассоперенос в газах и жидкостях», (пп. 3, 8, 15 паспорта специальности). Диссертационная работа Ни А.Э. «Ламинарные и турбулентные режимы термогравитационной конвекции в замкнутых областях с локальными источниками радиационного нагрева» является завершенным научным исследованием. Диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9-11 (раздел II) «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а диссертант Ни Александр Эдуардович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Настоящий отзыв рассмотрен и одобрен на заседании научного семинара лаборатории физико-химической механики Удмуртского федерального исследовательского центра УрО РАН 12 сентября 2018 г. (протокол № 9).

Главный научный сотрудник  
лаборатории физико-химической механики,  
доктор физико-математических наук  
(05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)

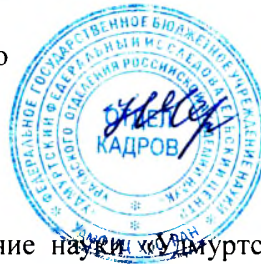
Карпов Александр Иванович

Научный сотрудник  
лаборатории физико-химической механики,  
кандидат физико-математических наук  
(01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника)

Шаклеин Артем Андреевич

12.09.2018 г.

Подписи А.И. Карпова и А.А. Шаклеина удостоверяю  
Специалист по кадрам УдмФИЦ УрО РАН



Н.Н. Черных

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»; 426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34; тел. (3412) 50-82-00; [udnc@udman.ru](mailto:udnc@udman.ru); <http://www.udman.ru/>