

УТВЕРЖДАЮ

Ректор Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Пермский государственный  
национальный исследовательский университет»



доктор физико-математических наук

И.Ю. Макарихин

03 декабря 2018

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу Мирошниченко Игоря Валерьевича  
«Турбулентные режимы сопряженной термогравитационной конвекции и  
теплового излучения в областях с локальными источниками энергии»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук по специальности  
01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

**Актуальность темы диссертационной работы.** Совершенствование технических устройств и неотложность решения многочисленных задач тепло-энергосбережения, связанных с разработкой эффективных систем обеспечения тепловых режимов энергетических установок, привели к тому, что в последние годы исследование сопряженного конвективно-радиационного теплопереноса было связано с достаточно широким кругом проблем: от технологии отвода тепла во многих приборах, процессах и системах до анализа сопряженного теплопереноса в строительных сооружениях. Стоит отметить, что в современных условиях одним из наиболее эффективных методов анализа разрабатываемых систем

охлаждения (как активных, так и пассивных) является использование современных подходов вычислительной гидромеханики.

Разработка новых образцов электронной техники имеет тенденцию к миниатюризации отдельных тепловыделяющих элементов, что, как правило, приводит к росту рабочих температур и, соответственно, влияет на надежность аппаратуры. Хочется отметить, что естественная конвекция совместно с излучением существенно влияет на предельные значения тепловых потоков в замкнутых областях, и их рассмотрение становится крайне важным во многих электронных устройствах и аппаратах, где детальное моделирование теплопереноса в процессе проектирования крайне необходимо, чтобы избежать в дальнейшем перегрева при реальной эксплуатации.

Исследование конвективно-радиационного теплообмена имеет большое значение и для строительной теплофизики. Для корректного описания рассматриваемых процессов переноса в строительных сооружениях необходимо учитывать их нестационарный и турбулентный характер, влияние внешних сред и внутренних источников тепловыделения. Учет радиационной составляющей переноса энергии также крайне необходим при моделировании теплопереноса в помещении. Поэтому диссертационная работа Мирошниченко Игоря Валерьевича, посвященная математическому моделированию сопряженного конвективно-радиационного теплообмена в замкнутых областях с локальными источниками энергии, является актуальной. Более того, тематика диссертационной работы относится к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации (Указ Президента РФ от 07 июля 2011 года № 899) (п. 8. «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика») и входит в перечень критических технологий РФ (п. 26. «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии»).

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа изложена на 118 страницах машинописного текста, содержит 48 иллюстраций и 3 таблицы. Она состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, включающего 128 наименований.

Во введении дается краткая характеристика работы, описывается ее структура, формулируются цели исследования, отмечается теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлен краткий обзор результатов теоретических и экспериментальных исследований турбулентных режимов конвективно-радиационного теплопереноса в замкнутых областях. Проанализированы работы как отечественных, так и зарубежных ученых. Приведенный обзор научных публикаций отражает современный этап развития исследований, напрямую связанных с тематикой диссертации.

Во второй главе представлена физико-математическая модель двумерной задачи турбулентной естественной конвекции и теплового поверхностного излучения в замкнутых областях с локальными источниками тепловыделения. Автором детально описаны используемые приближенные методы решения рассматриваемой задачи, а также перечислены принятые в работе допущения. Рабочая жидкость считается теплопроводной, диатермичной средой, которая удовлетворяет приближению Буссинеска. Уравнения формулируются в безразмерных переменных «функция тока – завихренность». Описана модель теплопереноса излучением. Сформулированы граничные и начальные условия. В диссертации внедрена и детально описана эффективная процедура сгущения расчетной сетки к стенкам, использованная для адекватного разрешения вязкого пограничного слоя. В данной главе также представлены методы решения всех уравнений, описывающих рассматриваемые процессы переноса тепла и массы. Выполнено тщательное тестирование вычислительного кода на известных задачах турбулентной естественной конвекции в замкнутых областях, в том

числе с учетом радиационного теплообмена. В данной главе представлены результаты исследований влияния числа Рэлея, относительного коэффициента теплопроводности, степени черноты ограждающих конструкций и изменения угла наклона полости на структуру течения и теплообмен в полости. Показана также возможность интенсификации охлаждения тепловыделяющих элементов за счет увеличения степени черноты внутренних поверхностей стенок полости и самих источников.

Третья глава посвящена моделированию пространственных режимов турбулентной естественной конвекции в замкнутых областях. Сформулирована вычислительная модель в естественных безразмерных переменных «скорость – давление». Система дифференциальных уравнений в частных производных решалась с использованием метода контрольного объема. Центральные разности применялись для аппроксимации диффузионных слагаемых, для конвективных слагаемых использовался степенной закон. Процедура SIMPLE применялась с целью совместного определения полей давления и скорости. Итерационный метод переменных направлений использовался для разрешения разностных уравнений энергии и движения. Автором описан метод расчета угловых коэффициентов в пространственной постановке. Представлен анализ трехмерных распределений скорости и температуры, а также интегральных чисел Нуссельта.

В заключении описаны основные выводы, полученные в рамках выполнения диссертационной работы.

**Научную новизну** диссертационной работы определяют следующие результаты исследований:

1. Разработаны новые вычислительные модели турбулентного конвективно-радиационного теплопереноса в замкнутых областях при наличии локальных источников тепловыделения, в двумерном приближении на основе преобразованных переменных «функция тока –

вихрь» и в трехмерном случае с использованием переменных «скорость – давление».

2. Проведен детальный анализ влияния размера и положения тепловыделяющих элементов, а также теплофизических характеристик материала ограждающих конструкций на структуру течения и теплоперенос в рассматриваемой области. В случае несопряженной постановки проанализировано влияние угла наклона полости на структуру течения и теплообмен в области решения. Показана нелинейная связь между углом наклона и интенсивностью конвективного теплообмена на границах.
3. Показано существенное влияние теплового поверхностного излучения на естественно-конвективный теплообмен в замкнутых областях с локальными источниками энергии. Установлено, что за счет повышения степени черноты внутренних поверхностей, как источника энергии, так и твердых стенок можно существенным образом интенсифицировать охлаждение самого источника тепловыделения.

**Степень достоверности** результатов проведенных исследований обеспечивается использованием в математической модели общепринятых уравнений Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу, а также ее верификацией в предельных случаях и согласием полученных результатов с теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Разработанные вычислительные модели, описывающие нестационарные турбулентные процессы конвективно-радиационного теплопереноса внутри замкнутых областей с локальными источниками энергии, а также численные алгоритмы для их реализации позволили получить новые физические результаты в области механики жидкости и газа. Полученные по итогам численных

экспериментов результаты могут быть использованы при проектировании пассивного охлаждения блоков и узлов радиоэлектронной аппаратуры, а также при строительстве сооружений жилого и промышленного назначения в целях повышения их энергоэффективности.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.** Полученные результаты могут применяться в исследованиях, проводимых в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Институте теплофизики СО РАН, Пермском государственном национальный исследовательском университете, Пермском национальном исследовательском политехническом университете, Национальном исследовательском Томском государственном университете, Национальном исследовательском Томском политехническом университете, Институте теоретической и прикладной механики СО РАН, Удмуртском федеральном исследовательском центре УрО РАН, а также в других организациях РФ и за рубежом.

**Соответствие автореферата содержанию диссертации.** Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

**Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати.** По материалам диссертации опубликовано 35 работ; 12 статей в периодических изданиях из перечня ВАК, 15 публикаций в сборниках материалов конференций, 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Все опубликованные работы соответствуют теме диссертации и с достаточной полнотой отражают содержание, выводы и заключение диссертации.

По работе имеется ряд **замечаний**:

1. На страницах 41, 42, 93 присутствуют ошибки в ссылках на литературу, связанные, по-видимому, с некорректной работой гиперссылок.

2. На рисунках 3.3 и 3.5 траектории движения частиц и направления скоростей напечатаны мелко, вследствие этого структуру течения понять достаточно сложно.
3. В диссертации рассмотрены только стационарные режимы конвекции. Однако известно, что с ростом интенсивности нагрева и, следовательно, увеличении скорости течений наблюдается переход от стационарной конвекции к периодическим, псевдопериодическим и хаотическим режимам конвекции. Кроме того, при увеличении нагрева возрастает интенсивность теплового излучения, и его учет становится особенно важным.
4. В работе при построении сетки уделяется мало внимания оценке величины шага сетки вблизи стенки (значению безразмерного параметра  $y^+$ ). Известно, что осредненные модели турбулентности накладывают определенные ограничения на структуру сетки вблизи твердой стенки.
5. В разделе «Заключение» второй вывод написан общими словами, не содержит описания конкретных результатов, полученных в данной работе. Вследствие этого представляется целесообразным объединить первый и второй, либо второй и третий выводы диссертации.

**Соответствие работы требованиям, предъявляемым к диссертациям.**

Отмеченные замечания не являются существенными. Диссертационная работа является завершенным научным исследованием, выполненным на достаточно высоком научном уровне. В ней разработан оригинальный программный продукт для моделирования процессов турбулентного тепло- и массопереноса в замкнутых областях. Учитывая актуальность тематики, новизну и практическое значение полученных результатов, считаем, что диссертация «**Турбулентные режимы сопряженной термогравитационной**

**конвекции и теплового излучения в областях с локальными источниками энергии»** удовлетворяет всем требованиям ВАК России, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Мирошниченко Игорь Валерьевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв составил заведующий кафедрой теоретической физики Пермского государственного национального исследовательского университета, д.ф.-м.н., доцент Демин Виталий Анатольевич.

Содержание диссертации, автореферат и отзыв на диссертацию обсуждены на совместном заседании кафедры теоретической физики и Пермского городского гидродинамического семинара 30 ноября 2018 года, протокол № 2.

заведующий кафедрой теоретической физики  
Пермского государственного национального  
исследовательского университета, д.ф.-м.н.,  
доцент

Демин Виталий Анатольевич

30 ноября 2018 г.

Подпись В.А. Демина удостоверяю



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»; 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; тел.: 8 (342) 239-62-27, 8 (342) 239-62-08, info@psu.ru, http://www.psu.ru