

Вх. N 7/23
от 01.12.23

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации
Филимоновой Людмилы Николаевны
«Тепломассоперенос в воде и водонасыщенных пористых средах в
области инверсии плотности воды»,
представленной на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность исследований. Диссертационная работа Л.Н. Филимоновой посвящена исследованию интересного нелинейного теплофизического явления: конвективного перемешивания воды в пористых средах при регистрации инверсии плотности жидкости. В последнее время активизировались исследования конвекции жидкостей с нелинейной аппроксимацией зависимости плотности жидкости от температуры. Классическая система уравнений Обербека-Буссинеска построена на предположении о линейном законе распределения плотности от теплового фактора. Дополнительным предположением вывода уравнений для описания конвекции является гипотеза о возможности учета вариации плотности только в слагаемом для силы Архимеда. Несмотря на заведомое приближенное описание конвекции системой уравнений Обербека-Буссинеска, ее применение хорошо себя зарекомендовало в широком диапазоне изменения теплофизических диссипативных параметров различных жидкостей.

Любопытно, что длительные натурные и бытовые наблюдения подставили под сомнения возможность использования аппроксимации Буссинеска для самой распространенной жидкости на нашей планете – воды. Существенное нелинейная зависимость плотности от температуры вблизи максимума 3,98 градусов по Цельсию заставляют пересматривать устоявшиеся классические представления по теоретическому и численному моделированию процессов теплопереноса.

Кроме того, поскольку инверсия плотности воды происходит вблизи другой важной температурной точки – точки перехода из агрегатных состояний, то изучение конвективного теплопереноса важно для задач фильтрации воды в пористых средах (нефтедобыча, изучение вечной мерзлоты, добыча полезных ископаемых и другое) и процессов движения и таяния ледников и огромных массивов снега.

В настоящее время формируется методология экспериментального и теоретического исследования так называемой квадратичной конвекции в России и мировой науке. Получены интересные результаты, но пока рано говорить об удовлетворительной разрешимости многих научных задач. Таким образом, можно утверждать, что диссертация подготовлена по актуальной теме теплофизики, поскольку в ней исследуется влияние инверсии плотности воды на стратификацию гидродинамических полей свободных конвективных течений в воде и в водонасыщенных пористых средах, в том числе с учётом фазового перехода вода-лёд. Примечательно, что в диссертации рассматривается не только механизм Бенара для описания свободной конвекции, но и эффект Марангони-Гиббса, влияющего на формирование конвективного перемешивания при инверсии плотности воды (жидкости).

Структура и содержание диссертации. Диссертация объемом 98 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка, состоящего из 94 наименований. В диссертационной работе содержится 30 рисунков.

Во **введении** автором диссертационной работы обосновывается актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследований, указана научная новизна и практическая значимость научных результатов, выносимых на защиту, приведены сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объёме диссертации.

В **первой** главе диссертации представлен обзор литературы по теме диссертации. Автором проанализированы экспериментальные и теоретические работы, в которых проведены исследования по свободной конвекции в жидкости; по использованию различных уравнений и безразмерных параметров (чисел подобия), описывающих свободную конвекцию; по описанию и пояснению эффекта Марангони (Марангони-Гиббса); по особенностям течений жидкости при учёте инверсии плотности; по конвективному переносу в пористых средах; по изучению конвективного течения при кристаллизации воды.

Во **второй** главе анонсирована физическая и математическая модель свободного конвективного течения воды в цилиндрическом сосуде с охлаждающим элементом с учетом инверсии её плотности. Одновременно с инверсией плотности воды учитываются натяжение на свободной поверхности (термокапиллярный эффект Марангони) и зависимость диссипативных коэффициентов динамической вязкости, теплоёмкости и теплопроводности воды от температуры. Проведены расчеты для цилиндра с указанными геометрическими размерами и исследовано влияние различных

граничных условий на свободной границе (в том числе рассмотрено условие идеального скольжения).

Показано, что граничное условие прилипания и проскальзывания мало влияют на фоновое конвективное течение, но нельзя пренебрегать эффектом Марангони при изучении конвекции при учете инверсии плотности воды. Установлено, что конвективное течение жидкости при учете влияния поверхностного натяжения является более интенсивным, что приводит к более быстрому охлаждению жидкости в сосуде.

В **третьей** главе представлены результаты численного решения (численного эксперимента) задачи конвективного течения воды в высокопроницаемой пористой среде в цилиндрическом сосуде с охлаждающим элементом на основе физической и математической модели тепломассопереноса при инверсии плотности воды, учитывающей зависимость динамической вязкости, теплоёмкости, теплопроводности воды, а также плотности, теплоёмкости, теплопроводности пористой среды от температуры. Эта модель была описана во второй главе диссертации. Показано, что учет максимума плотности у воды в задачах с горизонтальными градиентами температур в зоне температур, близких к нулю, приводит к перестройке конвективного течения. В этом случае нисходящее течение замедляет свою интенсивность и возникают восходящие потоки холодной воды. Уменьшение интенсивности конвективных потоков в момент перестройки течения замедляет темп охлаждения системы.

В **четвертой** главе рассматривается численное решение многопараметрической задачи кристаллизации воды в пористой среде в цилиндрическом сосуде с охлаждающим элементом на основе полной физической и математической модели тепломассопереноса при инверсии плотности воды, учитывающей конвективные течения, зависимость теплофизических параметров воды и пористой среды от температуры. Показано, что учет максимального значения плотности воды влияет на процесс промерзания насыщенных водой пористых сред, и применение моделей воды в научных и инженерных расчетах, не описывающих её максимум плотности, может привести к значительным ошибкам. Действительно, течение вблизи области фазового перехода не может быть рассчитано с использованием модели воды без учета максимума её плотности. В природе вдоль линии фазового перехода всегда формируется восходящий конвективный поток, в то время как расчеты без учета инверсии плотности зададут нисходящий конвективный поток, что имеет принципиальное значение для целого ряда задач, к примеру, в расчетах

переноса примесей. В главе приведены качественные и количественные оценки для применения разработанной модели и численных расчетов.

В заключении рукописи приведены выводы по результатам диссертационного исследования.

Научная новизна. В представленной к защите диссертации на соискание ученой степени кандидата наук в качестве основных научных результатов можно выделить:

1. Впервые анонсирована математическая и физическая модель конвективного течения воды в цилиндрическом сосуде с охлаждающим элементом при инверсии плотности воды от температуры с учетом граничных условия Марангони на свободной поверхности и нелинейной зависимости динамической вязкости, теплоёмкости, теплопроводности воды от температуры.
2. Впервые изучена структура свободных конвективных течений и объяснено взаимное влияние и роли инверсии плотности воды и поверхностного натяжения на тепломассоперенос посредством предложенной автором диссертации физико-математической модели.
3. Впервые решена многопараметрическая краевая задача конвективного течения воды в высокопроницаемой пористой среде в цилиндрическом сосуде с охлаждающим элементом и краевая задача для описания кристаллизации воды в пористой среде в цилиндрическом сосуде с охлаждающим элементом при инверсии плотности воды.
4. Впервые предложен безразмерный параметр (число подобия) для необходимости учёта инверсии плотности воды при решении теплофизических задач. Определены значения этого критерия, при которых возможны достоверные расчёты.
5. Впервые оценено и изучено влияние конвективного течения на форму границы области фазового перехода в пористой среде и исследовано влияние инверсии плотности воды на степень промерзания пористой среды.

Научная и практическая значимость работы. В диссертационной работе приведены способы описания структуры конвективных течений в воде и водонасыщенных пористых средах. Они найдут свое применение при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий, нефтяных скважин, трубопроводов, дорог и прочих объектов, эксплуатируемых в нестационарных климатических условиях. При проведении исследований был введен безразмерный параметр, который может быть использован при выборе методики решения задач тепломассопереноса в водонасыщенных пористых средах вблизи температуры инверсии жидкости (воды).

Достоверность и обоснованность результатов, представленных в диссертации результатов обеспечивается применением законов механики многофазных сред и термодинамики; использованием известных, апробированных и хорошо зарекомендовавших устойчивых численных методов, которые интегрированы в открытую интегрируемую платформу OpenFOAM; многократным тестированием программ при различных исходных данных и граничных условий; сопоставлением с экспериментальными и расчетными данными других исследователей.

Результаты, представленные в диссертационной работе Л.Н. Филимоновой, прошли апробацию на семи всероссийских и международных конференциях и опубликованы в 11 печатных работах, 4 из которых в научных статьях, входящих в Перечень ВАК (1 являются статьями в рецензируемых научных журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus).

Соответствие автореферата содержанию диссертации. Автореферат ясно, полно и правильно отражает структуру, основные результаты и выводы диссертации.

Замечания по диссертации и автореферату. При ознакомлении с диссертационной работой и авторефератом диссертации не возникает существенных замечаний по представлению материала. В работе имеется небольшое число неточностей и опечаток, не влияющих на восприятие научных результатов. Тем не менее отмечу некоторые дискуссионные и технические моменты, возникшие при ознакомлении с диссертацией и авторефератом:


1. Автор использует понятие «физико-математическая модель». Мне понятно, что подразумевается, но лучше написать «физическая и математическая модель».
2. Хотелось бы, что автор пояснил выбор геометрических размеров цилиндра при проведении расчетов. Этот вопрос касается всех глав диссертационной работы.
3. При отсутствии учета термокапиллярного эффекта Марангони на свободной границе формулы описывают не граничное условие проскальзывания, а граничное условие идеального скольжения.
4. Как исследовалась сходимость полученного численного решения?
5. Почему при решении задачи описания кристаллизации воды был постулирован линейный закон Дарси?

Заключение. Диссертационная работа **Филимоновой Людмилы Николаевны «Тепломассоперенос в воде и водонасыщенных пористых средах в области инверсии плотности воды»** соответствует требованиям

пунктам 9-14 Постановления Правительства РФ 842 от 24 сентября 2013 г. «О порядке присуждения ученых степеней» с изменениями и дополнениями №335 от 30 июля 2014 г., 21 апреля, 2 августа 2016. Автор диссертации достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Профессор кафедры
информационных технологий и систем управления
Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РтФ
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Доктор физико-математических наук

Е.Ю. Просвирыков



27.11.2023 г.

Почтовый адрес: 620002, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Номер телефона: +7(343) 375-48-78, +79826545223
E-mail: evgen_pros@mail.ru

Подпись Евгения Юрьевича Просвирыкова заверяю:
ученый секретарь
ФГАОУ ВО
«УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

В.А. Морозова

