

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.418.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 26.12.2023 № 8

О присуждении Филимоновой Людмиле Николаевне, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Тепломассоперенос в воде и водонасыщенных пористых средах в области инверсии плотности воды» по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 18 октября 2023 года (протокол заседания № 4) диссертационным советом 24.2.418.02, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский государственный университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6. Приказ Минобрнауки России от 02.11.2012 № 714/нк.

Соискатель Филимонова Людмила Николаевна, 01.10.1979 года рождения, в 2015 году с отличием окончила магистратуру по направлению подготовки 011200 «Физика» ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет». В период подготовки диссертации с 01.09.2018 по 31.08.2021 соискатель Филимонова Людмила Николаевна обучалась в очной аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук (ТюмНЦ СО РАН) по направлению подготовки 05.06.01 Науки о Земле (профиль: Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение).

Справка № 29/1 от 16.06.2023 о сдаче кандидатских экзаменов выдана федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Тюменский государственный университет» после прикрепления в качестве соискателя ученой степени кандидата наук по

специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника с 01.12.2022 по 22.02.2023 (приказ о прикреплении для сдачи кандидатских экзаменов от 14.11.2022 № 216-25; приказ об отчислении лиц, прикрепленных для сдачи кандидатских экзаменов от 21.02.2023 № 47-25).

Диссертация выполнена в лаборатории нефтегазовой механики Тюменского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, в которой в настоящее время соискатель работает младшим научным сотрудником.

Научный руководитель – **Симонов Олег Анатольевич**, кандидат физико-математических наук, заместитель директора ТюмНЦ СО РАН назначен на Ученом совете ТюмФ ИТПМ СО РАН (выписка из протокола № 9 от 26.12.2022).

Официальные оппоненты: 1) **Просвиряков Евгений Юрьевич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационных технологий и систем управления, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»; 2) **Ахметова Оксана Валентиновна** – доктор физико-математических наук, главный специалист отдела гидродинамических исследований скважин, ООО «РН-БашНИПИнефть», дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Сургутский государственный университет» в своем положительном отзыве, подписанном доктором физико-математических наук, профессором кафедры прикладной математики **Галкиным Валерием Алексеевичем** и утвержденным ректором, профессором, доктором педагогических наук **Косенком Сергеем Михайловичем**, указала, что диссертационная работа Филимоновой Людмилы Николаевны «Тепломассоперенос в воде и водонасыщенных пористых средах в области инверсии плотности воды» по актуальности, научной новизне, основным положениям, научной, практической значимости и достоверности полученных результатов соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – **Филимонова Людмила Николаевна**, заслуживает

присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Соискатель имеет 11 работ по теме диссертации, из которых 3 публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 1 публикация в издании, входящем в международные базы данных и системы цитирования. Общий объем научных изданий 4,4 п.л., из них вклад автора – 2,2 п.л. Недостоверные сведения об опубликованных Л.Н. Филимоновой работах в диссертации отсутствуют.

Наиболее значимые публикации:

1. Симонов О.А., Филимонова Л.Н. Численное исследование влияния поверхностного натяжения на структуру течения в цилиндрическом сосуде с учетом максимума плотности воды // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. – Т. 5. – № 3. – С. 131-146. DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-3-131-146 (ВАК).
2. Симонов О.А., Филимонова Л.Н. Численное моделирование конвективного движения воды в пористой среде с учетом максимума плотности воды // Прикладная физика и математика. 2020. – № 5. – С. 39-41. DOI: 10.25791/pfm.05.2020.1180 (ВАК).
3. Simonov O.A., Filimonova L.N. Effect of a water density maximum on the cooling of a water-saturated porous medium // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2021. – Vol. 62. – No. 4. – Pp. 583-592. DOI: 10.1134/s0021894421040076 (MathSciNet, Scopus, WoS, zbMATH).
4. Симонов О.А., Филимонова Л.Н. Численное моделирование фазового перехода вода-лед в высокопроницаемых водонасыщенных пористых // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2023. – Т. 9. – № 1 (33). – С. 22-38. DOI: 10.21684/2411-7978-2023-9-1-22-38 (ВАК).

На автореферат поступили положительные отзывы от:

- 1) Доктора физико-математических наук, профессора РАН, главного научного сотрудника ФГБУН «Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе

Сибирского отделения Российской академии наук» **Пахомова М.А.** с замечаниями:

1. В автореферате подробно не указаны методика численной реализации и сетки, на которых проводились расчёты. Также не приводятся данные по влиянию сеточной сходимости на полученное численное решение.
 2. Не приведены числовые значения важных параметров: чисел Рейнольдса (для конвекции) и Рэлея (для свободной конвекции) и Дарси (для пористой среды).
- 2) Доктора технических наук, профессора, заведующей кафедрой прикладной физики Уфимского университета науки и технологий, **Ковалевой Л.А.** с замечанием: целесообразно было бы привести обоснование выбора параметров расчётной области и двумерной постановки задачи.
- 3) Кандидата физико-математических наук, доцента, заведующий научно-исследовательской лабораторией петрофизики ПАО «Сургутнефтегаз» **Вольфа А.А.** с замечаниями:

1. При изложении материала на странице 20 в последнем абзаце присутствует предложение «При низкой проницаемости объём образовавшегося льда не зависит от фильтрационных свойств среды и конвективного течения в ней, так лимитируется уже теплопроводностью», содержание которого вызывает вопросы. Например, какие фильтрационные свойства имеются ввиду автором, если проницаемость и есть фильтрационное свойство среды?
 2. При приведенных автором значениях проницаемости пористой среды на рисунке 10 говорить о низкой проницаемости не корректно, так как объём образовавшегося льда не зависит от фильтрационных свойств среды, судя по рисунку, начиная с проницаемости 10^{-9} м² или 1000 мкм² (≈ 1000 мД), что для пористых сред считается очень высокой проницаемостью.
- 4) Кандидата физико-математических наук, доцента, заведующего лабораторией «Экспериментальная гидродинамика» Института механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра РАН, **Ахметова А.Т.** без замечаний.

5) Кандидата физико-математических наук, главного специалиста ООО "Тюменский нефтяной научный центр" **Пяткова А.А.** с замечаниями:

1. Не объяснён выбор исследуемой области. Почему рассматривается именно цилиндрическая область со стержнем?
2. На стр. 12 во втором абзаце автор пишет: "...впервые объяснено взаимное влияние и роли инверсии плотности воды и поверхностного натяжения в тепломассопереносе". Однако в процессе исследования менялись только граничные условия, а именно: свободная поверхность с имеющимся на ней поверхностным натяжением, свободная поверхность без учёта поверхностного натяжения, поверхность закрыта крышкой. Инверсия плотности воды при этом учитывалась в каждом расчёте. То есть автор исследовал влияние только поверхностного натяжения на процесс тепломассопереноса.
3. В третьей главе автор рассматривает пористую среду с изотропной проницаемостью. Однако в реальных пористых средах проницаемость в направлении Z обычно в несколько раз ниже проницаемости в направлении XU . Как изменятся выводы третьей главы при учете данного обстоятельства?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются специалистами высокого уровня в области теплофизики и механики жидкостей, а ведущая организация известна своими достижениями в области теплофизики и математического моделирования, что позволяет им оценить научную и практическую значимость диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

предложены:

- физико-математическая модель конвективного течения воды в цилиндрическом сосуде с охлаждающим элементом при немонотонной зависимости плотности воды от температуры, которая включает новые граничные условия на свободной поверхности (эффект Марангони), а также зависимости динамической вязкости, теплоёмкости, теплопроводности воды от температуры;

- постановка и решения многопараметрической задачи конвективного течения воды в высокопроницаемой пористой среде в цилиндрическом сосуде с

охлаждающим элементом на основе полной физико-математической модели тепломассопереноса при инверсии плотности воды, учитывающей зависимость динамической вязкости, теплоёмкости, теплопроводности воды, а также плотности, теплоёмкости, теплопроводности пористой среды от температуры;

- оценочный безразмерный параметр, позволяющий по характеристикам моделируемой системы делать вывод о необходимости учёта инверсии плотности воды в задачах тепломассопереноса в пористой среде, в том числе с учётом фазовых переходов;

- постановка и решения многопараметрической задачи кристаллизации воды в пористой среде в цилиндрическом сосуде с охлаждающим элементом на основе полной физико-математической модели тепломассопереноса при инверсии плотности воды, учитывающей конвективные течения, зависимость теплофизических параметров воды и пористой среды от температуры.

проведено исследование влияния поверхностного натяжения на тепломассоперенос в цилиндрическом сосуде;

изучено влияние конвективного теплопереноса на процесс охлаждения насыщенной водой пористой среды при учете явления инверсии плотности воды для различных значений проницаемости пористой среды;

исследовано влияние конвективного течения на структуру фронта кристаллизации и степень промерзания пористой среды

показана практическая значимость исследования в моделировании процессов тепломассопереноса в воде и водонасыщенных пористых средах при охлаждении.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

разработаны физико-математические модели для корректного описания структуры конвективных течений в воде и водонасыщенных пористых средах;

доказана корректность предложенной физико-математической модели путём сравнения экспериментальных данных с результатами численного исследования;

изучены основные особенности процессов конвективного тепломассопереноса (свободных конвективных течений) в воде и в водонасыщенных пористых средах при немонотонной зависимости плотности воды от температуры;

показано, что инверсия плотности воды существенным образом влияет на структуру и свойства свободных конвективных течений в воде и в водонасыщенных пористых средах, в том числе с учетом фазового перехода вода-лед;

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

созданы физико-математические модели для расчёта теплофизических процессов в воде и водонасыщенной пористой среде при учёте инверсии плотности воды;

предложен безразмерный оценочный параметр, позволяющий по характеристикам моделируемой системы делать вывод о необходимости учёта инверсии плотности воды в задачах тепломассопереноса в пористой среде, в том числе с учётом фазовых переходов;

определены численные характеристики безразмерного оценочного параметра, позволяющие выбрать необходимую схему расчета для решения практических задач;

представлены режимы конвективных течений в воде и водонасыщенных пористых средах, что необходимо для понимания процессов тепломассопереноса при температурах близких к температуре фазового перехода;

обоснована возможность использования предложенных физико-математических моделей конвекции в воде и водонасыщенных пористых средах для инженерных расчетов в практических задачах;

выполнены расчёты конвективных течений в воде и водонасыщенных пористых средах с учетом фазового перехода для цилиндрической области с охлаждающим элементом, что позволяет судить о процессах вблизи термостабилизаторов установленных в водонасыщенных грунтах;

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теория построена на основе фундаментальных законов теплофизики и механики многофазных систем;

идея исследования базируется на анализе уникальных свойств воды и их влияния на теплофизические процессы при возникновении конвективных течений в воде и в водонасыщенных пористых средах с учетом фазового перехода вода-лед;

использованы апробированные численные методы, проверенные при моделировании других задач тепломассопереноса в воде и водонасыщенных пористых средах, верифицированные по результатам классического физического эксперимента;

верифицированы результаты исследования многочисленным тестированием используемых программ при различных исходных данных и сопоставлением с расчётами других авторов и сопоставлением данных эксперимента с данными, полученными с применением предложенных физико-математических моделей.

Личный вклад автора состоит в участии во всех этапах исследования от постановки задачи и выбора метода её решения до получения и анализа результатов. Автор провёл расчёты и анализ результатов, а также сопоставил полученные данные с результатами других авторов.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

- 1) В работе не приведено обоснование выбора цилиндрической геометрии и параметров расчётной области и двумерной постановки задачи;
- 2) Как исследовалась сходимость полученного решения?
- 3) В работе представлены результаты для двумерного моделирования, в то время как используемый вычислительный пакет позволяет проводить трехмерные расчеты.

Соискатель Филимонова Л.Н. ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы и привела собственную аргументацию:

- 1) Термостабилизатор, установленный в обводненном грунте, или свая, погруженная в воду — это актуальные инженерные задачи, подразумевающие осесимметричную постановку. Поэтому выбрана цилиндрическая геометрия.

Так как основной целью работы является изучение влияния явления максимума плотности воды на тепломассоперенос и работа выполнена численными методами, необходима была верификация и валидация полученных результатов с данными эксперимента, которые были ранее выполнены на цилиндрических экспериментальных установках.

В работе предложен безразмерный оценочный параметр, который позволяет масштабировать исследуемые задачи, поэтому конкретные размеры области расчета не важны. Важно соотношение горизонтальных и вертикальных размеров, а оно подбиралось так, чтобы исключить влияние конвекции (отсутствие градиента температуры по вертикали) на течение при некотором удалении от охлаждающего элемента.

- 2) Устойчивость решений, конечно же всегда исследовалась. Расчеты проводились на различных сетках. Исследуя устойчивость и сходимость, старались найти оптимальный вариант, меняя количество ячеек расчетной области и выбирали среднее между устойчивостью и временем расчёта, который в свою очередь определялся вычислительными мощностями компьютера. Наибольшего машинного времени требовали задачи с фазовым переходом (4936 объёмов), которые рассчитывались несколько суток. Решение задач в пористой среде происходило быстрее – несколько часов. Задачи с конвективным течением без пористой среды тоже рассчитывались несколько часов.
- 3) Трёхмерная задача не рассматривалась. Во-первых: Небольшие числа Рейнольдса в моделируемых течениях позволяют полагать отсутствие трёхмерных вихрей и не решать трёхмерную задачу; во-вторых: трёхмерный расчет приводит к кратному увеличению времени счета, а это не позволяет оперативно отслеживать динамику. В работе основное внимание уделено инверсии плотности, было важно показать и подчеркнуть её роль.

На заседании 26.12.2023 диссертационный совет за решение научной задачи, имеющей значение для понимания и моделирования теплофизических процессов, происходящих при охлаждении воды и водонасыщенных пористых сред с учетом фазового перехода вода-лед, принял решение присудить Филимоновой Л.Н. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении электронного тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 9 докторов наук по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника (физико-математические науки), участвовавших в

