

Вх. №11/23  
от 07.12.23

УТВЕРЖДАЮ  
Ректор бюджетного учреждения  
высшего образования  
Ханты-Мансийского автономного округа – Югры  
«Сургутский государственный университет»  
д.п.н., профессор С.М. Косенок



«28» ноября 2023 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Представленная Филимоновой Л.Н. диссертационная работа посвящена исследованию влияния максимума плотности воды на структуру и свойства свободных конвективных течений в воде и в водонасыщенных пористых средах, в том числе с учётом фазового перехода вода-лёд. В работе проанализированы осесимметричные задачи, которые обоснованы использованием в практике свайных оснований и различных термостабилизационных устройств. Подробно описаны особенности течений, обусловленные наличием максимума плотности воды. Предложен критерий, позволяющий определить необходимость учета инверсии плотности в инженерных расчетах. Диссертация изложена на 98 страницах, содержит 30 рисунков и 2 таблицы. Список использованной литературы включает 94 наименования. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Тема и содержание диссертации соответствует специальности 1.3.14. «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Актуальность исследования

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена потребностью исследований теплофизических явлений в случаях охлаждения природных и техногенных систем до температур меньших температуры инверсии плотности воды. Практическая значимость исследований



обусловлена широким применением инженерных сооружений в зонах обитания человека с отрицательными температурами и активным использованием различных термостабилизирующих устройств. Наличие максимума плотности воды может существенно влиять на процесс тепломассопереноса.

Новизна исследования и наиболее существенные научные результаты

Научная новизна и значимость полученных соискателем результатов состоит в исследовании взаимодействий течений, вызванных поверхностным натяжением на свободной поверхности (эффект Марангони), и свободным конвективным течением воды при инверсии её плотности. С помощью оценочного параметра по характерным свойствам системы сделан вывод о необходимости расчётов конвективного течения в пористых средах при инверсии плотности воды. Детально исследовано влияние конвективных течений на форму границы фазового перехода в пористых средах, и влияние инверсии плотности на степень промерзания пористой среды.

Значимость научных результатов для науки и практики

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в дальнейших исследованиях тепломассопереноса в холодной воде в пористых средах. Практическая значимость обусловлена возможностью учета результатов, полученных в диссертации при проектировании технологических объектов и инженерных сооружений в районах Крайнего Севера.

Структура диссертации

Во введении описана актуальность темы, поставлены цели и задачи исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна, практическая и теоретическая значимость исследования, приведены данные об апробации результатов и публикациях по теме исследования.

В первой главе приводится анализ опубликованных работ по исследованию конвективных течений в воде и водонасыщенных пористых средах. Рассмотрены уравнения и безразмерные параметры, описывающие свободную конвекцию; эффект Марангони; особенности течений при учёте инверсии плотности воды; конвективный перенос в пористых средах; конвективное течение при кристаллизации воды.

Во второй главе представлена физико-математическая модель свободного конвективного течения воды в цилиндрическом сосуде с охлаждающим элементом при инверсии её плотности. Одновременно с инверсией плотности воды учитываются натяжение на свободной поверхности



(эффект Марангони), а также зависимости динамической вязкости, теплоёмкости и теплопроводности воды от температуры.

В третьей главе представлено численное решение 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.

В четвёртой главе представлено численное решение 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

В заключение приведены основные результаты и выводы, сделанные автором диссертационной работы.

К основным следует отнести следующие результатам диссертационного исследования:

1. модель конвективного течения холодной воды, при немонотонной зависимости плотности от температуры, которая учитывает граничные условия на свободной поверхности, а также учитывает зависимости динамической вязкости, теплоёмкости, теплопроводности воды от температуры;

2. демонстрация корректности представленной модели путём сравнения проведенных расчетов, с ранее полученными данными натурных и вычислительных экспериментов.

3. результаты анализа полученных в работе численных решений многопараметрической задачи конвективного течения холодной воды в высокопроницаемой пористой среде, в том числе при наличии фазового перехода.

Степень обоснованности положений и выводов, представленных в диссертации

Математические модели, представленные в диссертационной работе, основаны на фундаментальных законах механики сплошных сред и термодинамики. В работе использованы апробированные стандартные методы вычислительной гидродинамики и тепломассообмена, интегрированные в открытую платформу для численного моделирования



задач механики сплошных сред OpenFOAM. Работа содержит результаты тестовых расчетов и их сопоставление с данными натурального эксперимента, что позволяет сделать вывод о корректности и обоснованности применяемых математических моделей, численных методов и программного обеспечения.

#### Замечания

1. Представленные автором результаты сосредоточены на расчётах для цилиндрической области, хотя для практических задач существенной оказываются и другие формы конструкций. Сравнительный анализ численной модели основывается на одной работе (для проверки корректности модели, было проведено сопоставление с результатами, полученными Cawley).

2. Следовало бы более ясно изложить расчётную модель, учитывающую наличие фазового перехода в смеси жидкость-лёд, чётко оттенить границы её применимости.

3. В интерполяционной формуле (2.1.4) используются многочлены пятой степени, однако табличные данные (таблица 2.1.1) для использовавшихся в расчётах коэффициентов приведены лишь до третьего номера. Данные для C4 и C5 здесь отсутствуют, а появляются в Таблице 3.1.1 для полиномиальной интерполяции физических характеристик скелета пористой среды.

4. Визуализация представленных расчётов не содержит линий тока жидкости, о характере течения приходится судить по оттенкам окраски области течения и приводится поле скоростей течения, например, на рис. 2.2.2, рис. 3.3.3 - 3.3.5. На рис. 2.2.4 проведено «сравнение средней скорости движения жидкости в сосуде» в зависимости от времени охлаждения, однако из текста диссертационной работы не ясна процедура вычисления этого среднего значения, и что понимается под этой величиной.

5. Применение вычислительного пакета OpenFOAM требует обсуждения его параметров при реализации конкретных расчётов (количество контрольных объёмов, время расчёта, критерии остановки). Расчёт при заданном количестве ячеек на стр. 79 следовало бы обсудить с точки зрения вычислительной устойчивости результатов при их изменении.

6. В первой главе диссертации подробно описаны критерии подобия рассмотренных математических моделей, но во всех остальных главах, модели и результаты расчетов приведены только в размерном виде. Следовало бы наряду с размерной формой математической модели представить и безразмерную форму, а также указать диапазоны критериев подобия, в которых получены результаты расчетов.

#### Заключение

Замечания по диссертации не носят принципиального характера и не снижают в целом достаточно высокого уровня диссертационного



исследования. Представленная диссертация является актуальной, законченной научно-квалификационной работой соответствующей специальности 1.3.14. «Теплофизика и теоретическая теплотехника». Полученные в диссертации результаты являются достоверными и обладают новизной. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы. Результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. Результаты диссертационной работы докладывались на международных и всероссийских конференциях и научных семинарах.

Диссертационная работа «Тепломассоперенос в воде и водонасыщенных пористых средах в области инверсии плотности воды» соответствует требованиям пунктов 9 – 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 года, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Филимонова Людмила Николаевна заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертационная работа Филимоновой Л.Н. и отзыв обсуждены и одобрены на научном семинаре кафедры прикладной математики Сургутского государственного университета (02 ноября 2023 года, протокол №4).

Отзыв подготовил:

Профессор кафедры прикладной математики  
Сургутского государственного университета,  
д.ф.-м.н. по специальности  
05.13.18: Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

Галкин Валерий Алексеевич

628412, Ханты-Мансийский автономный  
округ – Югра, г. Сургут, проспект Ленина, д. 1  
тел.: +7(3462) 763-108  
e-mail: galkin\_va@surgu.ru

ЗАВЕРЯЮ  
СПЕЦИАЛИСТ ПО ПЕРСОНАЛУ  
ВО «СУРГУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



Подпись В.А. Галкина удостоверяю:

Учёный секретарь  
Сургутского государственного университета  
д.б.н., доцент

В.В. Козлова

Сведения об организации:

Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Сургутский государственный университет».

Адрес: 628412, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Сургут, проспект  
Ленина, 1. Телефон: +7(3462) 76-29-00. E-mail: [secretar@surgu.ru](mailto:secretar@surgu.ru). Web-сайт:  
<http://www.surgu.ru/>