

## Отзыв

официального оппонента, кандидата физико-математических наук Дюкиной Надежды Сергеевны, на диссертационную работу Петрова Сергея Сергеевича «Новая модель динамики-термодинамики морского льда на кусочно-гладкой поверхности и ее параллельная численная реализация на неструктурированных треугольных сетках», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертационная работа Петрова С.С. посвящена вопросам анализа, разработки и программной реализации численных методов исследования динамики и термодинамики морского льда на неструктурированных треугольных сетках.

**Актуальность работы.** Исследование динамики и термодинамики морского льда имеет большое практическое значение при моделировании климатических и экологических процессов, в вопросах арктической навигации и дрейфа со льдом загрязняющих веществ. Общемировой практикой для моделирования двумерного дрейфа морского льда являются непрерывные модели, разделяющие одномерные термодинамические процессы намерзания и таяния льда (и снега на нем) и двумерную горизонтальную динамику дрейфа, деформации и переноса с учетом сил поверхностного трения ветра и океана, силы Кориолиса, взаимодействия льдин между собой. Важным требованием к разрабатываемым ледяным моделям является их масштабируемость: сетка порядка километра позволяет использовать модель для оперативного прогноза, сетки грубого разрешения – до сотен километров – эффективна для долгосрочных прогнозов. В последние десятилетия идет совершенствование и уточнение математических моделей процессов динамики и термодинамики морского льда и их численных реализаций для получения более точного и масштабируемого решения. Вместе с тем, существующие математические модели и отечественные программные комплексы еще не вполне отвечают современным требованиям краткосрочного и долгосрочного прогноза состояния ледяного покрова Арктики. Заявленная в диссертационной работе тема исследования, включающая анализ, разработку и программную реализацию численных моделей динамики и термодинамики морского льда, актуальна и важна с академической и прикладной точки зрения.

**Структура и содержание работы.** Диссертационная работа изложена на 142 страницах и состоит из введения, 3 глав, заключения и 1 приложения. Список литературы содержит 110 источников, в том числе 44 исследования за последние 10 лет, что говорит о достаточном анализе современного состояния вопроса, 10 источников из сети Интернет, 2 патента программ для ЭВМ, разработанных диссертантом.

**Во введении** обоснована актуальность проводимых исследований, перечислены основные факторы, формирующие физические модели морского льда, приведен краткий обзор численных реализаций зарубежных и отечественных моделей динамики и термодинамики морского льда, сформулирована цель работы и определены задачи, методы и подходы, необходимые для достижения цели. Приведена научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы выносимые на защиту положения.

**В первой главе** работы описаны методы численного решения уравнений переноса скаляров в задачах динамики морского льда. Сформулированы основные требования к численному решению. Для треугольных сеток с двумя выбранными автором типами разнесения переменных (“A”, “CD”) определен вид базисных функций для

пространственной аппроксимации уравнений и схемы численного интегрирования уравнений по времени. Сделаны оценки сходимости, монотонности и точности построенных схем. Тестирование описанных схем выполнено на задачах переноса разрывного поля примеси (скаляра) на сфере дивергентным и бездивергентным потоком скорости. Сделаны оценки времени работы различных решателей уравнения переноса и возможности по их ускорению в параллельной реализации.

**Во второй главе** приведена система уравнений динамики морского льда с вязко-пластичной реологией. Уравнения движения сред основаны на законе баланса импульса и законах сохранения. Приведено и проанализировано несколько реологических моделей морского льда. Обоснован переход при численной многопроцессорной реализации от вязко-пластичной реологии Хиблера к эволюционным подходам EVP и mEVP дискретизации по времени. Детализирован процесс пространственной конечно-элементной аппроксимации на треугольных сетках типа "А" и "CD". Проведено тестирование двух разработанных моделей на плоской и сферической поверхности. Продемонстрирована предлагаемая диссертантом методика прогноза дрейфа льда в Арктическом бассейне, включающая построение триангуляции со сгущением, параллельную интерполяцию геоданных на модельную сетку типа "А" и тестовый двухнедельный запуск. На основании выполненного прогноза дрейфа и сплоченности льда сформулированы требования к пространственному разрешению для моделирования линейных кинематических особенностей.

**Третья глава** посвящена численному решению локально-одномерного уравнения термодинамики морского льда со снегом. Обоснована целесообразность реализации сигма-метода для дискретизации уравнения энтальпии. Конечно-объемная пространственная дискретизация построена в связке с методом BL99 интегрирования по времени. Автором предложен итерационный процесс одновременного расчета профиля и значений поверхностных температур. Разработанный подход к решению задачи термодинамики реализован в одномерной и нульмерной постановке, приведены результаты тестирования моделей.

**В заключении** приведены основные результаты работы.

**Научная новизна.** Выполненные диссертантом исследования расширили спектр применяемых в задачах динамики морского льда схем двумерной адвекции на треугольных сетках с различным видом разнесения переменных. Предложенная в диссертации 2-шаговая вариация стандартной схемы Тейлора-Галеркина в 2 раза ускоряет перенос скалярных величин на треугольной сетке типа "А" при незначительной потере в точности. Разработан алгоритм построения триангуляции Арктического бассейна со сгущением в области с потенциально высокой сплоченностью морского льда, узких проливов и бухт; алгоритм использует сгруппированные данные береговой линии и реализован с помощью современных отечественных программных пакетов. Предложен локально-декартов подход для численного решения системы уравнений динамики морского льда, делающий код универсальным для произвольной геометрии расчетной области. Предложен новый итерационный численный метод решения нелинейного одномерного уравнения теплопроводности морского/пресного льда со снегом с подвижной границей, одновременно обновляющий одномерный профиль и значения поверхностных температур, согласованных с нелинейными граничными условиями, который в случае сходимости соответствует неявной временной схеме.

**Практическая и научная ценность работы.** Разработан программный комплекс, реализующий предложенные численные схемы моделирования процессов динамики и термодинамики морского льда со снегом. Продемонстрирована возможность

краткосрочного прогноза динамики морского льда в Северном Ледовитом океане с реалистичным атмосферным и океаническим внешним воздействием. Профилировка кода и оценки масштабируемости отдельных блоков решателя, сделанные в работе, позволят подобрать оптимальную конфигурацию модели для реальных расчетов. Разработанный численный метод решения уравнения диффузии тепла реализован в одномерном и нульмерном вариантах и успешно протестирован на данных полевого эксперимента: получен хороший результат прогноза профиля температур и толщины одномерной модели на длительном временном интервале. Проведено качественное и количественное сравнение разработанных одномерной и нульмерной моделей термодинамики и показана работоспособность нульмерной модели для предсказания поверхностной температуры.

**Публикации и апробация.** Результаты диссертационной работы докладывались более чем на двадцати российских и международных конференциях и рабочих семинарах. Основные научные результаты по теме диссертации изложены в 4 печатных изданиях, удовлетворяющих требованиям ВАК.

**Обоснованность и достоверность научных положений и выводов** обусловлена глубоким анализом используемых методов и подходов: материал, изложенный в диссертации, опирается на широкий список научной литературы, посвященный рассматриваемым методам и их аналогам. Верификационный базис для моделей динамики и термодинамики морского льда включает численные эксперименты с искусственным и реалистичным внешним воздействием, проводится сопоставление с результатами расчета в ведущих мировых моделях. Список публикаций диссертанта (в том числе, 4 – из списка ВАК) и его личное участие в большом количестве научных конференций свидетельствует о том, что научная общественность ознакомлена с результатами диссертационной работы.

#### **Замечания по содержанию диссертации.**

1. Автор широко освещает методы решения задач динамики и термодинамики морского льда, но не рассматривает взаимосвязь этих процессов. Закономерным итогом видится решение задачи динамики и термодинамики морского льда в связанной постановке или обоснование незначительности взаимного влияния, но в работе этот вопрос никак не исследуется.
2. При приведении результатов расчета модельных задач 2.7.1-2.7.3 следовало указать на рисунках расположение координатных осей, поскольку начальные и граничные условия задач описываются функциями от координат (x,y). Приведенные в модельных задачах поля скоростей и полных деформаций позволяют качественно оценить динамику льда и согласование результатов на сетках "А" и "CD". Было бы полезно, по аналогии с выполненным в главе 3 сравнением одномерной и нульмерной моделей, провести количественное сравнение в ряде контрольных точек расчетной области, оценить относительные и абсолютные различия полученных результатов.
3. В пространственной аппроксимации на сетке типа "А" автор использует разложение пробной функции  $u_h$  на базисные функции Куранта только для внутренних узлов сетки, что соответствует граничным условиям прилипания. Видимо, с этим связаны нулевые скорости на границах расчетных областей для расчетов на "А"-сетке в тестах 2.7.1, 2.7.2. Также в тестах 2.7.1-2.7.3 заметны максимумы полных деформаций на границе расчетных областей как для "А", так и для "CD"-сеток. Полные деформации на границе настолько значительны, что сопоставимы или даже превосходят деформации внутри подобласти. Как автор предполагает решать эту проблему?
4. Приведенные в приложениях листинги псевдокода недостаточно информативны.
5. В работе имеется ряд неточностей:

- а. в таблице 4 пункта 2.4 приводится значение ускорения свободного падения  $g=9,81 \text{ м/с}^2$ . Но в широтах севернее  $60^\circ$  ускорение свободного падения находится в диапазоне  $9,8184-9,8322 \text{ м/с}^2$  (Енхович А.С., «Краткий справочник по физике»).
- б. В модельной задаче п.3.3.1 приводится температура замерзания воды с соленостью 30 psu:  $-162^\circ\text{C}$ .
- с. Имеется ряд мелких опечаток, грамматических и пунктуационных ошибок, не мешающих смысловому восприятию работы.

**Общая оценка работы.** Диссертация Петрова Сергея Сергеевича «Новая модель динамики-термодинамики морского льда на кусочно-гладкой поверхности и ее параллельная численная реализация на неструктурированных треугольных сетках» является законченным исследованием.

Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертационной работы.

Сделанные оппонентом замечания не снижают общей положительной оценки и не уменьшают высокой теоретической и практической ценности работы.

Считаю, что диссертация отвечает всем квалификационным требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор **Петров Сергей Сергеевич** заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Официальный оппонент,

кандидат физико-математических наук  
(специальность 01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела), доцент  
Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского"

Дюкина Надежда Сергеевна

«07» сентября 2023 г.

Подпись сотрудницы ННГУ им. Н.И. Лобачевского Дюкиной Н.С. удостоверяю

Ученый секретарь ученого совета ННГУ им. Н.И. Лобачевского



Черноморская Лариса Юрьевна

«07» сентября 2023 г.