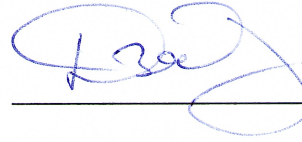
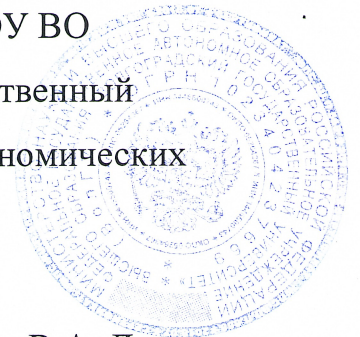


УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор ФГАОУ ВО
«Волгоградский государственный
университет», доктор экономических
наук, доцент



В.А. Дзедик



« 14 » 03 2024 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертацию

Иванова Александра Владимировича

«Регуляризованные уравнения мелкой воды для моделирования неоднородных течений и течений со свободной поверхностью в задачах геофизики», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Одним из перспективных и развивающихся методов численного моделирования процессов гидро и газодинамики является разработанный в институте прикладной математики им. М.В. Келдыша подход, в рамках которого вместо исходной системы уравнений гидро/газодинамики решается система квазигидро- (КГиД) или квазигазодинамических (КГД) уравнений соответственно. Для их вывода исходные уравнения осредняются по малому промежутку времени, в результате чего в них образуются дополнительные слагаемые, которые носят диссипативный характер. Регуляризованные таким образом уравнения могут быть решены с применением явных разностных

схем с использованием центральных разностей для пространственных производных, схемы при этом являются условно устойчивыми.

Диссертационная работа Иванова А.В. посвящена развитию КГД подхода регуляризации уравнений в рамках моделирования неоднородных течений и течений со свободной поверхностью в приближении мелкой воды. В представленной работе данная тематика раскрывается в следующих направлениях:

1. Развитие уже существующих алгоритмов численного моделирования регуляризованных уравнений мелкой воды.
2. Построение системы регуляризованных уравнений двухслойной мелкой воды для численного моделирования неоднородных течений с выраженной двухслойной стратификацией.
3. Разработка однородного алгоритма для численного моделирования переноса пассивного скаляра в мелкой воде.
4. Реализация решателя для моделирования течений в приближении мелкой воды в рамках открытого пакета программ OpenFOAM.

Основными результатами работы являются:

1. Разработка усовершенствованных алгоритмов численного решения регуляризованных уравнений мелкой воды для расчёта зон обводнения/осушки и учёта внешних сил и приливных воздействий. Разработка на их базе исследовательского комплекса программ для моделирования прибрежной акватории Карского, Печорского и части Баренцева морей.
2. Построение системы регуляризованных уравнений двухслойной мелкой воды и алгоритм численного решения.
3. Модификация системы регуляризованных уравнений мелкой воды, включающая в себя уравнение переноса пассивного скаляра. Разработка и реализация численного алгоритма решения полученной системы уравнений и моделирование с его помощью

циркуляции озера Валунден (о. Шпицберген). В численном эксперименте получены распределения температур и скоростей, что позволило теоретически обосновать наблюдаемые толщины слоя льда на поверхности озера.

4. Разработка нового решателя для моделирования течений в приближении мелкой воды в открытом пакете программ OpenFOAM.

Содержание диссертации.

Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения и списка литературы, включающего в себя 80 наименований. Объем диссертации составляет 125 страниц.

Во введении обосновывается актуальность, формируются цели и задачи работы, описана научная новизна и значимость. Кроме того, в этом разделе приводятся краткий литературный обзор по рассматриваемой тематике, личный вклад автора и список конференций, на которых прошли апробацию материалы диссертационной работы.

В первой главе автор кратко описывает систему регуляризованных уравнений мелкой воды: феноменологический вывод системы, метод численного решения и его свойства. Приводится усовершенствованный алгоритм расчёта зон обводнения/осушки, а также методика учёта приливных колебаний уровня моря и внешних воздействий. Также кратко приводится схема работы исследовательского комплекса, в основе которого лежат описанные алгоритмы. В конце главы ставится задача о моделировании прибрежной акватории Карского, Печорского и части Баренцева морей и описываются результаты моделирования.

Вторая глава посвящена моделированию неоднородных течений в приближении мелкой воды с использованием регуляризованных уравнений. Рассмотрено два подхода: моделирование двухслойных течений в приближении мелкой воды и перенос примеси в рамках пассивного скаляра в

мелкой воде. Приведена система регуляризованных уравнений двухслойной мелкой воды, выписана разностная схема аппроксимации уравнений. Описаны одномерные тестовые задачи и результаты их моделирования. Для модели переноса примеси в мелкой воде описывается метод регуляризации уравнения переноса пассивного скаляра и записывается однородный алгоритм численного решения совместной системы уравнений переноса и гидродинамики. Приводится апробация алгоритма на одномерных и двумерных тестовых задачах. Также описывается постановка задачи о моделировании течений в озере Валунден, возникающих в результате приливных колебаний уровня воды во фьорде. Перенос холодной воды втекающим приливным потоком рассматривается как процесс переноса примеси, в результате чего качественно оценивается концентрация холодной воды в озере. На основе данных о концентрации делается предположение об изменении толщины льда на поверхности озера.

В третьей главе описываются особенности разработки решателя RSWEFoam, предназначенного для моделирования течений в приближении мелкой воды. Аппроксимация регуляризованных уравнений мелкой воды обобщена для случая неоднородной сетки в терминах конечного объёма. Приведены тестовые расчетные задачи и результаты моделирования.

Научная новизна.

Научная новизна представленной работы проявляется в двух ключевых аспектах.

Во-первых, впервые в рамках КГД-подхода регуляризации рассмотрено моделирование неоднородных течений в приближении мелкой воды. Выписаны регуляризованные уравнения двухслойной мелкой воды и регуляризованное уравнение переноса. Описан однородный численный алгоритм решения описанных систем.

Во-вторых, представлен новый решатель для модели мелкой воды RSWEFoam, реализованный в открытом пакете OpenFOAM на основе регуляризованных уравнений.

Достоверность представленных результатов выражается в тестировании автором всех программных реализаций описанных численных алгоритмов как на модельных задачах с существующим точным решением, так и на известных расчетных примерах. Для результатов расчетов показана монотонная сходимость при сгущении расчетной сетки, а также проведено сравнение с результатами других моделей и алгоритмов. Материалы диссертационной работы были представлены на конференциях и семинарах и опубликованы в российских и зарубежных журналах.

Практическая ценность полученных результатов заключается в реализации новых вычислительных алгоритмов для моделирования неоднородных течений в приближении мелкой воды, позволяющих моделировать большой спектр задач, в особенности связанных с проблемами окружающей среды. Также практическая ценность состоит в создании решателя для моделирования течений в приближении мелкой воды RSWEFoam, который благодаря возможности расчета зон обводнения и осушки может быть использован для моделирования подтопления береговых зон при значительных изменениях уровня моря.

Рекомендации по использованию результатов.

Результаты, представленные в диссертационной работе, могут представлять значительный интерес для организаций и исследовательских институтов в качестве расчетной модели для моделирования гидродинамики в приближении мелкой воды и моделирования неоднородных течений в приближении мелкой воды. Перечислим некоторые примеры организаций: морской гидрофизический институт РАН (Севастополь), лаборатория

свободного программного обеспечения цифрового моделирования технических систем ИСП РАН (Москва), кафедра физики моря и вод суши физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва), институт механики МГУ (Москва), институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск), Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону), институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (Новосибирск), государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова.

Замечания по диссертации

Положительно характеризуя диссертацию **Иванова Александра Владимировича** в целом, можно сделать ряд замечаний.

1. Необходимо пояснить, как входят внешние силы в регуляризаторы для однослойной и для двухслойной моделей мелкой воды. Должны ли они быть включены в виде дополнительных слагаемых или нет?
2. Регуляризованные уравнения мелкой воды можно получить для баротропного приближения уравнений газовой динамики при специальном выборе функции плотности и показателя адиабаты. В работе было бы полезно описать, какие именно законы сохранения наследуют уравнения РУМВ при их получении из уравнений КГД системы уравнений.
3. Условие устойчивости Куранта в виде (1.15) на стр.16 не обеспечивает переход к одномерной модели и требует модифицированной формы записи.
4. Решение задачи о циркуляции озера Валунден во второй главе недостаточно физически обосновано. Непонятно, как рассчитываемая концентрация C связана с температурой воды и толщиной льда. Кроме того, учет силы Кориолиса для очень маленького озера и канала притока заведомо дает меньший вклад

по сравнению с неопределенностями из-за неизвестной топографии дна и не учета гидравлического сопротивления.

Сделанные замечания не уменьшают значимости представленных научных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Заключение.

Диссертационная работа Иванова А.В. является законченным научно-квалификационным исследованием, основные результаты которого в достаточной мере отражены в публикациях и изданиях из перечня ВАК и прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях и семинарах. Работа ясно изложена и хорошо оформлена. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённых постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям, и её автор, Иванов Александр Владимирович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на расширенном заседании кафедры фундаментальной информатики и оптимального управления (ФИОУ) института математики и информационных технологий ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет» (протокол № 3 от 04.03.2024).

Отзыв составлен доктором физико-математических наук, профессором, зав. каф. фундаментальной информатики и оптимального управления Ворониным Александром Александровичем и кандидатом физико-математических наук, доцентом Храповым Сергеем Сергеевичем.

Заведующий кафедрой фундаментальной информатики и оптимального управления, доктор физико-математических наук, профессор



А.А. Воронин

Кандидат физико-математических наук, доцент



С.С. Храпов

Полное наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Волгоградский государственный университет", 400062, Южный федеральный округ, Волгоградская область, г. Волгоград, проспект Университетский, 100. Телефон, факс 8 (8442) 46-02-63, e-mail: ob.otdel@volsu.ru. Сайт: <https://volsu.ru>. Кафедра ФИОУ: тел. (8442) 46-02-61, e-mail: fiou@volsu.ru

