

«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. директора ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

по научной работе

член-корреспондент РАН

М.В. Якобовский

«26» сентября 2023 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

Диссертация «Регуляризованные уравнения мелкой воды для моделирования неоднородных течений и течений со свободной поверхностью в задачах геофизики» выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

В период подготовки диссертации соискатель Иванов Александр Владимирович обучался в очной аспирантуре Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» по направлению 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника», прошёл государственную итоговую аттестацию и по решению Государственной экзаменационной комиссии получил квалификацию «Исследователь. Преподаватель-исследователь».

В 2019 году окончил Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова по направлению 03.04.02 «Физика». Выдан диплом, присуждена степень «Магистр».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2023 году Федеральным государственным учреждением «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

В настоящее время соискатель работает в должности младшего научного сотрудника во внештатной научно-исследовательской лаборатории ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Елизарова Татьяна Геннадьевна работает в должности главного научного сотрудника отдела №16 Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что развитие и разработка новых методов для моделирования неоднородных течений является важным и актуальным направлением ввиду широкого распространения неоднородных течений со свободной поверхностью и необходимостью решения прикладных задач. Кроме того, тематика работы актуальна в рамках развития квазигазодинамических (КГД) и квазигидродинамических (КГиД) методов.

Целью диссертации является усовершенствование существующих методов для моделирования прикладных задач в рамках регуляризованных уравнений мелкой воды, разработка новых численных методов для моделирования неоднородных течений в приближении мелкой воды, а также создание нового решателя для моделирования течений в приближении мелкой воды в рамках открытого пакета программ.

В диссертации решались следующие задачи:

1. Усовершенствование текущих методов моделирования в рамках регуляризованных уравнений мелкой воды.
2. Построение регуляризованных уравнений двухслойной мелкой воды, метод их численного решения и решение модельных задач.
3. Регуляризация уравнения переноса и моделирование процессов переноса в рамках приближения мелкой воды.
4. Реализация решателя в рамках открытого пакета программ OpenFOAM для моделирования течений в приближении мелкой воды.

Основные результаты диссертации:

1. Разработаны усовершенствованные алгоритмы численного решения регуляризованных уравнений мелкой воды для расчёта сухих зон, выполнения условий «хорошей балансировки» и учёта внешних сил и приливных воздействий. На базе усовершенствованных алгоритмов создан исследовательский комплекс программ для моделирования прикладных задач. С его помощью выполнено моделирование прибрежной акватории Карского, Печорского и части Баренцева морей.
2. На основе квазигазодинамического подхода построена система регуляризованных уравнений двухслойной мелкой воды и создан алгоритм их численного решения. Выполнена валидация алгоритма на характерных модельных задачах.
3. Предложена модификация регуляризованной системы уравнений мелкой воды, включающая в себя уравнение переноса пассивного скаляра. Разработан и программно реализован численный алгоритм решения полученной системы уравнений. С его помощью проведено моделирование 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. На базе усовершенствованных и доработанных алгоритмов решения регуляризованных уравнений мелкой воды создан новый решатель RSWEFoam в рамках открытого пакета программ OpenFOAM. Проведена апробация решателя на модельных задачах.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые в рамках квазигазодинамического подхода были построены и применены алгоритмы для моделирования неоднородных течений в приближении двухслойной мелкой воды.
2. Впервые получена система уравнений для переноса пассивного скаляра в рамках регуляризованных уравнений мелкой воды и реализован эффективный численный алгоритм решения.
3. Реализован новый решатель в рамках открытого пакета программ OpenFOAM для моделирования течений в приближении мелкой воды.

Научная и практическая значимость работы заключается в разработке новых однородных алгоритмов для моделирования неоднородных течений со свободной поверхностью. Применение регуляризованных уравнений даёт возможность проводить моделирование исследуемых водоёмов в режиме реального времени. Созданные методы можно использовать для мониторинга экологически важных объектов, а также встраивать в уже существующие численные пакеты.

Реализация решателя в рамках OpenFOAM даёт возможность воспользоваться описанными в работе методами для решения различных задач другими исследователями, что важно, как для практических приложений, так и для развития КГД методов, а также позволит поддерживать, модифицировать и создавать новые решения на базе текущих разработок.

Достоверность результатов обеспечивается их сравнением с данными экспериментов и валидацией численных алгоритмов на модельных задачах с

известным решением. Результаты хорошо согласуются с результатами, полученными другими исследователями и уже существующими расчётами.

Материалы диссертации полно представлены в работах, опубликованных соискателем в 13 печатных изданиях, 8 из которых – статьи в рекомендованных изданиях перечня ВАК, а 4 опубликованы в рецензируемых изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и/или Web of Science. Кроме того, 3 работы опубликованы соискателем без соавторов.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях из Перечня ВАК:

1. Елизарова Т.Г., Иванов А.В. Квазигазодинамический алгоритм численного решения двухслойных уравнений мелкой воды // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. № 69. С. 1–27. [ВАК]
2. Елизарова Т.Г., Иванов А.В. Регуляризованные уравнения для численного моделирования течений в приближении двухслойной мелкой воды // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2018. № 5. С. 741–761. [ВАК, Scopus, WoS]
3. Елизарова Т.Г., Иванов А.В. Об однородном алгоритме численного моделирования волны цунами // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2018. № 3. С. 1830103–1–1830103–6. [ВАК]
4. Елизарова Т.Г., Иванов А.В. Метод регуляризации для численного моделирования переноса примеси в мелкой воде // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 27. С. 1–28. [ВАК]
5. Елизарова Т.Г., Иванов А.В. Численное моделирование переноса пассивного скаляра в мелкой воде с использованием квазигазодинамического подхода // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2020. Т. 60, № 7. С. 1248–1267. [ВАК, Scopus, WoS]
6. Иванов А.В. Вычислительный комплекс для моделирования морских течений с применением регуляризованных уравнений мелкой воды // Матем. моделирование. 2021. Т. 33, № 10. С. 109–128. [ВАК, Scopus, WoS]

7. Иванов А.В., Крапошин М.В., Елизарова Т.Г. О новом методе регуляризации уравнений двухфазной несжимаемой среды// Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2021. № 61. С. 1–27. [ВАК]
8. Иванов А.В. О реализации модели мелкой воды на базе квазигазодинамического подхода в открытом программном комплексе OpenFOAM // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2023. № 28. С. 1–27. [ВАК]

Статьи в рецензируемых изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и/или Web of Science (WoS):

9. Elizarova T.G., Ivanov A.V. Numerical simulation of coastal flows with passive pollutant by regularized hydrodynamic equations in shallow water approximation // GISTAM 2019 5th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management. Heraklion, Crete, Greece, 2019. P. 358–365. [Scopus]
10. Elizarova T.G., Ivanov A.V., Kuleshov A.A. Mathematical modelling of Russian northern coastal waters in the shallow water approximation // Journal of Physics: Conference Series. 2021. P.012017–012017. [Scopus]
11. Ivanov A. V. A software package for flows simulation in the coastal regions of the Kara and Barents seas using shallow water approximation // Proceedings of the 2021 Ivannikov ISPRAS Open Conference. 2021. P. 165–169. [Scopus]
12. Freezing of tidal flow in lake Vallunden (Spitsbergen) / A. V. Marchenko, E. G. Morozov, A. V. Ivanov et al. // Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. 2021. P. 1–10.
13. Ice thickening caused by freezing of tidal jet / A. V. Marchenko, E. G. Morozov, A. V. Ivanov et al. // Russian Journal of Earth Sciences. 2021. Vol. 21, №. 2. P. 1–8. [Scopus, WoS]

Личный вклад соискателя состоит в разработке математической модели регуляризованных уравнений двухслойной мелкой воды, построении

регуляризованного уравнения переноса примеси в мелкой воде, написании всех программных кодов, их тестировании и оформлении результатов в виде статей и докладов. Также автором была выполнена разработка и реализация нового вычислительного модуля в рамках открытого программного комплекса OpenFOAM для библиотеки КГД/КГиД течений. Автор принимал активное участие в развитии КГД/КГиД методов.

Основные результаты диссертации докладывались на следующих научных конференциях и институтских семинарах:

- 1) XXIV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2017», Москва, Россия, 10-14 апреля 2017.
- 2) Семинар лаборатории Цунами им. академика С.Л. Соловьёва, ИО РАН, Москва, Россия, 22 декабря 2017.
- 3) Ломоносовские чтения - 2018, МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 16-25 апреля 2018.
- 4) XXVI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019», Москва, Россия, 11 апреля 2019.
- 5) 5th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM 2019), Heraklion, Crete, Greece, Греция, 3-5 мая, 2019.
- 6) Всероссийская конференция молодых учёных-механиков, «Буревестник» МГУ, Сочи, Россия, 3-13 сентября 2020.
- 7) Международная конференция «Марчуковские научные чтения 2020», посвящённая 95-летию со дня рождения академика Гурия Ивановича Марчука (МНЧ-2020) Академгородок, Новосибирск, Россия, 19-23 октября 2020.
- 8) 16th OpenFOAM Workshop, University College Dublin, Dublin, Ireland, Ирландия, 8-11 июня 2021.
- 9) Открытая международная конференция ИСП РАН им. В.П. Иванникова, Москва, Россия, 2-3 декабря 2021.

10) Открытая международная конференция ИСП РАН им. В.П. Иванникова, Москва, Россия, 1-2 декабря 2022.

Содержание диссертации соответствует специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Диссертация «Регуляризованные уравнения мелкой воды для моделирования неоднородных течений и течений со свободной поверхностью в задачах геофизики» Иванова Александра Владимировича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Заключение принято на заседании семинара отдела №15 «Математическое моделирование» ИПМ им. М.В. Келдыша РАН под руководством член-корр. РАН, д.ф.-м.н., зав. отделом №15 В.Ф. Тишкина и д.ф.-м.н., г.н.с. А.А. Кулешова.

Присутствовало на заседании 15 чел. Среди них 6 чел. д.ф.-м.н. и 6 чел. к.ф.-м.н. по специальности диссертации.

Выступили с положительной оценкой диссертации: д.ф.-м.н. В.Ф. Тишкин, д.ф.-м.н. А.А. Кулешов, д.ф.-м.н. Т.Г. Елизарова (руководитель).

Результаты голосования: «за» – 15 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол №8 от «19» октября 2023 г.

Член-корр. РАН,
д.ф.-м.н., зав. отделом №15


_____ В.Ф. Тишкин

д.ф.-м.н., г.н.с. отдела №15


_____ А.А. Кулешов