

«УТВЕРЖДАЮ»

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

по научной работе

член-корреспондент РАН

М.В. Якобовский



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