

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Майорова Павла Александровича
на тему: «Балансно-характеристический подход к численному
моделированию гидродинамических течений со свободной поверхностью
в гидростатическом приближении»
по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

Диссертационная работа посвящена построению балансно-характеристического численного алгоритма расчёта динамики стратифицированной жидкости со свободной поверхностью в гидростатическом приближении.

Актуальность темы. Растущая сложность современных научных и технических задач требует создания новых эффективных методик для численного решения уравнений математической физики. Моделирование течений со свободной поверхностью занимает значительную роль среди задач динамики жидкости и имеет широкий круг приложений. Такие течения реализуются в различных масштабах – от лабораторных экспериментов до глобальных океанических процессов. Процессы массообмена и перемешивания в стратифицированных слоях океана и атмосферы влияют на формирование климата, развитие и поддержание биосистем, а также на их экологическое равновесие. Постановки, учитывающие стратификацию, позволяют более полно описывать ряд наблюдаемых явлений и характерных режимов течения. В силу высокой сложности уравнений для многослойного случая, наибольшее распространение получили модели для двухслойной и трехслойной жидкости.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в научных журналах, для которых такая тематика является традиционной, а актуальность, новизна и достоверность результатов служат необходимым условием для опубликования. Дополнительным подтверждением актуальности является то, что исследования выполнялись в рамках

поддержанных проектов РФФИ, что свидетельствует о востребованности данного направления и его соответствии приоритетам развития современных вычислительных методов гидродинамики.

Научная новизна и значимость. Полученные автором диссертации результаты являются новыми. В работе предложен и доведён до программной реализации балансно-характеристический подход к численному решению моделей динамики несжимаемой жидкости со свободной поверхностью в гидростатическом приближении. Подход последовательно распространён на однослойную постановку с неровным дном и переменной плотностью, на модель «двухслойной мелкой воды» с аналитическим нахождением собственных чисел характеристической матрицы, а также на многослойную систему мелкой воды с переменной плотностью и неровным дном. Алгоритм гиперболического разложения и регуляризующие процедуры, повышающие устойчивость расчётов, использованы при рассмотрении многослойного случая.

Практическая значимость работы определяется тем, что разработанные алгоритмы могут быть использованы при разработке программных комплексов, моделирующих течения стратифицированной жидкости со свободной поверхностью. Полученные результаты могут быть востребованы в области теоретической и прикладной гидродинамики, при решении практических задач мониторинга и моделирования морских течений.

Степень обоснованности положений, выносимых на защиту, научных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Достоверность полученных результатов обусловлена строгостью выполненных математических выводов, корректностью применения апробированных в научной практике аналитических и численных подходов и подтверждается результатами численных экспериментов.

Основное содержание диссертационной работы, ее главные научные результаты в полной мере изложены в 4 печатных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности, и докладывались на российских и международных конференциях.

Структура и содержание работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и одного приложения. Полный объём диссертации составляет 129 страниц, список литературы содержит 106 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, показана степень разработанности по теме исследования, сформулированы цель и задачи исследования, охарактеризованы новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена однослойной модели мелкой воды с переменной плотностью, учитывающей внешнее давление и влияние донного рельефа. Описан численный алгоритм на основе балансно-характеристического метода КАБАРЕ, отмечены свойства сбалансированности схемы при постоянной и переменной плотности. Приведены результаты расчётов по двумерному тесту течения жидкости разной плотности в резервуаре с притоком и оттоком, а также результаты моделирования приливной динамики в Белом море.

Во второй главе рассмотрена модель двухслойной мелкой воды, описывающая движение двух слоёв жидкости, разделённых непроницаемой подвижной границей, и приведён алгоритм её численного решения на основе балансно-характеристического метода КАБАРЕ. Уделено необходимое внимание проблеме потери гиперболичности в многослойных системах на примере двухслойного случая и связанных с этим ограничений при численном моделировании.

В третьей и четвёртой главах представлены принципы построения малодиссипативной многослойной гидростатической модели CABARET-MFSH и соответствующих вычислительных алгоритмов для случаев двух и трёх пространственных переменных. Повышение устойчивости расчёта для не безусловно гиперболической многослойной системы достигается перестройкой вертикальной сетки с консервативным перераспределением массы и импульса между слоями, а также управляемой численной диссипацией, которая вводится с помощью фильтрации потоковых

переменных. Приведены результаты вычислительных экспериментов и сопоставления с данными лабораторных исследований гравитационных течений в стратифицированной жидкости, в том числе для постановок с выраженной трёхмерной структурой.

В приложении А представлено описание программного комплекса, приведена блок-схема программного комплекса и описана интеграция с инструментами визуализации и анализа вычислительных результатов.

В целом диссертация написана ясным научным языком, хорошо структурирована и оформлена. Автореферат соответствует установленным требованиям и полностью отражает основное содержание диссертации.

Замечания по диссертационной работе.

1. В диссертации отсутствуют ссылки на работы Тешукова В.М., Ляпидевского В.Ю., Чеснокова А.А. и Ермишиной В.Е., которые достаточно близки к теме диссертации. В первую очередь это работы:
 - 1) Тешуков В.М. Газодинамическая аналогия в теории течений стратифицированной жидкости со свободной границей //Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2007. – №. 5. – С. 143-153.
 - 2) Chesnokov A. A., Ermishina V. E., Liapidevskii V. Y. Strongly non-linear Boussinesq-type model of the dynamics of internal solitary waves propagating in a multilayer stratified fluid //Physics of Fluids. – 2023. – Т. 35. – №. 7
 - 3) Ляпидевский В. Ю. и др. Моделирование нестационарных гидрофизических процессов на шельфе Японского моря //Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2022. – №. 1. – С. 57-68.
2. В тексте диссертации написано «На рис. 1.9 приведены численные результаты расчета уровней свободной поверхности в различные моменты времени. Благодаря учету приливной динамики в Горле, на 5-6 сутки решение выходит на периодический режим и сравнимо с другими численными расчетами [87; 88].» Однако результаты, приведенные на

рис. 1.9, не позволяют сделать заключение о том, что режим является периодическим и не позволяют определить период режима.

3. В подразделе 2.1.1 при исследовании гиперболичности используемой модели сделан вывод, что «строгая гиперболичность сохраняется при достаточно малых и достаточно больших числах Фруда...». При этом пороговые значения чисел Фруда не приведены.
4. Там же, на рис. 2.2. приведены расчеты для двух слоев жидкости, у которых плотность различается в 4 раза. Непонятно, в каком физически обоснованном случае возможна такая разница в плотностях.
5. В разделе 3.3 предложен подход для решения проблемы неустойчивости Кельвина-Гельмгольца с помощью «пересчета вертикальных координат узлов сетки, возвращающих их в заданное положение». Внесение таких изменений в разностную схему означает, что и исходные дифференциальные уравнения претерпевают изменения и в них появляются дополнительные члены, ответственные за подавление неустойчивости. Эти члены могут быть аналогами физических механизмов подавления неустойчивости. Однако обнаружить такой анализ в диссертации не удалось.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Майоров Павел Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
заведующий кафедрой суперкомпьютерного моделирования инженерно-физических процессов института лазерных и плазменных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Шаргатов Владимир Анатольевич

15.12.2025

Контактные данные:

тел.: 7(910)4452162, e-mail: VAShargatov@mephi.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Адрес места работы:

115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31,
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», кафедра суперкомпьютерного моделирования инженерно-физических процессов
Тел.: +7 495 788-5699; e-mail: info@mephi.ru