

**ОТЗЫВ официального оппонента
о диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Майорова Петра
Александровича на тему «Математическое моделирование
стратифицированных течений жидкости со свободной границей в
негидростатическом приближении»
по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ**

Математическое моделирование стратифицированных течений жидкости играет важную роль в вычислительной гидродинамике и океанологии, обеспечивая понимание процессов, происходящих в природных водных системах – от рек и озер до морей и океанов. В связи с растущей потребностью в прогнозировании динамики океанических течений, моделировании экосистем и решении задач инженерной гидродинамики разработка новых численных методов, способных эффективно описывать сложные физические процессы, является актуальной.

В рассматриваемой диссертационной работе акцент сделан на моделировании стратифицированных течений жидкости в негидростатическом приближении, что позволяет учитывать вертикальные ускорения и точнее описывать внутренние волны, конвекцию и мелкомасштабные динамические процессы. Данная область исследований представляет собой одно из актуальных направлений вычислительной гидродинамики, поскольку традиционные гидростатические модели, широко применяемые в океанологии, имеют ограничения в воспроизведении подобных явлений. Кроме того, предложенные в диссертации численные методы расчета стратифицированных течений основаны на высокоэффективных балансно-характеристических алгоритмах, обеспечивающих хорошую точность и консервативность получаемых решений. Разработанные методы представляются перспективными для использования в реальных инженерных и научных расчетах. Таким образом,

работа соответствует современным задачам математического моделирования течений жидкости и является практически важной и актуальной.

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, разбитых на параграфы, заключения и списка литературы (73 источников).

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, описываются степень разработанности темы и существующие подходы для решения поставленных задач, определяются цели диссертационной работы, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе диссертации приводится описание математической модели.

Для построения итоговой системы уравнений автор последовательно применяет к классической системе уравнений Буссинеска ряд модификаций и приближений.

Приводится подробное математическое описание разделения исходной системы уравнений на баротропную и бароклинную подсистемы. Кроме того, описывается приближение «мягкой крышки», применимое для задач с малыми амплитудами колебания свободной поверхности и позволяющее отказаться от решения баротропной подсистемы.

Полученная система уравнений «гиперболизируется» с помощью приближения слабой сжимаемости. Данное приближение позволяет уйти от необходимости разрешения эллиптического уравнения для определения давления и использовать явные, хорошо параллелизируемые численные схемы.

Итоговая система дифференциальных уравнений записывается в смешанных эйлерово-лагранжевых координатах, что оставляет свободу выбора перемещения внутренних узлов расчетной сетки при численном решении.

Глава 2 диссертации посвящена построению и исследованию свойств явного балансно-характеристического алгоритма решения системы

дифференциальных уравнений, определенных в предыдущей главе. Алгоритм базируется на методике схемы КАБАРЕ.

Система дифференциальных уравнений приводится к характеристической форме и определяется вид локальных инвариантов Римана. Описывается подвижная по вертикальному направлению расчетная сетка. В каждой расчетной ячейке задается два полных набора переменных: консервативные переменные в центре ячейки и потоковые в центрах граней. Выписываются конечно-разностные уравнения, аппроксимирующие дифференциальную систему динамики жидкости. Приводится аппроксимация кинематического условия на свободной поверхности жидкости и описывается механизм перемещения внутренних граней сетки. Описывается алгоритм разрешения построенных разностных уравнений и ограничение на величину расчетного шага по времени.

Для построенной разностной схемы доказывается свойство сбалансированности. Приводится исследование точности определения положения свободной поверхности в зависимости от величины искусственной скорости звука на задаче о малых колебаниях свободной поверхности. Исследование показало, что при увеличении искусственной скорости звука погрешность положения свободной поверхности уменьшается. Представлены результаты валидации численного алгоритма на серии лабораторных экспериментов по изучению динамики стратифицированных гравитационных течений. Подробное сравнение на широком наборе экспериментов показало качественную и количественную согласованность результатов численного моделирования и экспериментальных данных.

В главе 3 диссертации описывается методика построения явно-неявной балансно-характеристической схемы на основе схемы КАБАРЕ, неявной вдоль одного пространственного направления и явной по остальным. Приводятся конечно-разностные уравнения построенной схемы. Описывается методика эффективного разрешения введенной неявности

вдоль одного направления – метод гиперболической прогонки. Рассматривается пошаговый алгоритм разрешения построенной явно- неявной схемы и ограничение на шаг по времени.

Приводятся результаты валидации построенного численного алгоритма на лабораторных экспериментах и сравнение времени работы с явной схемой, подтверждающие эффективность алгоритма разрешения неявности схемы.

Глава 4 посвящена результатам численного моделирования трехмерных течений неоднородной жидкости. В начале главы описываются изменения численных схем при переходе к трехмерным задачам. Приводятся результаты валидации построенных численных алгоритмов на лабораторных экспериментах с существенно трехмерными течениями жидкости.

Далее в главе 4 рассматривается применимость явно-неявного численного алгоритма к моделированию течений в масштабах морских акваторий. Описываются аппроксимации дифференциальных операторов вязкости, диффузии и силы Кориолиса, неявные вдоль вертикального направления и явные по остальным. Итоговый алгоритм базируется на методе расщепления по физическим процессам. Формулируется алгоритм разрешения неявности по вертикальному направлению, который сводится к разрешению методом прогонки систем линейных уравнений с трехдиагональными матрицами. Приводятся результаты численного моделирования динамики Черного и Азовского морей.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе и выносимые на защиту.

Автореферат полностью и достаточно точно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертационной работы с достаточной полнотой опубликованы. По теме диссертации опубликовано 4 статьи в рецензируемых журналах из списка RSCI, Web of Science, SCOPUS. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на отечественных и международных конференциях.

Замечания по диссертации:

1. В тексте диссертации встречаются описки, затрудняющие понимание выполненной работы, например:

а) на стр. 19-20 функции H_0 и W_0 в одном месте зависят от параметра z , в другом не зависят;

б) на стр. 30, в (1.26) отсутствует якобиан преобразования в уравнениях для S и T ;

в) на стр. 44, в последней строке формулы (2.30) лишние индексы;

г) на рисунке 2.5, стр. 58 не должны быть указаны моменты времени;

д) на стр. 63 встречается величина ρ_c , хотя раньше она определялась как ρ_0 ;

е) на стр. 63, в Таблице 2 встречается величина h_l , хотя раньше она определялась как h_L ;

ж) на стр. 72, в Таблице 4 неверно указаны значения величины ρ^* .

2. На странице 23, при получении системы баротропных уравнений, сказано, что выражения в фигурных скобках (см. (1.8)) зависят только x , y и t , в то время как остальные члены зависят также и от переменной z . Автор пишет, что «Такое возможно, только если выражения в фигурных скобках в этих уравнениях равны нулю». Но это справедливо и в случае, когда выражение в фигурных скобках равно константе.

3. Неясно, как получено 4-е уравнение системы уравнений (1.21).

4. Неясен переход от системы уравнений (1.1) к системе уравнений (2.1). При малой сжимаемости 1-е и 2-е уравнения в системе (2.1) практически одно и то же.

5. В работе описан алгоритм прогонки, но ничего не сказано о ее устойчивости.

6. Хорошо известно, что тепловые процессы играют важную роль в формировании течений в морях и океанах. Учитывалось ли при моделировании динамики Черного и Азовского морей солнечное излучение? При иллюстрации полученных результатов моделирования хотелось бы видеть распределение параметров в вертикальном направлении. Именно способность разрешать структуры потока в вертикальном направлении и является преимуществом предложенных алгоритмов.

7. Хотелось бы видеть сравнение разработанных в диссертации алгоритмов с другими алгоритмами, решающими аналогичные задачи.

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, а также оформлена 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 Петр 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, профессор,

главный научный сотрудник, отдел 23 «Механика сплошных сред»,

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук

Зубов Владимир Иванович



21.03.2025

Контактные данные:

тел.: +7(915)121-32-83, e-mail: vladimir.zubov@mail.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.02.05 Механика жидкости, газа и плазмы

Адрес места работы:

119333, г. Москва, улица Вавилова, д. 40,

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»

Российской академии наук, отдел 23 «Механика сплошных сред»

Тел.: +7(499)135-35-45; e-mail: zubov@ccas.ru

Подпись сотрудника Федерального государственного учреждения

"Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" Российской академии наук" В. И. Зубова удостоверяю:

