

## **ОТЗЫВ**

Официального оппонента Янышева Дмитрия Сергеевича на диссертационную работу Иванова Александра Владимировича «Регуляризованные уравнения мелкой воды для моделирования неоднородных течений и течений со свободной поверхностью в задачах геофизики», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

### **Актуальность темы выполненной работы**

Актуальность темы диссертационной работы состоит в применении и развитии так называемого квазигазодинамического подхода регуляризации уравнений гидродинамики для моделирования течений со свободной поверхностью и неоднородных течений в рамках двухслойной мелкой воды и переноса пассивного скаляра в мелкой воде.

В основе квазигазодинамического подхода лежит идея осреднения исходной системы уравнений по малому промежутку времени. Данный подход применим к уравнениям мелкой воды, поскольку они являются баротропным приближением уравнений газовой динамики. В результате процедуры осреднения строится так называемая система регуляризованных уравнений, преимуществом которой перед исходной системой является возможность её решения с применением явной центрально-разностной аппроксимации.

В работе представлен новый подход для моделирования неоднородных течений в приближении мелкой воды: построены система регуляризованных уравнений двухслойной мелкой воды и регуляризованное уравнение переноса примеси в мелкой воде. Представлены эффективные алгоритмы их решения. Немаловажной частью работы является реализация нового

решателя для моделирования гидродинамики в приближении мелкой воды в рамках открытого пакета OpenFOAM.

### **Структура и содержание диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы из 80 наименований. Общий объём работы – 125 страниц.

Во введении к диссертации обоснованы актуальность, значимость и новизна темы исследования, поставлены цели и задачи исследования, обозначены степень достоверности результатов исследований, представлены положения, выносимые на защиту, сформирован список печатных работ автора и апробация результатов исследования на семинарах и конференциях.

Первая глава посвящена авторскому исследовательскому комплексу, в основе которого лежит алгоритм численного решения системы регуляризованных уравнений мелкой воды, а также усовершенствованные методы моделирования сухих зон и задания граничных условий для приливных колебаний уровня моря. Приводится описание работы с комплексом на примере моделирования отдельных прибрежных районов северных морей.

Во второй главе описываются новые подходы моделирования неоднородных течений в приближении мелкой воды: двухслойная мелкая вода и перенос пассивного скаляра в мелкой воде. Для обоих подходов приведён феноменологический вывод регуляризованных уравнений, описаны алгоритмы их численного решения и проведена их валидация. С помощью решения регуляризованного уравнения переноса примеси совместно с системой регуляризованных уравнений мелкой воды проведено моделирование гидродинамики течений в о. Валунден (Шпицберген). В рамках рассмотрения холодной воды в качестве примеси проведено исследование, качественно обосновывающее распределение толщины льда вдоль поверхности озера.

Третья глава посвящена описанию нового решателя для моделирования течений в приближении мелкой воды, интегрированного в открытый

комплекс программ OpenFOAM. Описывается специфика конечно-объёмной аппроксимации регуляризованных уравнений мелкой воды. Представлена валидация решателя на характерных задачах, демонстрирующих выполнение условий гидростатического баланса и расчёт сухих областей.

В заключении записаны основные выводы и итоги проделанной автором работы, а также кратко обозначены дальнейшие перспективы развития затронутой автором тематики.

### **Степень обоснованности и достоверности**

Достоверность и обоснованность рассмотренной работы заключается в том, что все представленные численные алгоритмы прошли валидацию на классических вычислительных тестах, а также сравнивались с результатами, полученными с применением других алгоритмов. Результаты диссертационной работы прошли апробацию на ряде российских и международных научных конференций, а также опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК и базы данных Scopus и Web of Science.

### **Научная новизна**

Впервые построена система регуляризованных уравнений двухслойной мелкой воды, а также выписан и реализован численный алгоритм её решения. Кроме того, впервые получено регуляризованное уравнение переноса пассивного скаляра в рамках приближения мелкой воды и представлен однородный алгоритм численного решения уравнения переноса совместно с системой регуляризованных уравнений мелкой воды.

Разработан новый гидродинамический решатель для моделирования течений в приближении мелкой воды на базе регуляризованных уравнений, встроенный в открытый программный комплекс.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. На стр. 13 в уравнениях (1.3) и (1.4) присутствуют внешние силы. В тексте отсутствуют пояснения по какой причине компоненты внешних сил не входят в дополнительные слагаемые, которые образуются при регуляризации (1.5)-(1.8).

2. Отсутствует двумерная постановка задачи в рамках моделирования двухслойных течений.

3. В тексте диссертации присутствуют незначительные синтаксические и грамматические ошибки.

4. В параграфе 3.2.3 третьей главы представлено решение практической задачи о разрушении плотины вблизи неровной поверхности. Добавленная сила трения (стр. 110) говорит о том, что для задачи, вероятно, проводилось экспериментальное исследование. Возможно, стоило добавить сравнение результатов расчётов с экспериментом.

Считаю, что отмеченные выше недостатки принципиально не снижают общей ценности работы и не влияют на её общую положительную оценку.

Отдельно еще раз хотелось бы отметить практическую значимость работы. Создание КГД-регулязованного решателя на базе открытой системы OpenFOAM позволяет с одной стороны воспользоваться им как готовым программным продуктом, а с другой – открывает возможности для дальнейшего улучшения данного решателя силами сообщества заинтересованных специалистов.

### **Заключение**

Считаю, что диссертационную работу Иванова Александра Владимировича можно считать научно-квалификационным исследованием, выполненным на хорошем научном уровне. Рассмотренная тематика работы является актуальной, а научная новизна и обоснованность основных результатов не вызывают сомнений. Автореферат корректно и полно отражает содержание диссертации.

Работа «Регуляризованные уравнения мелкой воды для моделирования неоднородных течений и течений со свободной поверхностью в задачах геофизики» удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Иванов Александр Владимирович, безусловно заслуживает присуждения ему искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

Янышев Дмитрий Сергеевич

кандидат технических наук, доцент (01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»)

доцент кафедры 204 «Авиационно-космическая теплотехника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

125993, Российская Федерация, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

Тел.: +7(968)759-58-57, e-mail: [dyanishev@gmail.com](mailto:dyanishev@gmail.com)

 Д.С. Янышев

« 14 » марта 2024 г.

*Подпись доцента Дмитрия Сергеевича Янышева заверяю:*

Заместитель начальника  
Управления по работе с персоналом

  
 М.А.Иванов