

ОТЗЫВ

официального оппонента Софронова Ивана Львовича на диссертационную работу Сабурина Дмитрия Сергеевича «Применение регуляризованных уравнений для математического моделирования нестационарных течений жидкости со свободной поверхностью в приближении мелкой воды», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы выполненной работы

Разработка и обоснование применения «быстрых», но достаточно точных моделей для решения прикладных задач одно из важных исследовательских направлений математического моделирования. В данной работе рассматриваются актуальные прикладные задачи по моделированию колебаний топлива в емкостях сложной формы и ветровых нагонов и сейш в Азовском море.

Основой изучаемых моделей в диссертации являются регуляризованные уравнения мелкой воды, которые выводятся из обычных уравнений мелкой воды путем некоторого осреднения системы по малому промежутку времени. Подход такой регуляризации был разработан в ИПМ им М.В. Келдыша РАН и основан на тех же идеях, что были предложены Б.Н. Четверушкиным с соавторами при выводе известной квазигазодинамической модели из системы уравнений Эйлера.

Как показано в диссертации, использование регуляризованных уравнения мелкой воды для решения вышеупомянутых задач нестационарных течений жидкости со свободной поверхностью позволило автору построить приближенные модели, обладающие простотой постановки и возможностью получения численного решения исходных трехмерных проблем на персональном компьютере весьма скромной вычислительной мощности. Это, безусловно, свидетельствует об актуальности проведенных исследований и перспективности подхода для других подобных задач.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений, списка литературы из 98 наименований. Общий объем работы -133 страницы.

Во введении обоснована актуальность исследования, определены цели и сформулированы задачи исследования, показана новизна темы исследований,

аргументированы достоверность результатов исследований, их теоретическая и практическая значимости, представлены положения, выносимые на защиту, приведены список печатных работ автора и результаты апробации проведенных исследований на семинарах и конференциях.

Первая глава посвящена описанию основных уравнений и численных методов, используемых в работе. Приводится краткий литературный обзор по уравнениям мелкой воды, дается вывод регуляризованных уравнений мелкой воды, выписывается разностная аппроксимация уравнений. Здесь же обсуждается важность выполнения условий гидростатической сбалансированности используемой разностной схемы и рассматриваются условия сухого дна.

Вторая глава содержит результаты математического моделирования движения жидкости в резервуаре ледокольного танкера при его внезапной остановке и движении по волнам. Задача сведена к упрощенной постановке в приближении мелкой воды, и представлены графики решений для различных сценариев движения танкера. Сравнение полученных максимальных нагрузок на стенки бака с соответствующими нагрузками, рассчитанными по численным решениям трехмерных уравнений Навье-Стокса, усредненных по Рейнольдсу, показало их совпадение в пределах одного процента. Неплохо согласуются по периоду и амплитуде и графики колебаний давления на стенки в зависимости от времени. При этом время расчета и предсказание общей картины течения с оценкой максимальных нагрузок в приближении мелкой воды составляет около десяти минут на персональном компьютере по сравнению с несколькими часами на параллельной вычислительной системе при моделировании того же процесса уравнениями Навье-Стокса.

Третья глава посвящена моделированию лабораторного эксперимента по генерации стоячих волн Фарадея в жидкости при вертикальных гармонических колебаниях сосуда с жидкостью. Постановка задачи осуществлена в одномерном приближении по длине сосуда. В уравнения введено переменное ускорение свободного падения для описания движения сосуда. В численных экспериментах прямым моделированием получены оценки границ диапазонов частот колебаний сосуда, внутри которых образуются стоячие волны в жидкости. Установлено хорошее согласие этих диапазонов частот с оценками по аналитическим решениям для малых колебаний идеальной жидкости в случае гармонического движения сосуда. Сравнение с лабораторными данными показывает примерно 40%-ое завышение частоты возбуждения колебаний в расчетах по одномерной модели мелкой воды.

В четвертой главе проведено построение моделей и представлены результаты моделирования сейш и штормовых нагонов 2013-2014 гг. в Азовском море. Были рассчитаны колебания уровня моря вблизи крупных населенных городов. Варьированием коэффициента донного трения были подобраны его значения, обеспечивающие хорошее совпадение периодов сейшевых колебаний и максимальных высот нагонов с данными наблюдений.

В заключении формулируются основные результаты диссертационной работы, обсуждаются перспективы дальнейшего развития применения подхода регуляризованных уравнений мелкой воды к задачам нестационарных течений жидкости со свободной поверхностью.

Степень обоснованности и достоверности

Все три модели рассмотренных в главах 2- 4 задач были валидированы путем сравнения получаемых решений с результатами из других источников данных с приведением соответствующих доступных ссылок, включенных в список литературы. В задаче о колебаниях жидкости в танкере это были данные расчетов по модели, описываемой трехмерными уравнениями Навье-Стокса. В задаче о волнах Фарадея источником данных послужили лабораторные эксперименты ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН и аналитические оценки. Это явилось хорошей возможностью как для настройки параметров рассматриваемой автором модели, так и для оценки ее точности. Эффект стоячих волн отчетливо наблюдается в численных решениях, но полученное серьезное несовпадение по частоте возбуждения колебаний свидетельствует, по-видимому, о необходимости проверки учета влияния трения жидкости о стенки и поверхностного натяжения в данной задаче. В задаче о моделировании сгонно-нагонных явлений и сейшевых колебаний сравнение проведено с данными метеорологических наблюдений. Оказалось, что предложенная в диссертации модель может достаточно хорошо предсказывать такие критические параметры природных явлений как высота нагона и время ее максимального значения для конкретных географических мест (приморских городов) такого сложного объекта как Азовское море.

Указанные примеры валидации, а также анализ представленных в диссертации графических и числовых данных по многочисленным расчетам позволяют не сомневаться как в достоверности приведенных результатов, так и в обоснованности сформулированных выводов и рекомендаций по применению и дальнейшему развитию предложенных подходов.

Научная новизна и практическая ценность

На основе регуляризованных уравнений мелкой воды в сочетании с условием сухого дна предложены и реализованы новые оригинальные численные модели изучения таких важных для практики явлений как колебание топлива в грузовых емкостях судов, движущихся с существенным изменением скорости (при малом заполнении баков), сейшевых течений в Азовском море и связанных с ними сгонно-нагонных колебаний на мелководье с пологими берегами. Также новым подходом является моделирование волн Фарадея в приближении мелкой воды. Ценность предложенных подходов усиливается благодаря существенному сокращению времени расчета по сравнению с традиционными подходами моделирования на основе полных трехмерных определяющих уравнений с необходимостью учета сложных границ и областей сухого дна явными граничными условиями.

Замечания по диссертационной работе

1. Как показывают расчеты в гл. 2, ограничения на шаг по времени в используемой явной схеме существенно жестче, чем предписывает линейный анализ (число Куранта). Поэтому для повышения устойчивости и ускорения счета можно рассмотреть неявные схемы. Однако, этот вопрос не обсуждается. Кроме того, условие Куранта (1.25) для двумерного случая выписано с ошибкой.
2. Для расчета колебаний топлива при качке на волнах используется условие (2.10) на внешнюю силу, описывающее очень частный случай строго горизонтальных колебаний. Неясно, почему не рассмотрен более естественный для качки случай крутильных колебаний.
3. Замечания по оформлению: для наглядности сравнения решений различных уравнений на рис. 2.8 полезно представить кривые на одном графике (то же и для рис. 2.14); в формулировке разностной схемы в п. 1.3 отсутствует описание граничных условий; при указании размера сосуда на стр. 56 необходимо пояснить, что является длиной, шириной и высотой.
4. Замеченные опечатки: формулы (1.2) и (3.6); текст перед формулой (3.3); перепутаны линии на рис. 4.7 и 4.8.

Заключение

Диссертационная работа Сабурина Дмитрия Сергеевича выполнена на хорошем научном уровне и является законченным научно-квалификационным исследованием. Научная новизна основных результатов диссертации значительная. Основные результаты диссертации прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях и в должной мере отражены в научных публикациях, включая издания из перечня ВАК. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации. Отмеченные выше недостатки не влияют на общую положительную оценку работы.

Работа «**Применение регуляризованных уравнений для математического моделирования нестационарных течений жидкости со свободной поверхностью в приближении мелкой воды**» удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, **Сабурин Дмитрий Сергеевич**, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Ведущий научный сотрудник
Московского научно-исследовательского центра «Шлюмберже»
д.ф.-м.н. по специальности 01.01.07 – «Вычислительная математика»

25 мая 2018

/ И.Л. Софронов /

Подпись И.Л. Софронова заверяю

Специалист службы управления персоналом



/ Н.В. Костецкая /