

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ
им. А.Ю. ИШЛИНСКОГО
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПМех РАН)**

пр. Вернадского, д.101, к.1, г. Москва, 119526
Тел. (495) 434-00-17 Факс 8-499-739-95-31
ОКПО 02699323, ОГРН 1037739426735
ИНН/КПП 7729138338/772901001

УТВЕРЖДАЮ

ВРИО директора ИПМех РАН

д.ф.-м.н. С.Е. Якуш



10.05.2018 № 1104/ср-2171.1-264

На № _____

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Сабурин Дмитрий 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»

1. Актуальность темы исследования. Численное моделирование течений жидкости со свободной поверхностью и развитие новых алгоритмов для решения таких задач было и является важной задачей вычислительной гидромеханики. Это обусловлено широким распространением течений со свободной поверхностью, включая движение жидкости в небольших емкостях типа кювет и движения в масштабах речных и морских акваторий.

В диссертационной работе Сабурин Д.С. рассматривает применение нового вычислительного алгоритма для численного моделирования течений со свободной поверхностью, для двух характерных задач, первая из которых связана с колебаниями жидкости в топливных баках и емкостях, а вторая - с колебаниями поверхности морской акватории в Азовском море. Обе эти задачи рассматриваются в приближении мелкой воды, которое упрощает полные уравнения Навье-Стокса для этих задач. Для численного решения используется способ регуляризации исходных уравнений и его расширения, обусловленные особенностями физической постановки задач. Численный алгоритм основан на разностной аппроксимации сглаженных уравнений.

Актуальность темы исследования определяется необходимостью развития численных методов для решения уравнений в приближении мелкой воды, совершенствовании численных алгоритмов, а также решением актуальных практических задач, перечисленных выше. В частности, актуальность рассмотренных задач связана с необходимостью моделирования максимальных нагрузок на стенки бака ледоколагазовоза при транспортировке и расчет безопасных условий эксплуатации судна, а также с прогнозированием уровня Азовского моря для своевременного предсказания чрезвычайных ситуаций и оповещения населения.

2. Новизна полученных результатов. Результаты, представленные в работе, являются **новыми**. Впервые в рамках полных уравнений мелкой воды построены математические модели и выполнены численные расчеты в задачах течения жидкости в танке при резкой остановке судна и генерации волн Фарадея. Впервые проведено прямое численное моделирование генерации волн Фарадея при непрерывном изменении возбуждающей частоты. Впервые в рамках регуляризованных уравнений мелкой воды разработана математическая модель и проведены расчеты нагонных явлений и сейшевых колебаний в Азовском море с привлечением реальных гидрофизических данных.

Все основные результаты диссертации являются новыми.

3. Достоверность полученных результатов и выводов. Достоверность полученных результатов обоснована и подтверждена их соответствием экспериментальным данными, аналитическими закономерностями и уже существующими численными расчетами ряда рассмотренных задач в рамках других приближений.

Основные результаты апробированы на всероссийских и международных научно-практических конференциях.

4. Значимость полученных результатов. Теоретическая значимость работы заключается в построении новых математических моделей в приближении мелкой воды для описания процессов колебаний жидкости при горизонтальных и вертикальных воздействиях вынуждающей силы, а также в выявлении основных механизмов, обеспечивающих нагонные явления и сейшевые колебания в акватории Азовского моря.

Практическая ценность результатов состоит в разработанных новых оригинальных методов решения описанных выше задач, которые позволили существенно сократить необходимые вычислительные ресурсы и времена расчета. Подготовленные автором программы могут быть использоваться, например, для оперативной оценки максимальных нагрузок на стенки грузовых емкостей при небольших заполнениях бака при различных условиях эксплуатации судов, или для прогнозирования циркуляции и уровня моря вблизи крупных городов в режиме реального времени. Построенная автором модель может использоваться при расчетах течений в различных мелководных водоемах. Полученные автором результаты и созданный им программный комплекс может представлять интерес для организаций, занимающихся сходной тематикой, среди которых укажем Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (С-Петербург), институт механики МГУ (Москва), кафедру физики моря и вод суши физического факультета МГУ (Москва), институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН (Москва), институт океанологии РАН им. П.П. Ширшова (Москва), Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова (Москва), институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск), институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (Новосибирск), Южный федеральный университет (Ростов на Дону), Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (Нижний Новгород), Морской гидрофизический институт РАН (Севастополь).

5. Общая характеристика работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего в себя 98 наименований, и двух приложений. Объем диссертации составляет 133 страницы.

Во введении обосновывается актуальность работы, ее новизна и цели, формулируются теоретическая и практическая значимости результатов, степень их достоверности, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен вид уравнений мелкой воды и его регуляризованный аналог, отражающий особенности поставленных далее задач. Изложен способ численной реализации и его характерные особенности. В частности, приводятся расширения построенной регуляризованной системы уравнений применительно к задачам с учетом влияния внешних сил, к которым относится сила ветра, силы трения о дно и силы Кориолиса. В параграфах 1.2-1.3 приводится вывод регуляризованных уравнений и их вид с учетом этих сил, обсуждается построение разностной схемы и условия ее устойчивости. В параграфе 1.4 показано выполнение условия «хорошей балансировки» на уровне регуляризованных уравнений и на уровне разностной схемы, а также детально выписаны условия, позволяющие учитывать формирование и эволюцию так называемых зон сухого дна вблизи береговой линии. В завершении главы приведено краткое описание программного комплекса, разработанного автором на основе указанного разностного алгоритма.

Во второй главе представлены результаты численного моделирования задачи о течении жидкости в танке при резкой остановке судна и его колебаниях на волнах. Для задачи о движении жидкости в танке газоведа определяющей является сила инерции, расчет которой строится на основе заданного закона изменения скорости ледокола при его столкновении с ледяной кромкой или колебаниях. Постановка задачи применительно к реальным параметрам танка и скорости ледокола детально описана в параграфе 2.2. Для тестирования точности математической модели и численного алгоритма в параграфе 2.3 приведены результаты расчета этой задачи в одномерном приближении, описывающем движение топлива в плоскости симметрии при лобовом столкновении судна с препятствием. Сравнение вычисленных частот колебаний с аналитическими решениями показывают их близкое соответствие. Проведенные расчеты колебаний и нагрузок на стенки бака в одномерной постановке и двумерные расчеты этого процесса показывают очень хорошее согласие с данными расчета этого течения с использованием полной системы уравнений Навье-Стокса для небольших уровней заполнения танка. Отметим, что расчет в приближении мелкой воды занимает десятки минут на персональном компьютере, в то время как расчет в полной постановке с учетом модели турбулентности и отдельным расчетом положения свободной поверхности жидкости занимает часы при использовании параллельной вычислительной системы. В заключение отметим, что сопоставление расчетов с реальным экспериментом в танке невозможно, поэтому важность проведенных расчетов и соответствие численных результатов, полученных по двум существенно различным математическим моделям – приближения мелкой воды и полной системы уравнений Навье-Стокса – имеет большое практическое значение.

В третьей главе приводятся результаты численного моделирования задачи о генерации волн Фарадея в соответствии с экспериментами в лабораторной кювете. Для этой задачи внешняя сила учитывается в приближении эффективного изменения силы тяжести. Оригинальная постановка задачи в рамках модели мелкой воды описана в параграфе 3.2. В параграфе 3.3 приведены результаты прямого численного моделирования генерации этих волн при непрерывном изменении возбуждающей частоты. В численном эксперименте получены характерные резонансные частоты, наблюдающиеся в эксперименте, к которым относятся возникновение регулярных, нерегулярных и разрушающихся волн. Следует отметить, что результаты глав 2 и 3 позволяют выписать математическую модель и соответствующий численный алгоритм для имеющих место в реальности одновременных горизонтальных и вертикальных колебаний емкости для транспортировки жидких грузов и моделировать движения жидкости в них.

В четвертой главе приведены результаты моделирования задач о сейшевых колебаниях и нагонных явлениях в Азовском море. Расчеты воспроизводят всю картину движения воды в акватории Азовского моря, включая Керченский пролив, и в частности, моделируют высоту колебаний уровня в основных населенных пунктах, расположенных на побережье. Полученные результаты по моделированию штормовых нагонов очень хорошо совпадают с данными реальных наблюдений нагонов в 2013 и 2014 года (параграф 4.4). В указанных расчетах используются реальные значения ветровой нагрузки, величина которой меняется на заданной пространственной и временной сетке, значения силы Кориолиса, зависящей от географической широты и локальной скорости течения. Полученные автором результаты оказываются не менее точными, чем расчеты этих явлений, выполненных специалистами с применением специализированных программных комплексов, время расчета по которым много больше, чем в рамках программного комплекса, созданного диссертантом. Полученные автором результаты позволяют выявить определяющие эффекты, ответственные за возникновение указанных явлений в акватории Азовского моря.

В заключении приведены основные результаты работы и обсуждаются дальнейшие перспективы развития использованного подхода.

В Приложении 1 приведены результаты численного моделирования ветровых течений в акватории Черного моря и показано, что приближение мелкой воды корректно описывает общую структуру течений в акватории, но оказывается недостаточным для количественного описания его скоростей.

В Приложении 2 приведен написанный автором программный комплекс.

Замечания по диссертации

1. В задаче о моделировании волн Фарадея не приведено прямое сравнение с экспериментальными данными.
2. В задаче о моделировании волн Фарадея показано, что с увеличением величины перегрузки меняется внешний вид волн, однако, не приведены оценки параметров, при которых происходит переход от одного типа волн к другому.
3. Автор не привел общую математическую постановку задачи, позволяющую моделировать одновременные колебания судна в вертикальной и горизонтальной плоскости.
4. В тексте имеются отдельные опечатки и неточности, например, стр. 6, третий абзац «чисел Фруда», или стр. 84, четвертый абзац, слился текст «моделируется использование неразнесенных сеток».
5. Названия графиков не всегда выбраны удачно. Например, «Внутренний вид топливного бака», или «Циркуляция Азовского моря при продолжительном действии ветра».

Эти вопросы желательно обсудить при защите, хотя они не оказывают существенного влияния на положительную оценку в целом представленной к защите работы. Приведенные замечания не снижают ценности проделанной работы и положительного впечатления о ней. Работа выполнена на высоком научном уровне, хорошо оформлена и ясно изложена, что свидетельствует о высокой квалификации автора.

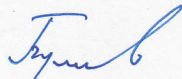
Заключение. Диссертационная работа Д.С. Сабурина является законченной научно-квалификационной работой, вносящий вклад в развитие вычислительной гидродинамики. Все основные результаты отражены в публикациях из перечня ВАК (5)

и были доложены международных и всероссийских конференциях и семинарах (13). Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная 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 (постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842), а ее автор, Сабурин Дмитрий Сергеевич, безусловно, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв составили

д.ф.-м.н., профессор, с.н.с. лаб. механики сложных жидкостей



В.В. Булатов

д.ф.-м.н., в.н.с. лаб. механики сложных жидкостей



В.А. Калиниченко

Отзыв заслушан и утвержден в качестве официального отзыва ведущей организации на семинаре Прикладная механика сплошных сред лаборатории механики сложных жидкостей 29 марта 2018 г.

Руководитель семинара

д.ф.-м.н.



А.Н. Рожков