

Результаты публичной защиты

Дата защиты: **14 июня 2018 г.**

Соискатель: **Сабурин Дмитрий Сергеевич.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему: «Применение регуляризованных уравнений для математического моделирования нестационарных течений жидкости со свободной поверхностью в приближении мелкой воды».

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

На заседании председательствует – председатель диссертационного совета, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор Б.Н. ЧЕТВЕРУШКИН.

Ученый секретарь – к.ф.-м.н. М.А. КОРНИЛИНА.

На заседании из 25 членов диссертационного совета присутствовали 19, из них 6 докторов по профилю рассматриваемой диссертации:

1.	ЧЕТВЕРУШКИН Б.Н.	д.ф.-м.н.	05.13.18
2.	ТИШКИН В.Ф.	д.ф.-м.н.	01.01.07
3.	КАЛИТКИН Н.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
4.	КОРНИЛИНА М.А.	к.ф.-м.н.	05.13.18
5.	АНДРЕЕВ В.Б.	д.ф.-м.н.	01.01.07
6.	ГОЛОВИЗНИН В.М.	д.ф.-м.н.	01.02.05
7.	ДОЛГОЛЕВА Г.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
8.	ЕЛИЗАРОВА Т.Г.	д.ф.-м.н.	01.02.05
9.	ЗМИТРЕНКО Н.В.	д.ф.-м.н.	01.02.05
10.	КАРАМЗИН Ю.Н.	д.ф.-м.н.	01.01.07
11.	КОВАЛЕВ В.Ф.	д.ф.-м.н.	05.13.18
12.	КОЗЛОВ А.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
13.	КОЛЕСНИЧЕНКО А.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18
14.	КУЛЕШОВ А.А.	д.ф.-м.н.	05.13.18
15.	ЛУЦКИЙ А.Е.	д.ф.-м.н.	01.02.05
16.	МИЛЮКОВА О.Ю.	д.ф.-м.н.	01.01.07
17.	ПОЛЯКОВ С.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
18.	ШПАТАКОВСКАЯ Г.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18
19.	ЯКОВОВСКИЙ М.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18

На заседании 14 июня 2018 г. диссертационный совет принял решение присудить Сабурину Дмитрию Сергеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них - 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

По результатам публичной защиты диссертационный совет принял следующее заключение:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.024.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»,
ФАНО РОССИИ,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 14.06.2018 № 17

О присуждении **Сабурину Дмитрию Сергеевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Применение регуляризованных уравнений для математического моделирования нестационарных течений жидкости со свободной поверхностью в приближении мелкой воды» по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 12.04.2018 (протокол заседания № 11/пз) диссертационным советом Д 002.024.03 на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук». Адрес организации: 125047, Москва, Миусская пл., д.4. Диссертационный совет утвержден приказом Минобрнауки России №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель **Сабурин Дмитрий Сергеевич**, 1991 года рождения.

В 2014 году соискатель окончил физический факультет ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ).

В 2018 г. соискатель окончил очную аспирантуру физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Соискатель работает инженером-программистом в центре инженерной физики при МГУ имени М.В. Ломоносова

Диссертация выполнена на кафедре математики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель:

Елизарова Татьяна Геннадьевна, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник 16 отдела ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Официальные оппоненты:

- 1. Ибраев Рашит Ахметзиевич**, д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, ИВМ РАН, главный научный сотрудник;
- 2. Софронов Иван Львович**, д.ф.-м.н., Московский научно-исследовательский центр «Шлюмберже», ведущий научный сотрудник дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация:

ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, в своем **положительном** заключении, составленном д.ф.-м.н. Булатовым Виталием Васильевичем, старшим научным сотрудником лаборатории механики сложных жидкостей, и д.ф.-м.н. Калиниченко Владимиром Анатольевичем, ведущим научным сотрудником лаборатории механики сложных жидкостей, и утвержденным Якушем Сергеем Евгеньевичем, ВРИО директора института, указала, что диссертационная работа Д.С. Сабуриня является законченной научно-квалификационной работой, вносящий вклад в развитие вычислительной гидродинамики. 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.

Соискатель имеет 7 опубликованных работ по теме диссертации, из них в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК опубликовано 5 работ:

1. Елизарова Т. Г., Сабурин Д. С. Численное моделирование колебаний жидкости в топливных баках // Математическое моделирование. — 2013. — Т. 25, № 3. — С. 75—88.

2. Елизарова Т. Г., Сабурин Д. С. Математическое моделирование и визуализация течений жидкости в грузовой емкости газовева при его соударении с ледовым препятствием // Научная визуализация. — 2013. — Т. 5, № 4. — С. 118—135.

3. Елизарова Т. Г., Сабурин Д. С., Ткаченко И. В., Тряскин Н. В. Численное моделирование колебаний жидкости в танках газовевов // Морские интеллектуальные технологии. — 2014. — Т. 2, № 4(26). — С. 74—83.

4. Елизарова Т. Г., Сабурин Д. С. Численное моделирование волн Фарадея на основе уравнений гидродинамики в приближении мелкой воды // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2015. — Т. 1. — С. 3—8.

5. Елизарова Т. Г., Сабурин Д. С. Применение регуляризованных уравнений мелкой воды к моделированию сейшевых колебаний уровня Азовского моря // Математическое моделирование. — 2017. — Т. 29, № 1. — С. 45—62.

Общий объем публикаций в изданиях из перечня ВАК - 7.6 п.л., авторский вклад соискателя 4.8 п.л. Вклад соискателя в работы с соавторами

является определяющим. Две статьи написаны соискателем полностью самостоятельно.

В работе [1] соискателем в рамках одномерных регуляризованных уравнений мелкой воды проведено численное моделирование колебаний жидкости в замкнутом сосуде, возникающих в топливных баках ледокольных судов при их столкновениях с ледовыми препятствиями и движении на волнах. В работах [2] и [3] данный подход был обобщен соискателем в рамках двумерной модели с учётом формы дна бака для случая направления скорости судна вдоль плоскости симметрии бака и под углом к ней при заполнении бака на 10%. В работе [4] приводятся полученные соискателем результаты численного моделирования генерации волн Фарадея в замкнутом сосуде с помощью регуляризованных уравнений мелкой воды. Определены частотные диапазоны возбуждения первой и второй моды колебаний, приводящие к возникновению регулярных, нерегулярных и разрушающихся волн в зависимости от величины перегрузки. В работе [5] впервые в рамках регуляризованных уравнений мелкой воды соискателем была создана новая модель для расчетов циркуляции в неглубоких водных бассейнах с учетом силы Кориолиса, квадратичного трения на дне и ветрового воздействия. Приведены результаты расчетов гидродинамических течений при типичных сейшевых колебаниях в Азовском море с начальной амплитудой порядка 1 метра, возникающих под влиянием нагонных или ветровых воздействий.

В совместных работах научный руководитель Елизарова Т.Г. принимала участие в обсуждении постановки задач, хода исследований и анализа полученных результатов. Ткаченко И. В. и Тряскин Н. В. предоставили данные для постановки задачи о колебаниях топлива в топливных баках газозовов, участвовали в обсуждении хода исследований и полученных результатов, а также предоставили данные решения отдельных вариантов задач с помощью открытого программного комплекса OpenFOAM.

Все положения, выносимые на защиту и представленные в диссертации, принадлежат соискателю. Сведения о публикациях соискателя в диссертации достоверны.

На автореферат и диссертацию поступили отзывы ведущей организации, отзывы оппонентов, также поступили 4 отзыва на автореферат. Все отзывы положительные. Отзывы содержат ряд замечаний:

В отзыве ведущей организации ИПМех РАН:

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 «моделиявляетсяиспользованиенеразнесенныхсеток».

5. Названия графиков не всегда выбраны удачно. Например, «Внутренний вид топливного бака», или «Циркуляция Азовского моря при продолжительном действии ветра».

В отзыве официального оппонента д.ф.-м.н., член-корр. РАН Ибраева Р.В.:

1. Над моделированием экстремальных нагонов в Азовском море диссертант работал совместно с ГОИН имени Н.Н. Зубова, однако в работе не приведено сравнение результатов расчетов с расчетами ГИОН, например, на рис. 4.11 и 4.12

2. При моделировании сейш и экстремальных нагонов в Таганрогской бухте не учтен сток реки Дон.

3. В работе указано о распараллеливании задачи с помощью технологии OpenMP, однако не указано, на сколько ядер это сделано, на сколько ядер возможно распараллеливание, не приведены оценки ускорения расчета при распараллеливании.

4. Очень подробно написан программный код в приложении 2, листинги с заголовочными файлами и объявлением переменных следовало опустить.

В отзыве официального оппонента д.ф.-м.н., Софронова И.Л.:

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 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.

В отзыве на автореферат д.ф.-м.н. Фомина Владимира Владимировича, заведующего отделом вычислительных технологий и математического моделирования, ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН»:

1. В автореферате не сформулированы положения, выносимые на защиту.

2. Не приведены полученные периоды сейшевых колебаний Азовского моря.

3. Нет информации о том, как соотносятся результаты исследования сгонно-нагонных колебаний и сейш Азовского моря с результатами работ других авторов (Ю.Г. Филиппов, Г.Г. Матишов, Ю.И. Инжебейкин, В.А. Иванов, Л.В. Черкесов, Т.Я. Шульга, Ю.В. Манилюк).

В отзыве на автореферат д.т.н., доцента, профессора РАН, Ткаченко Игоря Вячеславовича, заведующего кафедрой гидроаэромеханики и морской акустики, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный морской технический университет:

1. Чем обоснован выбор явного алгоритма? Известно, что неявные методы обладают большей устойчивостью.

2. Из текста автореферата не ясно, использовалась ли технология параллельных вычислений и если да, то как?

В отзыве на автореферат к.ф.-м.н. Медведева Игоря Павловича, старшего научного сотрудника Лаборатории цунами им. академика С.Л. Соловьева института океанологии им. П.П. Ширшова:

1. В автореферате не указано, какой массив данных о батиметрии Азовского моря и прибрежной топографии использовался в работе. Какое было исходное пространственное разрешение исходного массива?

2. Также следует обратить внимание на ряд некоторых терминологических неточностей. Например, вместо термина «топология дна», который неоднократно встречается в тексте автореферата и диссертации, лучше использовать термин «топография дна».

3. В тексте автореферата не указано, какие значения коэффициента ветрового сопротивления и придонного трения были использованы при решении задачи расчета сейшевых колебаний Азовского моря.

4. К недостаткам автореферата диссертации можно отнести отсутствие ссылок на работы других авторов, которые занимались исследованиями по близкой теме (например, Матишов и др., 2008, 2009; Шульга и др., 2016).

5. В качестве рекомендации к будущим исследованиям автор отзыва рекомендует диссертанту стараться использовать ежечасные данные о изменении уровня моря на морских гидрометеорологических постах, а не 6-часовые данные, которые были использованы в настоящем исследовании. Использование 6-часовых данных может привести к неточной идентификации максимальных высот уровня моря при нагонах и точного времени их достижения.

В отзыве на автореферат к.ф.-м.н., Семенцова Кирилла Александровича, физика первой категории Физического Факультета МГУ имени М.В. Ломоносова:

1. В описании второй главы сказано, что она «посвящена исследованию нестационарных движений жидкости в грузовых емкостях судов, движущихся с существенным изменением скорости при столкновении с ледовым препятствием и при качке на волнах», при этом далее в тексте рассматривается только задача об остановке судна, а о задачах, связанных с качкой, не упоминается.

2. На рис.2а приведено вертикальное поперечное сечение бака призматической формы, при этом в подписи не указано, какие реперные точки находятся на передней стенке бака, а какие на задней. Возможно, более наглядно было бы представить на рисунке бак «в объеме».

3. В описании постановки задачи о колебаниях жидкости в баке при остановке судна можно было бы отметить (если это так), что сила инерции (формула (9)), рассчитанная по профилю скорости судна, вводится в модель в качестве объемной внешней силы, и подчеркнуть, что других внешних сил в данной задаче нет.

4. При сравнении результатов численного и лабораторного моделирования волн Фарадея не сказано, насколько удовлетворительное согласие достигнуто по частотам и достигнуто ли?

5. В формуле (11) совершенно не понятно, что обозначает буква m ?

Во всех отзывах отмечается, что указанные замечания не являются принципиальными и не снижают общей ценности работы. Основные результаты работы в достаточной мере отражены в публикациях и изданиях из перечня ВАК, прошли апробацию на многочисленных международных и всероссийских конференциях и семинарах. Работа ясно изложена и хорошо оформлена. По актуальности решаемой проблемы, научной новизне, научной и практической значимости, достоверности научных результатов диссертация удовлетворяет требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации объясняется их широко известной компетенцией в вопросах математического моделирования задач гидродинамики и океанологии, что подтверждается многочисленными научными публикациями, такими как:

1. Kaurkin M. N., **Ibrayev R. A.**, Belyaev K. P. Assimilation of the aviso altimetry data into the ocean dynamics model with a high spatial resolution using ensemble optimal interpolation (enoi) // *Izvestiya - Atmospheric and Oceanic Physics*. — 2018. — Vol. 54, no. 1. — P. 56–64

2. Кауркин М. Н., **Ибраев Р. А.**, Беляев К. П. Усвоение данных АРГО в модель динамики океана с высоким разрешением по методу ансамблевой оптимальной интерполяции enoi) // *Океанология*. — 2016. — Т. 56, № 6. — С. 852–860.

3. N. A. Zaitsev, **I. L. Sofronov**, “Generation of transparent boundary conditions for modeling wave propagation in anisotropic media”, Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2018, 082, 36 pp.

4. **I.L. Sofronov**, L. Dovgilovich, N. Krasnov. Application of transparent boundary conditions to high-order finite-difference schemes for the wave equation in waveguides // *Applied Numerical Mathematics* — 2015. — Vol. 93. — P. 195–205.

5. **Bulatov V. V.**, Vladimirov Y. V. Unsteady regimes of internal gravity wave generation in the ocean // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2018. — Vol. 18, no. 2. — P. 1–9.

6. **Kalinichenko V. A.**, Nesterov S. V., Soe A. N. Standing surface waves in a rectangular tank with local wall and bottom irregularities // *Fluid Dynamics*. — 2017. — Vol. 52, no. 2. — P. 230–238.

7. **Bulatov V. V.**, Vladimirov Y. V., Vladimirov I. Y. Far fields of the surface disturbances produced by a pulsating source in an infinite-depth fluid // *Fluid Dynamics*. — 2017. — Vol. 52, no. 5. — P. 617–622.

8. **В. А. Калиниченко**, С. Аунг, Ю. Д. Чашечкин, П. М. Шкапов. Динамика и структура периодических течений в прямоугольном сосуде с демпферами. // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки*. — 2017. — № 4. — С. 29–51.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1) На основе регуляризованных уравнений мелкой воды **разработаны:**

а) математические модели для решения задач колебаний топлива в емкостях сложной формы, описания генерации волн Фарадея и ветровых явлений в акватории мелководных морей;

б) численные алгоритмы, аппроксимирующие соответствующие системы дифференциальных уравнений;

в) комплекс программ для параллельных расчетов.

2) **Проведено** математическое моделирование колебаний топлива в реальных баках газозовов при малом заполнении емкостей. **Рассчитаны** распределения давления на стенки емкостей при различных вариантах эксплуатации судна. Используемые модели и программы позволяют в десятки раз сократить время решения задач указанного вида по сравнению с используемыми в настоящее время программами на основе полных уравнений Навье-Стокса.

3) Впервые в рамках уравнений мелкой воды **проведено** математическое моделирование генерации волн Фарадея в замкнутом сосуде при непрерывном изменении амплитуды и частоты возбуждения колебаний. В численном эксперименте с использованием параметров экспериментальной установки **получены** частотные диапазоны возбуждения первой и второй моды колебаний.

4) Впервые с использованием полных двумерных регуляризованных уравнений мелкой воды **проведено** математическое моделирование штормовых нагонов и сейшевых колебаний в Азовском море. **Рассчитаны** основные периоды сейшевых колебаний, а также максимальные высоты и времена экстремальных нагонов в прибрежных городах Азовского моря в марте 2013 г. и сентябре 2014 г. при реальном распределении ветровой нагрузки.

Теоретическая значимость исследования обоснована эффективностью применения метода регуляризованных уравнений мелкой воды, позволившей создать оригинальные методы решения для задач колебаний топлива в емкостях сложной формы, описание генерации волн Фарадея и ветровых явлений в акватории мелководных морей.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- Разработанные методы решения задач колебаниях топлива в баках газозовов, генерации волн Фарадея и циркуляции жидкости в неглубоких водоемах позволили существенно сократить необходимые вычислительные ресурсы и машинное время для решения этих задач;

- созданные программные решения могут использоваться для быстрой оценки максимальных нагрузок на стенки грузовых емкостей или для прогноза течений и уровня моря в зависимости от ветрового волнения в режиме реального времени.

Оценка **достоверности** результатов исследования выявила хорошее подтверждение результатов при их сопоставлении с имеющимися теоретическими и экспериментальными данными. Достоверность численных результатов для задачи колебаний жидкости в топливных баках газозовов установлена путем сравнения расчетов с моделью, описываемой в рамках уравнений Навье-Стокса с учетом движения свободной поверхности и эффектов турбулентности, для задачи о волнах Фарадея – с теоретическими оценками и данными лабораторных экспериментов, в задачах о сейшах и экстремальных нагонах в Азовском море – с данными метеорологических наблюдений в портах и городах на побережье.

Личный вклад автора состоит в разработке математических моделей для задач циркуляции жидкости в морских акваториях и колебаний жидкости в замкнутых сосудах, включении в алгоритм внешних источников данных, модификации численного алгоритма применительно к рассматриваемым задачам, создании на этой основе комплекса программ, проведении расчетов, интерпретации и оформлении всех полученных результатов, в том числе оформлении презентаций и публикаций по результатам выполненных работ.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация соискателя Сабурина Дмитрия Сергеевича представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, содержащую решение актуальных

практических задач и вносящую существенный вклад в развитие вычислительной гидродинамики. По актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости диссертация соответствует требованиям Положения «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. По своему содержанию диссертация отвечает паспорту специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

На заседании 14 июня 2018 г. диссертационный совет принял решение присудить Сабурину Дмитрию Сергеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них - 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель

диссертационного совета Д 002.024.03

Б.Н. Четверушкин

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.024.03

М.А. Корнилина

14 июня 2018 г.