

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.13, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 24 марта 2017 года публичной защиты диссертации Чуруксаевой Владиславы Васильевны «Численное исследование турбулентных течений в открытых каналах и руслах на основе модели мелкой воды» по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

На заседании присутствовали 19 из 26 членов диссертационного совета, из них 6 докторов наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы:

1.	Христенко Юрий Федорович, заместитель председателя диссертационного совета	д-р техн. наук	01.02.04
2.	Пикущак Елизавета Владимировна, ученый секретарь диссертационного совета	канд. физ.-мат. наук	01.02.05
3.	Архипов Владимир Афанасьевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
4.	Биматов Владимир Исмагилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
5.	Бубенчиков Алексей Михайлович	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
6.	Бутов Владимир Григорьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
7.	Ворожцов Александр Борисович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
8.	Глазунов Анатолий Алексеевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
9.	Глазырин Виктор Парфирьевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
10.	Крайнов Алексей Юрьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
11.	Кульков Сергей Николаевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
12.	Люкшин Борис Александрович	д-р техн. наук	01.02.04
13.	Макаров Павел Васильевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
14.	Скрипняк Владимир Альбертович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
15.	Старченко Александр Васильевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
16.	Тимченко Сергей Викторович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
17.	Черепанов Олег Иванович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
18.	Шрагер Эрнст Рафаилович	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
19.	Якутенко Владимир Альбертович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05

Заседание провёл заместитель председателя диссертационного совета доктор технических наук, старший научный сотрудник Христенко Юрий Федорович.

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить В.В. Чуруксаевой учёную степень кандидата физико-математических наук.

Заключение диссертационного совета Д 212.267.13

**на базе федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования**

«Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Министерства образования и науки Российской Федерации

по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 24.03.2017, № 305

О присуждении **Чуруксаевой Владиславе Васильевне**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Численное исследование турбулентных течений в открытых каналах и руслах на основе модели мелкой воды»** по специальности **01.02.05** – Механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 28.12.2016, протокол № 299, диссертационным советом **Д 212.267.13** на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012).

Соискатель **Чуруксаева Владислава Васильевна**, 1990 года рождения.

В 2013 году соискатель окончила федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

В 2016 году соискатель очно окончила аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Работает в должности ассистента на кафедре вычислительной математики и компьютерного моделирования в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре вычислительной математики и компьютерного моделирования и в научно-исследовательской лаборатории вычислительной геофизики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, **Старченко Александр Васильевич**, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», механико-математический факультет, декан; по совместительству – кафедра вычислительной математики и компьютерного моделирования, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

Перминов Валерий Афанасьевич, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности, профессор

Карпова Евгения Дмитриевна, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», отдел вычислительных моделей в гидрофизике обособленного подразделения – Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий отделом

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук** (г. Новосибирск), в своем положительном заключении, подписанном **Пененко Владимиром Викторовичем** (доктор физико-математических наук, профессор, лаборатория математического моделирования гидротермодинамических процессов в природной среде, заведующий лабораторией) и **Кузиным Виктором Ивановичем** (доктор физико-математических наук, профессор, лаборатория математического моделирования процессов в

атмосфере и гидросфере, заведующий лабораторией), указала, что актуальность диссертационной работы В.В. Чуруксаевой несомненна, так как в настоящее время математическое моделирование становится одним из основных средств изучения природных процессов, а разработка современных информационных технологий позволяет приблизить результаты теоретических исследований к практическому использованию. В рамках проведенного исследования соискателем построена мезомасштабная математическая модель стационарного турбулентного изотермического течения в открытом русле реки, замкнутая с помощью двухпараметрической модели турбулентности и учитывающая силу Кориолиса и влияние на поток донного трения; реализована новая, экономичная в реализации, версия численного метода получения согласованного решения уравнений модели; построена математическая модель нестационарного турбулентного двухфазного изотермического движения смеси «вода – ледяные частицы» в гидростатическом приближении и предложен численный метод решения уравнений модели на основе явно-неявных разностных схем; выполнены расчеты турбулентных течений и качества воды для реки Томь, с помощью моделирования определена возможность оценок локального подтопления прибрежных участков во время весеннего ледохода. Результаты работы могут быть использованы при дальнейшем развитии исследований, построении более совершенных моделей, учитывающих термические эффекты, при планировании наблюдательных экспериментов по исследованию речных систем, а также в учебном процессе при подготовке специалистов по гидромеханике и применению методов математического моделирования при решении природоохранных задач. Результаты, относящиеся к условиям р. Томь, могут быть использованы в критических ситуациях, возникающих при ледовых заторах, а также при оценке качества вод.

Соискатель имеет 11 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации – 11 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 3 (из них 1 статья в зарубежном научном журнале, индексируемом Web of Science), в сборниках международных и всероссийских научных и научно-практических конференций – 8 (из них 1 зарубежная конференция). Общий объем публикаций – 2,71 п.л., авторский вклад – 1,36 п.л.

Наиболее значительные работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. **Чуруксаева В. В.** Численное моделирование потока жидкости над рельефом дна / В. В. Чуруксаева, М. Д. Михайлов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2014. – № 1 (27). – С. 51–60. – 0,42 / 0,2 п.л.

2. **Чуруксаева В. В.** Математическая модель и численный метод для расчета турбулентного течения в русле реки / В. В. Чуруксаева, А. В. Старченко // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2015. – № 6 (38). – С. 100–114. – DOI: 10.17223/19988621/38/12. – 0,75 / 0,37 п.л.

3. **Churuksaeva V.** Mathematical modeling of a river stream based on a shallow water approach / V. Churuksaeva, A. Starchenko // Procedia Computer Science. – 2015. – Vol. 66. – P. 200–209. – DOI: 10.1016/j.procs.2015.11.024. – 0,52 / 0,25 п.л.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На автореферат поступило 7 положительных отзывов. Отзывы представили:

1. **В.А. Портола**, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры аэрологии, охраны труда и природы Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, и **А.А. Фомин**, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник отдела развития и международного сотрудничества Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, *с замечаниями*: В постановке задачи учитывается не только турбулентная, но и молекулярная вязкость (диффузия). Последняя является излишней, поскольку масштабы природных процессов и лабораторных установок таковы, что молекулярной вязкостью (диффузией) можно смело пренебречь.

2. **В.Д. Гольдина**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., ведущий научный сотрудник отдела прикладной математики и механики Института математики имени академика Абдухамида Джураева АН Республики Таджикистан, г. Душанбе, *с замечаниями*: входящие в систему уравнений стационарного турбулентного течения вязкой

жидкости значения трения на поверхности воды и на дне можно было бы объяснить подробнее, в частности, для донного трения; представление результатов расчетов на рисунках 1-6 в безразмерном виде более убедительно показало бы возможности применения моделей; графики можно было бы дополнить в тексте краткими оценками относительных отклонений; в автореферате встречаются незначительные опечатки.

3. **В.Э. Борзых**, д-р физ.-мат. наук, проф., профессор кафедры автомобильного транспорта, строительных и дорожных машин Тюменского индустриального университета, *с замечаниями*: выводы, приведенные в заключении, скорее, представляют собой отчет о проделанной работе, за исключением пунктов 4 и 8; заключение излишне детализировано.

4. **Л.Б. Чубаров**, д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник лаборатории анализа и оптимизации нелинейных систем Института вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск, *с замечаниями*: в автореферате отсутствует информация о параметрах регулярной сетки, на которой проводились расчеты; не приведено сопоставление результатов на разных сетках с указанием критериев достижения сходимости; не указан критерий выделения особых зон (неоднородности модели), где задается специальным образом значение «донного трения» в прибрежных зонах и на отмелях; в дальнейшем следует провести оценку сопоставления результатов, полученных с помощью схем различного порядка аппроксимации; не ясно, как процесс «реаэрации» учитывается в уравнениях математической модели; при сравнении полученных результатов с экспериментальными данными и результатами других авторов хотелось бы увидеть не только качественные, но и количественные оценки; в тексте встречаются «технические» неточности и опечатки, не всегда верно употреблены термины «апробация», «верификация», отсутствует пояснение понятия «согласованное решение».

5. **Л.Н. Фомина**, канд. физ.-мат. наук, доц., доцент кафедры ЮНЕСКО по информационным вычислительным технологиям Кемеровского государственного университета, *с замечаниями*: в автореферате не указаны размерности расчетных сеток, не приведено численное значение критерия сходимости ε (п. 6 алгоритма решения) и, соответственно, непонятно, являются ли все 4 знака после запятой модуля скорости достоверными.

6. **Ю.Я. Болдырев**, д-р техн. наук, профессор кафедры Прикладная математика Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого, *без замечаний*.

7. **М.А. Толстых**,

д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., ведущий научный сотрудник Института вычислительной математики РАН, г. Москва (в структуре института нет постоянных научных подразделений), *с замечанием:* в автореферате упоминаются монотонные схемы высокого порядка, но, поскольку в классе линейных схем для решаемых уравнений существуют лишь монотонные схемы, имеющие порядок аппроксимации не выше первого, то, вероятно, речь идет о нелинейных монотонных схемах.

В отзывах отмечается, что актуальность диссертационного исследования В.В. Чуруксаевой обусловлена необходимостью разработки адекватных методов защиты прибрежных территорий рек и каналов, населения, проживающего на таких территориях и расположенных там хозяйственных объектов от неблагоприятных явлений, связанных с аномальными паводками, ледовыми заторами, распространением вредных примесей. Методы математического моделирования наиболее эффективны для исследования базовых характеристик таких явлений, прогнозирования их вероятных последствий и разработки действий по смягчению ущерба от возможного катастрофического воздействия. В основе математических моделей, рассматриваемых в диссертационной работе В.В. Чуруксаевой, лежит описание турбулентного течения со свободной поверхностью в приближении «мелкой воды», которое реализуется с помощью численного решения уравнений математических моделей, описывающих течение в реках с частицами льда или без них. Соискателем построена мезомасштабная математическая модель стационарного турбулентного изотермического течения в открытом русле реки, замкнутая с помощью двухпараметрической модели турбулентности и учитывающая влияние на поток донного трения и силы Кориолиса; предложен новый эффективный численный метод получения решения уравнений модели; получены новые численные результаты расчетов течения и качества воды на примере реки Томь, показывающие определяющее влияние турбулентности на формирование областей рециркуляции течения и распределение примеси в речном потоке; построены математическая модель нестационарного турбулентного двухфазного изотермического движения смеси «вода – ледяные частицы» в гидростатическом приближении и численный метод решения уравнений модели на основе явно- неявных разностных схем; получены новые результаты по расчетам двухфазного течения воды с легкими частицами в открытых каналах, демонстрирующие

зависимость структуры потока от параметров дисперсной фазы. Результаты исследования не только имеют существенное значение для развития математических моделей водоемов, но и могут быть применены к решению широкого круга задач от экологической проблематики (загрязнение рек и водоемов) до предсказания формирования ледовых заторов и вызванных ими локальных затоплений во время ледоходов. Практическая значимость исследования обусловлена также тем, что воды р. Томь существенно загрязнены после прохождения по территории промышленного Кузбасса, и поэтому качество воды р. Томь в районе г. Томска является одной из самых болезненных проблем экологии города.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **В.А. Перминов** является известным специалистом в вопросах математического моделирования процессов тепло- и массопереноса в многофазных средах и численного исследования загрязнения окружающей среды; **Е.Д. Карпова** является известным специалистом в вопросах математического моделирования течений со свободной поверхностью в приближении мелкой воды и методах решения задач конвекции-диффузии; **Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН** известен своими достижениями в области математического моделирования атмосферных и гидрологических процессов, разработки численных методов решения прямых и обратных задач математической физики, геофизики, физики атмосферы, океана и окружающей среды.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

сформулирована математическая модель для исследования гидродинамики турбулентного, стационарного, изотермического течения в открытых каналах и речных руслах на основе осредненных по глубине уравнений Рейнольдса и уравнения конвекции-диффузии для моделирования переноса примеси. В модели учтено влияние трения о русло реки, ветрового трения, силы Кориолиса, нерегулярной геометрии речного русла;

представлен новый эффективный численный метод для решения осредненных по глубине уравнений гидродинамики. Метод основывается на конечно-объемной аппроксимации на структурированных сетках, итерационной

процедуре решения сеточных уравнений, применении монотонизированных схем высокого порядка аппроксимации;

расчетами *показано*, что наибольшее влияние на гидродинамику течения со свободной поверхностью и его турбулентную структуру в открытом канале оказывают глубина потока и трение о стенки и дно канала. Для речных потоков *установлено* значительное влияние турбулентности на формирование структуры течения и интенсивность переноса примеси в нем;

построена новая математическая модель двухфазного изотермического турбулентного течения смеси «жидкость – легкие частицы» в рамках механики взаимодействующих и взаимопроникающих континуумов. Модель учитывает динамическое скольжение фаз, подъемную силу, действующую на частицы, соударение частиц между собой, турбулентную структуру движущейся жидкости и частиц, трение жидкости и частиц о дно и стенки канала;

предложен новый численный метод для совместного решения гидродинамических уравнений несущей и дисперсной фаз на основе явно-неявных аппроксимаций первого-второго порядка, позволяющий проводить сквозные расчеты в областях с неоднородным распределением частиц вплоть до их полного отсутствия;

расчетами *установлено*, что частицы в большей мере реагируют на подъем рельефа дна, чем на резкое изменение направления движения потока, а наличие частиц в потоке увеличивает неоднородность распределения свободной поверхности в поворотной части канала;

проведены вычислительные эксперименты по исследованию затопления прибрежных территорий р. Томь в результате резкого подъема уровня воды или вскрытия реки перед началом ледохода. Анализ полученных результатов показал, что разработанная модель правильно предсказывает подтопление низин и островов, связанное с увеличением уровня воды и увеличением сопротивления потока со стороны ледяных частиц.

Теоретическая значимость исследований обоснована тем, что:

разработаны математические модели, расширяющие области применения численного моделирования к исследованию течений в естественных водоемах за счет моделирования турбулентности потока;

построены численные методы, уточняющие существующие подходы к расчету течений со свободной границей;

разработана математическая модель осреднённого по глубине двухфазного течения «вода – ледяные частицы» на основе механики взаимодействующих взаимопроникающих континуумов;

установлены параметры двухфазного потока, оказывающие наибольшее влияние на его структуру;

установлена возможность применения разработанной двухфазной модели для описания движения ледяных частиц и образования заторов на реке во время весеннего ледохода.

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

построен комплекс гидродинамических моделей, позволяющих моделировать мезомасштабные течения в реках с точностью, достаточной для анализа пространственного распространения примеси и моделирования течения реки во время весеннего ледохода;

получены результаты, которые могут использоваться в учебном процессе при изучении применения методов математического моделирования для решения природоохранных задач.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования. Разработанные в рамках исследования математические модели могут использоваться при решении широкого круга задач, связанных с моделированием изотермических турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости, а также нестационарных многофазных изотермических турбулентных течений жидкостей с легкими частицами. Разработанные автором численные модели могут быть использованы при моделировании с целью мониторинга и прогнозирования состояния гидротехнических сооружений, а также рек, как в летний период, так и подо льдом, и во время ледохода. Результаты численных расчетов течения в реке могут использоваться для совершенствования существующих методик моделирования состояния водоемов и могут быть

рекомендованы для применения в образовательных учреждениях и академических институтах, которые занимаются исследованием однофазных и многофазных течений, а также течений в реках и технологических сооружениях, таких как Национальный исследовательский Томский государственный университет, Институт гидродинамики им. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск), Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (г. Новосибирск), Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск), Институт вычислительного моделирования СО РАН Красноярского научного центра СО РАН, Институт водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул) и в других образовательных, научных, академических и проектных организациях.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

математические модели построены на основе фундаментальных законов механики жидкости и механики взаимодействующих, взаимопроникающих континуумов;

для решения задачи использованы хорошо апробированные численные методы механики жидкости и газа;

проведено сравнение результатов численного моделирования с известными опубликованными теоретическими и экспериментальными данными других исследователей, а также с трехмерными расчетами с использованием пакета ANSYS Fluent, показавшее хорошее согласование сравниваемых результатов.

Новизна результатов диссертационного исследования заключается в развитии математических моделей для описания однофазных и двухфазных изотермических течений вязкой несжимаемой жидкости в открытых каналах и руслах. С использованием построенной модели однофазного стационарного изотермического течения жидкости в открытом русле, дополненной модифицированной моделью Стритера-Фелпса, впервые получены результаты численного исследования течения в р. Томь вблизи г. Томска и распространения примеси в речном потоке. Разработана новая математическая модель нестационарного двухфазного изотермического движения смеси «вода – ледяные

частицы» и численный метод получения решения. На основе проведенных с помощью данного подхода расчетов показано, что резкое изменение рельефа дна канала и формы частиц оказывают заметное влияние на характер двухфазного течения. Впервые были проведены расчеты затопления прибрежной территории во время повышения уровня воды и вскрытия ото льда р. Томь вблизи г. Томска.

Личный вклад соискателя состоит в: осуществлении совместно с научным руководителем постановки всех задач диссертации, построения математических моделей, проведении анализа и обсуждения всех полученных результатов; в самостоятельной разработке вычислительных алгоритмов и программных кодов, выполнении расчетов, проведении тестирования построенных численных моделей, подготовке основных публикаций по теме диссертации.

Диссертация отвечает критериям Положения о присуждении ученых степеней, установленным для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и, согласно пункту 9 Положения, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи математического моделирования однофазных и двухфазных изотермических турбулентных течений несжимаемой жидкости в открытых каналах и руслах рек, имеющей значение для развития механики жидкости, газа и плазмы.

На заседании 24.03.2017 диссертационный совет принял решение присудить **Чуруксаевой В.В.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 6 докторов наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя
диссертационного совета
Ученый секретарь
диссертационного совета



Христенко Юрий Федорович

Пикущак Елизавета Владимировна

24.03.2017