

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Проценко Софьи Владимировны «**Математическое моделирование волновых гидродинамических процессов в прибрежных системах с использованием многопроцессорных вычислительных систем**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

### **1. Актуальность темы и соответствие специальности**

Решение проблемы сохранения природного качества вод в мелководных прибрежных системах является одной из самых важных на сегодняшний день. Недостаточное научное обеспечение в области разработки гидродинамических комплексов предназначенных для исследования гидрологии в мелководных прибрежных системах, учитывающих модель параметризации коэффициента вертикального турбулентного обмена, выбранную на основе согласования с измеренными данными, а также недостаточный учет особенностей динамики в мелководных прибрежных системах, многообразия природных факторов и механизмов, характеризующих конкретные мелководные водоемы, приводит к ряду недостатков в практике исследований, проектирования и эксплуатации систем инженерной защиты.

В мелководных прибрежных системах вертикальное турбулентное перемешивание под воздействием приливно-отливных течений, ветра и донного трения является определяющим во всех гидродинамических процессах. Однако на сегодняшний день среди множества подходов нет определенной параметризации коэффициента вертикального турбулентного обмена для данного типа водоема. Это связано с тем, что в мелководных прибрежных системах турбулентное перемешивание охватывает всю толщу вод за счет наложения различных механизмов.

Поэтому, проблема разработки и совершенствования научного обеспечения, предназначенного для мелководных прибрежных систем, с целью инженерной защиты природных вод от загрязнения на техногенно-нагруженных территориях, учитывающая особенности механизмов вертикального турбулентного обмена и позволяющая, прогнозировать уровень негативного воздействия природно-климатических и антропогенных воздействий и обеспечить условия для проведения эффективного восстановления экологически опасных территорий, является своевременной и актуальной.



Тема исследований диссертационной работы **соответствует следующим пунктам паспорта специальностей 05.13.18** в п.1 Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений; п.3 Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий; п. 4 Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

## **2. Обоснованность, достоверность и новизна научных положений и выводов**

Основные положения, выносимые на защиту, и выводы диссертационной работы Проценко С.В. являются обоснованными как результатами проведенного собственного исследования, так и общепринятыми концепциями современной гидродинамики. Обоснованность и достоверность полученных результатов обусловлена применением в исследовании математического аппарата, корректным и достаточно строгим использованием математических методов. Поставленные в работе задачи решены с использованием валидных и общепринятых методик. Для описания волновых процессов использована система уравнений Навье-Стокса, включающая три уравнения движения в областях с динамически изменяемой геометрией расчетной области. Для аппроксимации гидродинамической модели использовано расщепление по физическим процессам – вариант метода поправки к давлению. Разностные схемы, описывающие математическую модель выхода волны на берег, построены на основе интегро-интерполяционного метода с применением схемы с весами. Для решения уравнений использован адаптивный попеременно-треугольный итерационный метод. Автором получен большой объем данных, математический анализ которых выполнен корректно с помощью современных статистических методов. Достоверность результатов исследования сомнений не вызывает.

Научные работы соискателя дополняют и развивают теоретические и практические положения по исследуемым вопросам. Предложенные и опубликованные автором усовершенствованные модели волновой гидродинамики позволяют повысить точность математического моделирования исследуемых процессов и строить оперативные прогнозы динамики развития прибрежной зоны мелководных водоемов.

Научная новизна диссертационного исследования в **области математического моделирования** состоит в разработке пространственно-неоднородной трехмерной математической модели волновой гидродинамики мелководного водоема, с оптимальной параметризацией коэффициента



вертикального турбулентного обмена; в области численных методов построен дискретный аналог модели, выполнено аналитические исследования устойчивости полученной модели; разработан симметризованный адаптивный попеременно-треугольный итерационный метод, проведено его экспериментальное исследование и сравнение с базовым вариантом метода; **создан комплекс программ**, предназначенный для моделирования гидродинамических волновых процессов в прибрежной зоне на основе разработанных в диссертации моделей и алгоритмов, с учетом изменяющихся входных гидрофизических параметров, влияющих на движение волн, переформирование рельефа дна, и позволяющих оценивать воздействие волн на берег и объекты инфраструктуры.

**Практическая значимость диссертационной работы заключается** в построении дискретной пространственно-трехмерной модели гидродинамических волновых процессов с уточненным описанием вертикального турбулентного обмена в прибрежной зоне, вычислительных алгоритмов и набора программ, позволяющих осуществлять предсказательное моделирование процессов переформирования рельефа дна, а также силовое воздействие на объекты прибрежной инфраструктуры. Разработан программный комплекс под управлением MPI, содержащий параллельные модули, реализующие наиболее трудоемкие, с точки зрения временных затрат, вычислительные блоки, позволяющий в оперативном режиме осуществлять предсказательное моделирование неблагоприятных и опасных явлений, связанных с возникновением волн большой высоты в прибрежной зоне и их воздействием на объекты прибрежной инфраструктуры в оперативном режиме. Разработанный программный комплекс дает возможность оценивать долговременные последствия, на временном интервале многие месяцы-годы, волнового воздействия на рельеф дна и объекты береговой инфраструктуры. Получены 8 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, среди которых: «Решение трехмерной математической модельной задачи выхода волны на берег» № 2018613129 от 02.03.2018 г.; «Реализация математической модели гидродинамики со сложной геометрией расчетной области на прямоугольной сетке» № 2018664543 от 19.11.2018 г.; «Решение задач гидродинамики и переноса при больших числах Рейнольдса на основе метода учета заполненности ячеек» № 2019661359 от 28.08.2019 г.

### **3. Содержание и структура диссертации**

Диссертация представлена в традиционном стиле и состоит из введения, где дается обоснование актуальности исследуемой автором проблемы. Определены



цель и задачи исследований, основные положения, выносимые на защиту, а также научная новизна полученных результатов.

В первой главе анализируется имеющийся исследований теории гидродинамических волновых процессов и теоретических аспектов гидродинамических волновых процессов отечественных и иностранных авторов, что свидетельствует о компетентности автора в исследуемой проблеме. В главе представлен анализ конструкций берегозащитных технологий и технических решений берегозащиты, выявлено воздействие берегозащитных сооружений на постепенную эволюцию характеристик гравитационных поверхностных волн.

Вторая глава посвящена параметризации вертикального турбулентного обмена для моделей 3D гидродинамики мелководных водоемов и исследованию вертикальной структуры процессов турбулентного перемешивания в водоемах. В главе проведено моделирование турбулентного обмена на основе обработки информации натурных наблюдений профилей скорости течения водного потока в мелководном водоеме и проведено исследование итогов параметризации коэффициента вертикального турбулентного обмена средствами математической статистики.

Третья глава посвящена построению и исследованию трехмерных моделей волновой гидродинамики для прибрежных систем, доказательству устойчивости и консервативности модели. В главе представлена модель силового влияния волн на берегозащитные сооружения.

Четвертая глава посвящена разработке симметризованного адаптивного попеременно-треугольного итерационного метода. В главе проведено сравнение двух вариантов попеременно-треугольного метода: адаптивного ПТМ и симметризованного адаптивного ПТМ. Представлена параллельная модификация алгоритма решения сеточных уравнений.

Пятая глава посвящена разработке программного комплекса и проведению вычислительного эксперимента. Приведено описание созданного программного комплекса, позволяющего изменять характеристики и расположение источника колебаний и учитывать форму зон и степень интенсивности осушения и затопления береговых участков.

В заключении изложены главные результаты и выводы.

#### **4. Научная и практическая значимость результатов**

Результаты проведенного в рамках работы над диссертацией исследования позволяют глубже понять механизм турбулентного обмена по вертикальному направлению для мелководных водоемов подобных Азовскому морю. В работе построены алгоритмы численной реализации дискретных моделей волновых



процессов и воздействия волн на прибрежные и берегозащитные сооружения, которые по сравнению с методиками, не учитывающими пространственно-трехмерный характер движения волн, имеют лучшую точность в определении волновых характеристик. По теме диссертационной работы опубликовано 50 работ, из них 22 статьи опубликованы в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus, 5 статей в отечественных реферируемых журналах, входящих в список изданий, рекомендованный ВАК.

**Практическая значимость работы** определяется программной реализацией предложенных методов параметризации коэффициента вертикального турбулентного обмена, а также модернизацией трехмерной математической модели выхода волны на берег при наличии инженерно-технических сооружений. Экспериментально получены распределения коэффициента вертикального турбулентного обмена с использованием данных о пульсациях компонент скоростей, измеренных в ходе экспедиций. Получено согласование результатов численного моделирования с данными натурных измерений. Практическая значимость диссертационной работы подтверждена актами о внедрении. Полученные в диссертационной работе результаты приняты к использованию в ФГУП «РОСМОРПОРТ» Азовском бассейновом филиале; в АО «РОСТОВСКИЙ ПОРТ».

#### **5. Недостатки и замечания**

1. Ветровое волнение носит стохастический характер, данный факт не учтен при построении программного комплекса. Целесообразно привести соответствующую мотивировку в тексте диссертации, а в дальнейших исследованиях – учитывать этот фактор.

2. Приведенные результаты численных экспериментов, связанные с силовым воздействием на различные типы берегозащитных сооружений, не позволяют увидеть динамику изменения геометрии дна, образования структур и наносов под действием волн.

3. Отсутствует листинг программы.

4. В тексте диссертации имеются неточности и опечатки, что затрудняет чтение и понимание работы.

5. Следовало бы сократить изложение общеизвестных положений в первой главе.

Приведенные выше замечания не снижают заметным образом высокой положительной оценки данной диссертационной работы.



## 6. Оценка диссертации в целом

Диссертационная работа Проценко С.В. представляет собой целостное научное исследование на актуальную тему, в котором приведен ряд новых результатов, связанных с математическим моделированием волновых процессов. Результаты, полученные в диссертации Проценко Софьи Владимировны представляют научную ценность и вносят вклад в развитие современных численных методов исследования волновых процессов.

Диссертационная работа написана понятным и, в то же самое время, профессиональным языком и хорошо оформлена. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация Проценко С.В. представляет собой важное, интересное и профессионально выполненное исследование, соответствующее статусу научно-квалификационного труда. Отмечая актуальность, новизну, научно-практическую ценность и высокий методический уровень исследования, можно сделать следующее заключение: диссертационная работа Проценко Софьи Владимировны, удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:

член-корреспондент РАН, профессор,  
доктор физико-математических наук  
федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Московский физико-технический  
институт (национальный исследовательский университет)»

**И.Б.Петров**

23.12.2021 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Тел. +7 (495) 408-45-54.

Официальный сайт учреждения <https://mipt.ru/>.

e-mail: petrov@mipt.ru.

