Отзыв официального оппонента на диссертацию
Козелкова Андрея Сергеевича
«Моделирование волн цунами космогенного и оползневого происхождения на основе уравнений Навье-Стокса»,
представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа А.С. Козелкова посвящена актуальной проблеме - разработке физико-математических моделей и алгоритмов для моделирования цунами космогенного и оползневого происхождения в рамках уравнений Навье-Стокса.

Цунами является частым стихийным бедствием. Для смягчения последствий цунами, решения задач прогнозирования, необходимы комплексные исследования, направленные на изучение механизмов генерации волн цунами, в том числе оползнями, вулканическими извержениями и падениями небесных тел. Эти задачи охватывают широкий круг проблем механики сплошных сред, геофизики, гидродинамики и других разделов науки. Современные методы исследования волн цунами основаны на теории мелкой воды и её обобщениях. Уравнения нелинейной теории мелкой воды, реализованные численно, позволили смоделировать многие исторические цунами. Несмотря на достигнутые успехи, расчет характеристик цунами представляет собой достаточно трудную задачу, как из-за неопределенности параметров очага, так и из-за многочисленных дополнительных факторов, таких как, например, нелинейность и дисперсия. Поэтому очевиден переход к более сложным моделям описания цунами, что и сделано автором диссертации. Такой моделью является модель, основанная на системе уравнений Навье-Стокса. Она особенно важна для изучения формирования цунами и выхода волн на берег. Данная система очень сложна даже для численного решения, и в настоящее время уравнения Навье-Стокса для моделирования волн цунами практически не используются. Диссертант своей работой исправляет эту ситуацию. Поэтому актуальность и обоснованность темы диссертации не вызывает сомнения.

Хорошее согласие между результатами численных расчетов и надежными экспериментальными данными, систематизированными в базе данных, содержащей наиболее известные задачи со свободной поверхностью, а также результаты моделирования исторических событий, свидетельствуют об обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций обосновывается широкой апробацией результатов диссертации на многочисленных всероссийских и международных конференциях, а также печати в высокорейтинговых журналах, входящих в мировые индексы цитирования.

Структура диссертационной работы полностью отражает логику исследования. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Каждая глава имеет краткие введения.

Во **введении** диссертации обосновывается актуальность темы диссертационной работы, степень проработанности темы исследования, формулируются цели исследования и приводятся положения, выносимые на защиту. В этом разделе также содержатся сведения о практической значимости работы, ее апробации и научной новизне, фиксируется личный вклад автора.

В первой главе диссертации представлено описание существующего уровня развития вычислительных технологий в механике однофазной жидкости на основе уравнений Навье-Стокса. Особое внимание уделено дискретизации конвективных потоков, которые существенно влияют на физику и точность при моделировании турбулентных течений. Предложена новая схема дискретизации конвективных слагаемых, формулировка которой выполнена таким образом, чтобы уменьшить ее нелинейность и, следовательно, увеличить скорость сходимости решения. Даны рекомендации по использованию представленных методов и характерные размеры необходимых сеточных элементов. Представлено краткое описание пакета программ ЛОГОС, в котором реализованы представленные в диссертации технологии и алгоритмы. Приведены результаты тестирования пакета программ ЛОГОС на известных аналитических решениях и экспериментальных данных. Представленные в первой главе алгоритмы диссертант целиком адаптировал под расчеты космогенных и оползневых волн цунами. В мировой и отечественной практике расчетов волн цунами такие технологии до настоящего времени не применялись.

Вторая глава диссертации посвящена представлению адаптации разработанных в первой главе технологий для расчета волн на свободной поверхности жидкости. При этом базовая система уравнений Навье - Стокса усложняется и записывается для моделирования многофазных течений с границей раздела. Очень подробно приведены основные формулы дискретизации уравнений модели с использованием метода конечных объемов и основные шаги вычислительной процедуры. Численный подход проверяется на известных задачах механики жидкости: задача об обрушении плотины, задача о колебаниях воды в резервуаре под действием силы тяжести, задача об обрушении плотины на дно резервуара с препятствием, задача о гидравлическом ударе, задача о течении через шлюзовые ворота, задачи о падении шара, параллелепипеда и капли в жидкость. Предложенный метод приспособлен к расчету цунами на большие расстояния (включая трансатлантические трассы). На примере решения задач о равновесии двухфазной среды в поле силы тяжести, колебания жидкости в поле силы гравитации и обрушения столба жидкости показано, что

предложенные алгоритмы позволяют обеспечить предсказание корректного поля, отсутствие осцилляций в поле скорости и искажения свободной поверхности. Также, что немаловажно, предложены оптимальные параметры использования разработанных методов, сеточного разрешения и шага по времени для моделирования волн цунами космогенного и оползневого происхождения.

В третьей главе обсуждается математическое моделирование в проблеме космогенных цунами. На базе методов, изложенных во второй главе, представлена технология, позволяющая совместить все стадии моделирования космогенных цунами воедино – источник, распространение и накат. Представлены результаты моделирования распространения космогенных цунами в бассейне постоянной глубины от различных источников возмущения. Показано, что изменение параметров каверны наиболее интенсивно происходит при углах падения тела в воду более 20° и подчиняется квазилинейному закону. Падение тела в воду под углами меньше 20° происходит по другому сценарию, и при определенных условиях тело отскакивает от поверхности воды, а область возмущения имеет крайне размытые границы. Представлены результаты численного моделирования возмущений, образовавшихся при входе Челябинского метеорита в озеро Чебаркуль, произошедшем 15 февраля 2013 года. Рассчитаны характеристики волн, как на чистой воде, так и при учете льда на поверхности. Показано, что с точки зрения цунами энергии фрагмента Челябинского метеорита, упавшего в воду, недостаточно для генерации больших волн и весь эффект проявляется только в месте входа метеорита в воду. Выполненные численные расчеты и оценки правильно предсказывают диаметр полыньи, наблюдаемой на озере после входа в него метеорита. Эту часть диссертации считаю наиболее важной.

В четвертой главе диссертации разработанный подход на базе уравнений Навье-Стокса применяется для моделирования волн цунами оползневого происхождения. На примере моделирования исторического цунами продемонстрированы все возможности применения разработанных в диссертации методов. При этом акцент делается на моделирование цунами в реальных акваториях Мирового океана – для этого диссертантом разработана технология построения трехмерных сеточных моделей с учетом батиметрических данных. Для цунами оползневого типа проведена дополнительная верификация методов, разработанных диссертантом, на задачах о сходе в воду надводного и частично-погруженного оползня, имеющих экспериментальные данные. Представлены результаты полевого обследования, выполненного при непосредственном участии диссертанта, по обследованию следов цунами, вызванного извержением вулкана Суфриер на острове Монтсеррат в 2003 году. Получены уникальные материалы о данном событии на Карибских островах. Высота волны цунами по измерениям составляет 4 м на острове

Монтсеррат и 1 м на острове Гваделупа. Выполнено численное моделирование этого события в рамках теории мелкой воды, в рамках нелинейно-дисперсионной теории, а также на основе многофазных уравнений Навье-Стокса. Результаты по всем подходам сравнивались между собой.

Высоко оценивая диссертационную работу в целом, хочу отметить следующие недостатки (не заостряя внимание на небольшом количестве грамматических и технических ошибок):

1. Диссертантом никак не поясняется, как учитывается реология оползневых структур в предлагаемой модели.
2. В качестве оползневого цунами выбрано цунами на Карибских островах. Подкупает то, что автор принимал участие в его обследовании, но, на мой взгляд, наблюдаемые данные слишком скудны, чтобы их моделировать уравнениями Навье-Стокса.
3. В диссертации нигде не говорится о том, какую погрешность будут иметь предлагаемые методы при вхождении метеорита в водную среду на гиперзвуковой скорости.

Отмеченные недостатки не влияют на весьма приятное впечатление, оставленное после прочтения диссертации, и на общую положительную оценку диссертационной работы в целом. Диссертация Козелкова А.С. «Моделирование волн цунами космогенного и оползневого происхождения на основе уравнений Навье-Стокса» соответствует «Положению о присуждении ученых степеней» от 24.09.2013 г. № 842, «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней» от 21.04.2016 г. № 335 и является научно-квалификационной работой, в которой полученные автором результаты, безусловно, имеют большое теоретическое и прикладное значение. Это первое в нашей стране исследование волн цунами в рамках уравнений Навье – Стокса, что делает исследование пионерским и новаторским, и что важно для диссертаций докторского уровня. Предложенные автором решения позволят перейти на качественно новый уровень математического моделирования волн цунами, что, несомненно, будет востребовано в задачах прогноза.

Работа очень хорошо и подробно изложена с приведением всех необходимых выкладок и пояснений. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Результаты работы многократно докладывались на всероссийских и международных конференциях, они в полной мере опубликованы (включая высокорейтинговые журналы).

Считаю, что тема и содержание диссертации Козелкова Андрея Сергеевича «Моделирование волн цунами космогенного и оползневого происхождения на основе уравнений Навье-Стокса» соответствует специальности 01.02.05 - «Механика жидкости, газа и плазмы». Диссертационная работа полностью удовлетворяет всем требованиям,

предъявляемым ВАК РФ к докторским диссертациям, а диссертант Козелков Андрей Сергеевич, несомненно, достоин присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 - «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук, профессор
Левин Борис Вульфович

научный руководитель Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН)

Адрес: 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б,
http://www.imgg.ru
тел./факс: +7 4242 791-517,
e-mail: levinbw@mail.ru.

«29» 08 2016 г. _____ Б. В. Левин

Место печати

Подпись официального оппонента,
члена-корреспондента РАН,
доктора физико-математических наук, профессора Левина Б.В.
заверяю.

Ученый секретарь ИМГиГ ДВО РАН:
кандидат физико-математических наук Закупин А.С.