

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Романовой Дарьи Игоревны
на тему: «Трёхмерное математическое моделирование
природных склоновых потоков с учетом сложной реологии,
турбулентности и захвата подстилающего материала»
по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертация Романовой Д.И. посвящена математическому моделированию катастрофических потоков на склонах гор, таких как снежные лавины, сели, быстрые оползни и т.д. Сложность моделирования склоновых потоков заключается в следующих их свойствах: трёхмерная структура, кратковременность и существенная нестационарность, неньютоновская реология движущейся среды, наличие свободной поверхности с возможными самопересечениями, турбулентный режим, сложная геометрия склона, а также разрушение потоком материала склона и вовлечение разрушенного материала в движение. Предложенная в диссертации модель учитывает все вышеперечисленные свойства потоков на склонах гор.

Плотные склоновые потоки обладают тем свойством, что их типичная глубина, (измеряемая метрами) много меньше продольного размера (сотни метров). Соответственно, можно для их расчета использовать уравнения теории мелкой воды, получающиеся осреднением уравнений гидродинамики по глубине, с включением членов, задающих донное трение и вовлечение донного материала. Такой подход называют гидравлическим, он широко применяется при расчетах течений воды в реках и каналах. Модели гидравлического типа существуют и используются и для моделирования снежных лавин, селей, оползней, лавовых потоков. При этом вычисляются средние по глубине скорости, глубина (толщина) потока, его границы в плане и так называемая дальность выброса – границы остановки потока.

Однако, гидравлические модели не дают возможности найти распределение скорости и других параметров потока по глубине, что необходимо при проектировании защитных сооружений и других объектов, располагающихся на пути потока, для расчета сил, которые будут действовать на них при ударе потока. Такие сведения могут быть получены только с использованием трехмерных моделей, основанных на полных, не осредненных по глубине уравнениях. Построение трехмерных математических моделей склоновых потоков и их численной реализации становится все более актуальным и реализуемым благодаря возможностям, связанным с развитием вычислительной и измерительной техники. Этому посвящена диссертация Д.И. Романовой, в которой представлена одна из первых таких моделей. Важно, что в работе не только сформулирована математическая модель, но и разработан инструмент для ее численной реализации на основе открытого программного пакета OpenFoam с включением ряда дополнительных авторских модулей. Проведено численное моделирование натуральных и экспериментальных склоновых потоков.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и 3 приложений. Полный объем диссертации составляет 162 страницы, включая 46 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 145 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в работе, формулируются цели, ставятся задачи диссертационной работы, излагается научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В **первой главе** производится обзор литературы, перечисляются существующие в настоящий момент модели склоновых потоков и модели, существовавшие ранее. Делается краткий обзор используемых для моделирования реологических моделей и моделей захвата донного материала.

Во **второй главе** формулируется трёхмерная математическая модель склонового потока. В качестве численной модели используется метод VoF (Volume of Fluid), что позволяет решать такие сложные задачи, как

взаимодействие потока с различными препятствиями, в том числе вертикальными дамбами, сбросами, бассейнами и др. Данный метод позволяет описывать всплески потока и волны, так как в силу особенностей метода может разрешать самопересечение границ потока (например, поток с брызгами). Для описания реологических свойств движущегося материала используется модель Хершеля-Балкли, учитывающая наличие предела текучести и нелинейную зависимость вязкой части напряжений от скоростей деформаций. Эта модель позволяет, в частности, описать остановку потока на наклонной поверхности, что свойственно, например, снежным лавинам и оползням. Для турбулентных склоновых потоков используются k - ϵ и k - ω SST модели турбулентности.

В **третьей главе** приведен процесс разработки программного комплекса для моделирования потоков на склонах, включающий в себя разработку дополнительных модулей, отвечающих за рельеф местности. Валидация разработанного программного комплекса проводится по результатам моделирования эксперимента по спуску потока в лотке с дамбами, поставленного в университете Исландии. Также в данной главе приведены результаты моделирования снежной лавины в 22-ом лавинном очаге горы Юкспор (Хибины), сошедшей 5 апреля 1985 года, полученные разработанным диссертантом программным комплексом.

Четвёртая глава посвящена разработке математической и численной моделей разрушения материала дна (подстилающего материала) и дальнейшего уноса его потоком. Диссертантом формулируется гипотеза о захвате, связанная с превышением вторым инвариантом тензора напряжений порогового значения. На основе предложенной гипотезы создаётся модуль для программного комплекса, рассчитывающий разрушение движущимся потоком донного материала и вовлечение его в движение. Для проведения валидации проводится расчёт модельной задачи течения на склоне постоянного уклона. Проводится исследование влияния параметров реологической модели потока на скорость разрушения и захвата донного материала. Разработанный программный комплекс используется для предсказания карты разрушения снежного покрова

потоком при прорыве ледникового озера Малый Азау (Кавказ, Приэльбрусье).

В **пятой главе** проведена оптимизация коэффициентов $k-\varepsilon$ и $k-\omega$ SST турбулентных моделей с использованием данных эксперимента по спуску турбулентного потока жидкости в лотке постоянного уклона, поставленного при участии автора в НИИ Механики МГУ.

В **заключении** приведены основные результаты работы, приведены рекомендации по их использованию и дальнейшему развитию.

В **приложениях** описан процесс разработки ПО, и детали его использования.

В качестве наиболее важных результатов можно отметить следующие результаты диссертации:

1. Были разработаны трёхмерная математическая и численная модели плотных геофизических потоков на склонах гор, учитывающие сложные реологические свойства материала потока, турбулентный режим движения, сложный реальный рельеф склона, а также возможное вовлечение потоком в движение донного материала. Сформулированная модель реализована в открытом свободно распространяемом пакете OpenFOAM в виде решателя avalancheFoam, в который были включены разработанные автором дополнительные модули, отвечающие за обработку цифровой модели рельефа, нелинейную реологию и вовлечение донного материала.

2. Проведено моделирование ряда геофизических потоков с использованием разработанного решателя avalancheFoam, в том числе моделирование снежной лавины на горе Юкспор (Хибины), прорыва ледникового озера Малый Азау (Кавказ, Приэльбрусье), эксперимента, поставленного при участии автора в НИИ Механики МГУ, эксперимента Университета Исландии, модельной задачи разрушения и захвата подстилающего материала потоком на склоне постоянного угла наклона.

Все декларированные в диссертации результаты являются новыми. Их достоверность обеспечивается использованием классических математических методов механики сплошных сред и общепризнанных вычислительных

методов. При проведении численных расчётов проверена сеточная сходимость, и, где это возможно, проведено сравнение результатов с аналитическими и экспериментальными данными. Результаты диссертации докладывались автором и обсуждались на семинаре НИИ механики МГУ по механике сплошных сред под руководством академика РАН А.Г. Куликовского, профессора В.П. Карликова, член-корр. РАН О.Э. Мельника, профессора А.Н. Осипцова; на семинаре кафедры газовой и волновой динамики механико-математического факультета МГУ под руководством академика Р.Н. Нигматулина, профессора Н.Н. Смирнова и профессора А.В. Звягина; на семинаре кафедры аэромеханики и газовой динамики механико-математического факультета МГУ под руководством профессора К.В. Краснобаева, профессора В.В. Измоденова, профессора В.Д. Котелкина, профессора В.Я. Шкадова; на семинаре отдела гидрологии речных бассейнов Института водных проблем РАН под руководством профессора В.В. Беликова. Основные результаты диссертации в полной мере отражены в 7 научных статьях, 1 из которых издана в журнале, рекомендованном ВАК, 2 – в периодических научных журналах, индексируемых RSCI, 2 – в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Диссертация написана ясным и доступным языком, результаты изложены понятно. Тем не менее, к работе имеются некоторые замечания:

1. Желательно было бы провести сопоставительные расчеты по 2D и 3D моделям хотя бы для нескольких объектов, чтобы количественно оценить преимущества и недостатки двух подходов;

2. Условие прилипания на дне для склоновых потоков, на наш взгляд, не совсем физично;

3. Расчетная схема в пакете OpenFoam достаточно грубая (в частности, первого порядка по пространству и времени для конвективных слагаемых). Кроме того, неявная схема неэффективна для расчета высокоскоростных потоков с большими числами Фруда, и она плохо распараллеливается, что приводит к большому времени счета;

4. Прогноз изменения русла реки Азау при прорыве ледникового озера на леднике Малый Азау недостаточно обоснован. Скорее всего, русло реки на мелкомасштабной карте изображено неверно (на некоторых участках идет вдоль горизонталей). И такие прогнозы следует делать с учетом деформации ложа водотока;

5. Название таблицы 3 на стр.55 диссертации полностью дублирует название табл.2;

6. На рис.5.4, 5.5 глубины жидкости указаны в миллиметрах, что скорее всего неверно. Трубкой Пито измерить скорость на расстоянии 0.5 мм от дна проблематично.

Высказанные замечания не влияют на положительную оценку диссертации в целом.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует заявленной специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1 – 2.5 Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Работа оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, автор диссертации Романова Дарья Игоревна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

доктор технических наук,

заведующий лабораторией, главный научный сотрудник

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт

водных проблем Российской академии наук, Лаборатория численного гидродинамического моделирования

Беликов Виталий Васильевич

«5» сентября 2023 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (499) 135-54-56; e-mail: belvv@bk.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
05.23.16 – «Гидравлика и инженерная гидрология»

Адрес места работы: 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3

Подпись главного научного сотрудника ФГБУН ИВП РАН

В.В. Беликова удостоверяю:

