

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 разработке методов трёхмерного математического моделирования потоков на склонах гор. Потоки на склонах гор – снежные лавины, грязекаменные сели, быстрые оползни и другие, часто носят катастрофический характер и представляют опасность для жизнедеятельности человека. Мероприятия по защите от склоновых потоков имеют комплексный характер и состоят, во-первых, из построения карты опасных зон, во-вторых, из конструирования сооружений для организации защиты объектов, вынужденно оказавшихся в опасной зоне. Современным и мощным инструментом при разработке конкретных решений в рамках вышеперечисленных мер защиты является математическое моделирование. Растущие вычислительные возможности позволяют с каждым годом реализовывать новые все более совершенные и точные модели. Это определяет актуальность темы диссертационного исследования.

Комплексная модель склоновых потоков, предложенная автором диссертации, позволяет получить следующие данные: распределения скорости, давления, плотности и других параметров в потоке, в том числе и по глубине, с учётом турбулентного режима течения и реальной топографии местности; получить глубину разрушения потоком подстилающего материала; форму зоны лавинных отложений и карту глубин лавинных отложений. Модель разработана в виде свободного программного обеспечения (ПО) и доступна в сети интернет для использования. ПО включает в себя модуль неньютоновской реологии, позволяющий описать, в частности, остановку потока на склоне, геометрический модуль, обрабатывающий цифровую модель рельефа и

строящий расчётную сетку на её основе, модуль разрушения и захвата подстилающего материала, основанный на гипотезе о захвате, предложенной автором диссертации. Для разработки вышеперечисленных модулей проводилось исследование существующих моделей, так, например, при выборе используемой реологической модели Хершеля-Балкли проводилось исследование используемых другими учёными реологических моделей: Кросса, Бингама, Багнольда, и по результатам проведённого сравнения, и с учётом особенностей каждой из моделей была выбрана модель Хершеля-Балкли. Модуль разрушения донного материала и захвата его в движение основан на гипотезе о захвате, предложенной автором диссертации. Данная гипотеза отличается от других существующих гипотез тем, что сформулирована для трёхмерной модели, тогда как большинство существующих моделей сформулированы в рамках гидравлического подхода. Существует также гипотеза о захвате в двумерной постановке для не осреднённых по глубине уравнений, предложенная научным руководителем диссертанта, и она легла в основу настоящей гипотезы, ставшей её обобщением для трёхмерной модели со сложной геометрией дна. Все, разработанные автором диссертации модули ПО были провалидированы и исследованы на ряде природных и экспериментальных потоков.

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

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в работе, описывается степень разработанности темы, формулируются цели и задачи диссертационной работы, излагаются научная новизна, практическая значимость, методология исследования.

В **первой главе** производится обзор литературы, перечисляются существующие в настоящий момент модели склоновых потоков. Обсуждаются положительные и отрицательные стороны этих моделей и возможность их использования и усовершенствования.

Во **второй главе** формулируется новая трехмерная математическая модель плотного склонового потока, основанная на представлении склонового

потока как потока сплошной среды. Описываются такие её компоненты, как реологическая модель движущегося материала, модель турбулентности, модель захвата донного материала, а также начальные и граничные условия.

Третья глава посвящена программной имплементации предложенной модели. За основу берется открытый пакет для решения задач механики сплошной среды OpenFOAM. Автором диссертации создан решатель avalancheFoam, реализующий предложенную математическую модель. Решатель основан на методе VoF (Volume of Fluid), который используется для отслеживания положения свободной поверхности потока. Поток описывается осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса и замыкается с помощью k - ϵ или k - ω SST моделей турбулентности. Используется реологическая модель Хершеля-Балкли. Решатель также включает в себя модуль по обработке цифровой модели рельефа, генерирующий расчётную сетку. Решатель avalancheFoam разработан диссертантом под лицензией GNU GPL-3 и является свободным ПО с открытым исходным кодом. Решатель опубликован в интернете и доступен для свободного использования. В этой же главе проводится апробация разработанного решателя на расчёте реальной снежной лавины в 22-ом очаге горы Юкспор Хибинских гор вблизи города Кировска, а также на расчёте экспериментов по спуску потока в лотке с дамбами, поставленных в университете Исландии.

Четвёртая глава посвящена разработке математической и численной моделей разрушения материала дна (подстилающего материала) и дальнейшего уноса его потоком. Апробация проводится на расчёте модельной задачи о ламинарном потоке на склоне постоянного уклона, захватывающем подстилающий донный материал. При этом исследуется влияние реологических параметров потока на величину скорости захвата донного материала. Также разработанный решатель применяется для моделирования потока, возникающего при прорыве ледникового озера Малый Азау (Приэльбрусье, Кавказ). Произведенный расчёт позволил спрогнозировать опасные зоны потока, а также зоны возможного разрушения склонового материала, и построить карту глубины разрушения склонового материала.

В **пятой главе** проведена оптимизация коэффициентов k - ϵ и k - ω SST

турбулентных моделей применительно к расчетам склоновых потоков. Оптимизация осуществляется с использованием данных экспериментов по спуску турбулентного потока жидкости в лотке постоянного уклона, поставленных при участии автора в НИИ Механики МГУ. Полученные оптимизированные значения коэффициентов далее используются для расчёта эксперимента университета Исландии, что приводит к уменьшению расхождения рассчитанных и измеренных параметров потока по сравнению с результатами, полученными с использованием классических значений коэффициентов.

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

В **приложениях** дано подробное описание решателя avalancheFoam, а также комментарии и рекомендации по его использованию.

Все декларированные в диссертации результаты являются новыми. Достоверность результатов 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. Особенно следует отметить практическую значимость разработанной в диссертации численной модели склоновых потоков, применение которой было продемонстрировано в работе в рамках расчетов реальной снежной лавины в 22-ом очаге горы Юкспор Хибинских гор и при моделировании последствий прорыва ледникового озера Малый Азау.

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 хорошим языком, логично структурирована, результаты изложены достаточно ясно, рисунки и таблицы наглядно представляют соответствующую им информацию.

Тем не менее, к работе имеются некоторые замечания:

1. В некоторых разделах не достаточно подробно изложены вопросы, касающиеся выбора структуры и параметров расчетных сеток. Например, в разделе 3.5.1 говорится об использовании сетки с 1.5 млн узлов, другие характеристики сетки, визуализация сетки, информация об изучении сеточной сходимости не представлены.

2. Интересно бы было получить более обширную информацию о результатах моделирования в двух наиболее сложных примерах: реальной снежной лавины в 22-ом очаге горы Юкспор Хибинских гор и прорыва ледникового озера Малый Азау. Данные моделирования для этих двух случаев представлены в работе очень сжато. Так, в частности, в работе отмечено, что для снежной лавины получена форма зоны лавинных отложений, при этом совпадение с натурными данными составило 80% при оценке пиксельным методом. Было бы не лишним представить процедуру сравнения и проиллюстрировать результаты. Аналогично по озеру Малый Азау, по результатам моделирования прорыва которого представлен всего один рисунок с картой эрозии слоя снега водоснежным потоком, учитывая, что имеются полные трехмерные данные о движении потока.

Высказанные замечания не умаляют результатов и значимости диссертационного исследования.

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:

кандидат физико-математических наук,

доцент, старший научный сотрудник

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет".

Нуриев Артем Наилевич



«1» сентября 2023 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (843) 233-72-30; e-mail: Artem.Nuriev@kpfu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.02.05. – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Адрес места работы: 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18.

