

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»

Моделирование природных склоновых потоков – лавин, селей, быстрых оползней, является сложной и актуальной задачей в современном мире. В связи с освоением горных территорий и расширением транспортной сети возникает необходимость обеспечивать безопасность жизнедеятельности человека от катастрофических склоновых потоков. При строительстве защитных сооружений необходима информация о параметрах возможных на данном склоне потоков, таких как масса, скорость, плотность, траектория движения, сила, воздействующая на сооружение при ударе потока. Математическое моделирование позволяет получить такую информацию в отсутствие данных многолетних наблюдений и измерений реальных потоков на этом склоне.

Рассматриваемые в диссертации потоки на склонах гор относятся к классу потоков со свободной поверхностью, движущихся под действием силы тяжести. Отличительными особенностями природных склоновых потоков являются сложный рельеф склона, по которому они движутся, существенная нестационарность движения, неньютоновская реология материала потока, возможное разрушение и захват подстилающего материала, турбулентный режим течения.

В настоящее время существует много статей, книг, технических справочников, посвященных расчётам потоков со свободной поверхностью, движущихся под действием силы тяжести, что отражено в достаточно обширном списке литературы, приведенном в рассматриваемой диссертации.

Большая часть работ посвящена методам расчёта русловых потоков воды (течения в реках и каналах), причем, как правило, при математическом моделировании используются уравнения, осреднённые по глубине – уравнения гидравлики открытых потоков. В эти уравнения входит трение только на дне. Для турбулентных потоков воды оно задается членом, пропорциональным квадрату средней скорости с коэффициентом, который должен подбираться эмпирически для каждого участка русла. Важной чертой русловых потоков является размыв русла. В гидравлических моделях для расчета размыва используются эмпирические формулы, учитывающие различные механизмы переноса донного материала путем влечения по дну, взвешивания частиц донного материала в речном потоке и лавинного движения донных частиц при обрушении берегов. Большинство предложенных формул выведены для размыва потоками воды (а не потоками с более сложными реологическими свойствами) и содержат ряд эмпирических коэффициентов. Модели гидравлического типа развивались и использовались и для лавин и селей. В диссертации дается их краткий обзор. Так, например, для снежных лавин первая замкнутая модель гидравлического типа была сформулирована в работе С.С. Григоряна, М.Э. Эглит и Ю.Л. Якимова в 1967 году. К турбулентному трению на дне было добавлено сухое кулоновское трение, что дает возможность описать остановку лавины на наклонном склоне. Вовлечение лавиной лежащего на склоне снега предполагалось в этой работе происходящим только на переднем фронте, где лавина действует как бульдозер, приводя в движение впереди лежащий снежный покров. Впоследствии гидравлические модели для лавин и других потоков на склонах гор развивались разными авторами. В частности, измерения показали, что нужно учитывать распределенный захват массы, происходящий вдоль всей нижней границы потока. В настоящее время в связи с широким внедрением и доступностью компьютеров математическое моделирование потоков с использованием гидравлических моделей находит все большее применение в практике.

Два недостатка гидравлического подхода к моделированию склоновых

потоков, отмеченные в диссертации при формулировании целей диссертационной работы, состоят в следующем. Во-первых, такой подход не позволяет рассчитывать распределение параметров потока по глубине, что необходимо при вычислении сил, действующих на объекты, находящиеся на пути потока. Во-вторых, коэффициенты, входящие в формулы, определяющие донное трение и вовлечение донного материала, не связываются в этих моделях с процессами, происходящими в потоке, а должны определяться калибровкой для каждого склона. Подходы, лишенные этих недостатков, должны быть основаны на использовании полных уравнений, не осредненных по глубине потока. Построению такой модели для склоновых потоков посвящена рассматриваемая диссертация.

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 проводимых исследований, описывается научная новизна, перечисляются цели и задачи.

В **первой главе** проводится обзор литературы, описывается разработанность темы в мировой практике. Перечисляются различные существующие в России и в мире математические модели, используемые для описания склоновых и русловых потоков. Дан краткий обзор предложенных на практике реологических моделей материалов потоков разной физической природы, обсуждаются модели турбулентности, модели разрушения и захвата донного материала.

Во **второй главе** формулируется трехмерная математическая модель склонового потока с учётом неньютоновской реологии движущегося материала, турбулентного режима течения, разрушения и захвата подстилающего материала. В качестве реологической модели используется модель Хершеля-Балкли, выбор данной модели обосновывается наибольшей общностью в сравнении с моделями Бингама, Кросса и Багнольда. В качестве турбулентной модели используются классические $k-\epsilon$ и $k-\omega$ SST модели. Разрушение и захват

подстилающего материала предполагается происходящим при условии, что интенсивность сдвиговых напряжений на дне достигает порогового значения, определяемого пределом прочности донного материала. Таким образом, на дне, кроме условия прилипания, при движении с захватом донного материала ставится дополнительное условие на величину сдвиговых напряжений на дне. Это условие позволяет вычислить скорость вовлечения донного материала.

Третья глава посвящена разработке программы для проведения вычислительного моделирования склоновых потоков с использованием предложенной математической модели. Для этого за основу был взят пакет OpenFOAM на основе которого был составлен решатель avalancheFoam, включающий в себя, в том числе, модуль генерации расчётной сетки и модуль разрушения и захвата донного материала, разработанные диссертантом. Разработанная программа используется для проведения численного моделирования реальной снежной лавины на горе Юкспор в окрестности города Кировск (Хибины). Моделирование показало хорошее совпадение контура зоны лавинных отложений, полученного посредством численного расчёта и натурной. Также проведено сравнение дальности выброса лавины и средней толщины снега в зоне лавинных отложений, показавшее точность моделирования 96% и 97%, соответственно. В этой главе также проводится моделирование эксперимента, поставленного в университете Исландии, показавшее возможности разработанной программы при исследовании взаимодействия потока с защитными конструкциями.

Четвертая глава содержит в себе описание модели разрушения и захвата потоком подстилающего склонового материала и примеры моделирования и исследования потоков, вовлекающих донный материал. Формулируется условие, при котором этот процесс происходит, состоящее в том, что второй инвариант тензора сдвиговых напряжений на дне достигает порогового значения, определяемого пределом прочности донного материала. Условие такого типа, а именно, условие, что захват склонового материала потоком происходит, если касательное напряжение на дне равно пределу прочности на

сдвиг донного материала, предлагалось рядом геофизиков и было использовано в исследованиях однородных потоков на наклонной плоскости, когда осуществляется простое сдвиговое течение, в работе Д. Исслера и М. Пастора, а также в работах М.Э. Эглит, А.Е. Якубенко, Ю.С. Зайко. В диссертации предлагается обобщение этого условия на трехмерный поток на склоне со сложным рельефом, а именно, замена условия для касательного напряжения условием для второго инварианта тензора сдвиговых напряжений $I_2(\tau_{ij})$ аналогично обобщению понятия предела текучести для вязкопластических сред как предельного значения $I_2(\tau_{ij})$.

Для расчета изменяющейся границы поток-склон (из-за захвата склонового материала) используется метод VoF (Volume of Fluid), то есть, граница заменяется узкой зоной, в которой и происходит этот процесс. Формулируется математическая модель придонной зоны с введением дополнительных объёмных долей материала склона и захваченного материала и уравнений, описывающих фазовый переход материала склона в захваченный материал. В этой же главе приводятся результаты исследования влияния реологических параметров потока на скорость захвата подстилающего материала. Показано, что увеличение предела текучести, коэффициента консистенции, степенного индекса (если он больше единицы) увеличивает скорость захвата. Величина степенного индекса при значении менее единицы нетривиально влияет на скорость захвата, присутствует пороговое значение, ниже которого его влияние пропадает. Кроме того, в этой главе приведены результаты численного моделирования потока, возникающего при прорыве ледникового озера Малый Азау с учетом захвата склонового материала.

В пятой главе проводится оптимизация коэффициентов k - ε и k - ω SST моделей турбулентности применительно к расчетам склоновых потоков на основе результатов измерений, проведенных на специально созданной экспериментальной установке Института механики МГУ. Новые значения коэффициентов использованы для численного моделирования других экспериментальных потоков, исследованных в университете Исландии, при

этом результаты моделирования получились ближе к экспериментальным, чем те, которые получались с использованием классических значений коэффициентов.

В заключении подведены итоги проведённых исследований и сформулированы их основные выводы.

Специального упоминания, на мой взгляд, заслуживают следующие результаты, полученные в диссертации.

1. Разработанная программа позволяет проводить моделирование склоновых потоков с учётом всех свойств характерных для данного типа явлений: в трёхмерной постановке на реальном рельефе местности, с учётом турбулентного режима течения, неньютоновской реологии и захватом подстилающего материала.

2. Проводится обобщение гипотезы о захвате на трёхмерную модель. Исследование захвата материала по предложенной модели в двумерной задаче показало схожий характер с результатами, полученными другими авторами.

3. Проведено исследование природных потоков на склонах гор – снежной лавины и прорыва ледникового озера, показавшее хорошее совпадение полученных результатов в натурными данными. Также проведено моделирование нескольких экспериментов: университета Исландии и НИИ Механики МГУ, позволившее провести валидацию и верификацию разработанной программы, а также улучшить ряд параметров используемой модели, в том числе провести оптимизацию коэффициентов турбулентной модели.

Результаты диссертации являются достоверными, так как использовались классические математические методы механики сплошных сред и общепризнанные вычислительные методы. При проведении численных расчётов проверена сеточная сходимость, и, где это возможно, проведено сравнение результатов с аналитическими и экспериментальными данными. Все декларированные в диссертации результаты являются новыми. 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 четко. К возможным недостаткам работы я бы отнёс следующее.

1. В уравнение (2.1) входит тензор напряжений, который определяется по формуле (2.2) $\tau = \tau_m + \tau_t$, где τ_m и τ_t - тензоры вязких и турбулентных напряжений. Далее читатель должен сам догадаться, что величина τ в формуле (2.4) на самом деле определяет τ_m .

2. В трехмерных течениях в зависимости от числа Рейнольдса могут существовать области, где течения происходят в ламинарном режиме, а в остальных областях - в турбулентном режиме. В диссертации не объясняется почему применяемая расчетная модель диссертации учитывает переход из ламинарного режима в турбулентный и обратно. Число Рейнольдса в модельных уравнениях явно не фигурирует.

3. На рис.3, стр. 7 приведены противолавинные защитные сооружения в Шамони. Автор с помощью своей расчетной модели мог бы привести оценку лавины какой мощности эти сооружения сдержат. Это бы повысило ценность модели разработанной автором.

Высказанные замечания не умаляют 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:

доктор физико-математических наук,

главный научный сотрудник

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,

Лаборатория механики систем

Петров Александр Георгиевич



23
«августа» 2023 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 434-16-92; e-mail: petrov@ipmnet.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.02.05. – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Адрес места работы: 119526 Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

Подпись главного научного сотрудника ИПМех РАН

А.Г. Петрова удостоверяю:

Ученый секретарь ИПМех РАН



к. ф.-м. н.

Котов М.А.