

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Чуруксаевой Владиславы Васильевны

«Численное исследование турбулентных течений в открытых каналах и руслах
на основе модели мелкой воды»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Представленная диссертационная работа направлена на построение математических моделей и численных методов, позволяющих за разумное время и с приемлемой точностью моделировать сложные многофакторные природные процессы, такие как распространение загрязнений в речном потоке или прогноз образования заторов и вызванного ими подтопления прибрежных зон во время весеннего паводка.

С точки зрения гидродинамики решение подобных задач опирается на моделирование турбулентных течений, в том числе многофазных (вода–воздух, вода–лед–воздух и т.д.), в открытых протяженных извилистых руслах с неравномерным дном, сложной поймой, возможно, с островами и рукавами.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во введении сформулированы цели и задачи исследования, обозначена их актуальность, выделены научная новизна и значимость отдельных результатов, описаны методы исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту. Автор выносит на защиту четыре положения. Во введении отмечен личный вклад автора и апробация работы.

В первой главе описываются задачи, которые возникают при моделировании речных потоков. Пристальное внимание уделяется вопросам моделирования турбулентности, особенностям турбулентных течений в протяженных реальных руслах и сопутствующим им проблемам численного моделирования. Автор обращает внимание, что расчет естественных водоемов требует учета данных натурных исследований (карт, гидрологических данных о реке и подстилающей поверхности русла) для верификации и калибровки численных моделей, дает краткий обзор существующих в этой области пакетов прикладных программ. Глава содержит хороший обзор литературы по теме диссертации.

Во второй главе сформулирована выносимая на защиту математическая модель стационарного турбулентного течения вязкой несжимаемой жидкости в открытом русле.

В третьей главе описан численный метод решения уравнений математической модели, который включен в первое положение, вынесенное на защиту. Большая часть третьей главы содержит результаты тестирования предложенной модели и численного метода. Здесь же обсуждается сопутствующая модель переноса примеси с учетом процессов самоочищения. Результаты расчетов по представленным моделям для реки Томь – суть второе положение, выносимое на защиту.

В четвертой главе представлены новая нестационарная математическая модель двухфазного турбулентного изотермического течения смеси «вода–ледяные частицы» и численный метод, позволяющий проводить расчеты при неоднородном распределении дисперсной фазы, вплоть до полного ее исчезновения. Математическая модель и численный метод составляют третье положение, вынесенное на защиту. Здесь же представлены численные эксперименты, выполненные по предложенной модели для р. Томь, по результатам которых сформулировано четвертое положение, вынесенное на защиту.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам работы (восемь пунктов).

В списке литературы представлено 135 ссылок, которые адекватно отражают современное состояние исследований в области численного моделирования турбулентных течений в открытых руслах и сопутствующих проблем.

Далее выскажу несколько соображений и замечаний по обсуждаемому предмету.

Диссертационная работа затрагивает широкий круг проблем математического и численного моделирования в естественных потоках. Прежде всего, это проблема моделирования турбулентности. Как правильно отметил автор, современное моделирование турбулентных течений можно кратко описать тремя направлениями: а) прямое с повышенной точностью и на очень мелких сетках численное решение нестационарных трехмерных уравнений Навье–Стокса; б) более спокойное отношение к размеру вычислительной сетки для моделей пункта а) ценою использования различных «подсеточных» моделей для разрешения турбулентности масштаба меньшего, чем расчетная ячейка; в) численное решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса с каким-либо его замыканием для определения характеристик турбулентного потока.

У каждого из подходов есть свои адепты и противники, однако, практически все сходятся в том, что на современном этапе не существует модели турбулентности, хорошо отражающей реальные процессы во всех случаях. Кроме того, вряд ли найдутся желающие рассчитывать протяженные реальные течения и связанные с ними процессы с помощью подходов а) и б). Отсюда большой интерес у вычислителей к различным моделям типа в), к которым относится и предлагаемая автором модель.

Представляется, что турбулентность – существенно трехмерное явление, тем интереснее работы, анализирующие возможность турбулентного замыкания осредненных по глубине моделей, очерчивающие область их практического применения. В предлагаемой работе тщательно и всесторонне исследуется такой подход, что представляет несомненную *практическую значимость* и *теоретическую ценность*.

Выносимая на защиту математическая модель стационарного турбулентного течения вязкой несжимаемой жидкости в открытом русле построена на основе осредненных по глубине уравнений Рейнольдса в гидростатическом приближении и предположении о малом изменении характеристик потока по глубине. Для турбулентного замыкания уравнений мелкой воды применяется двухпараметрическая k - ϵ модель Расторги–Роди, построенная из известной оригинальной модели Лоундера–Сполдинга. В первой главе автор теоретически (по данным из научных публикаций) обосновывает предложенный выбор подхода для моделирования турбулентности в реальных речных потоках. В третьей главе приемлемость предложенного сочетания моделей тестируется на модельных задачах сравнением результатов расчета с экспериментальными данными.

Численный метод решения уравнений математической модели основан на конечно-объемной аппроксимации уравнений на структурированной сетке с применением метода фиктивных областей. Представлен итерационный алгоритм для разрешения нелинейности и нахождения согласованного решения уравнений движения и неразрывности. Собственно новизна заложена в модификации алгоритмов типа SIMPLE в сторону более точного учета изменения глубины потока при численном интегрировании уравнения неразрывности. Автор утверждает, что такая модификация «позволяет существенно сократить число глобальных итераций и повысить качество предсказания» (стр. 64). Если о каких итерациях идет речь понятно из предыдущего контекста главы, то, что более качественно предсказывается, не совсем ясно. К сожалению, в диссертации не приведено результатов численных экспериментов, подтверждающих это высказывание.

Большая часть третьей главы содержит результаты тестирования предложенной модели и численного метода.

Во-первых, проведены тестовые расчеты и сравнение с результатами экспериментов на лабораторных установках и расчетами в трехмерной постановке с помощью пакета ANSYS Fluent а) в открытом канале с резким поворотом и резким снижением уровня дна сразу перед поворотом; б) в открытом канале с плавным поворотом и гладким дном. Результаты показывают неплохое совпадение по скоростям и уровням свободной поверхности, но завышение кинетической энергии турбулентности в зоне возвратного течения.

В то же время, следует отметить, что попытка проверить сходимость численного метода на тесте 2 (стр. 85-86 и рис. 3.21) по графикам не очень убедительна. Не понятно, в какой норме оценивается сходимость (метод конечных объемов предполагает сходимость по норме L_1), не приведено никаких численных данных ее подтверждающих. Если сходимость уровней свободной поверхности по рисунку еще можно качественно оценить, то сходимость касательного напряжения на стенке сомнительна и, на мой взгляд, даже для ее качественной демонстрации требуется дальнейшее мельчение сетки.

Во-вторых, проведено сравнение с экспериментом и расчетами других авторов (Li&Zhang) результатов тестового расчета в открытом канале с внезапным расширением (с уступом), которое показало лучшее попадание в измеренную скорость расчетов по защищаемой модели, чем по цитируемой.

В-третьих, проведено тестирование модели на задаче распространения примеси в канале с притоком.

По результатам такого всестороннего тестирования на модельных задачах можно заключить, что рассмотренная математическая модель и численный метод вполне адекватно, без посторонних артефактов отражают поведение потоков. Кроме того, на модельных задачах проведена серия расчетов, которая показывает влияние тех или иных факторов на гидродинамику течения. Результаты этих расчетов также не противоречат наблюдениям.

Однако при обсуждении результатов тестов наряду с графиками хотелось бы увидеть больше количественных данных. Было бы также методически интересным привести сравнение результатов расчетов по моделям мелкой воды в отсутствие турбулентности.

Особый интерес в третьей главе представляют расчеты, проведенные для реальных речных потоков: а) сравнение с экспериментальными данными о параметрах турбулентного потока на небольшом участке р. Доммель, на котором русло резко меняет направление; б) моделирование турбулентного течения и переноса примеси с учетом процессов самоочищения на протяженном (21 км) извилистом участке р. Томь с тремя притоками, островами и озером на пойме. Для второго расчета была построена цифровая модель рельефа поймы и дна, оценены поля скоростей, глубин и турбулентных характеристик потока.

Интересен метод оценки качества воды, представленный в модели двумя дополнительными уравнениями: 1) конвекции-диффузии для расчета переноса примеси с учетом турбулентного перемешивания, осаждения органического вещества и обескислороживания; 2) конвекции-диффузии для расчета дефицита кислорода с учетом турбулентного перемешивания и реэрации.

Важнейшим результатом диссертации является предлагаемые новые модель и метод расчета двухфазного турбулентного течения смеси «вода – легкие частицы», которые применены для моделирования движения смеси «вода – ледяные частицы» в канале с поворотом, в том числе с образованием ледяного затора, а так же в условиях реального рельефа поймы и дна р. Томь.

К сожалению, этой теме посвящена только одна глава диссертации, содержащая описание модели и численного метода, тестовые расчеты и моделирование на реальном русле. Создается впечатление, что автор находится только в начале исследования этой интересной и перспективной тематики. Приведенные результаты тестов показывают пригодность построенных моделей и численного метода к моделированию ледовых явлений и связанных с ними процессов (например, подтопления поймы) в реальных руслах. В то же время, явно требуется продолжение тестирования.

Например, в тесте 1 главы 4 (движение смеси «вода – ледяные частицы» в канале с плавным поворотом) приведенные для сравнения графики, построенные по экспериментальным данным и расчету по обсуждаемой модели, декларируют только отдаленное качественное сходство профиля фронта слоя частиц по мере движения по каналу (рис. 4.4). Была ли возможность из доступных экспериментальных данных сравнить угол наклона фронта к радиусу или максимальное отклонение профиля фронта от соответствующего радиуса? Интересно было бы провести расчет по двухфазной модели без учета турбулентности, тем самым оценив влияние турбулентности на основные характеристики потока.

Все это не умаляет результатов, изложенных в главе 4, а лишь свидетельствует о необходимости продолжения исследования модели, ее адаптации и верификации к широкому кругу задач, которые могут решаться в рамках моделирования движения смеси «вода – ледяные частицы» в реальных руслах.

Стоит отметить также ряд замечаний технического характера.

1. В оглавлении произошел сбой нумерации – отсутствует пункт 1.4.

2. Не очень аккуратное обращение с обозначениями для компонент тензора напряжений Рейнольдса. Так, в уравнениях (1.1) на стр. 17 члены, соответствующие вязким напряжениям и напряжениям Рейнольдса, никак не обозначены и даже не прокомментированы, осреднение по времени скоростей аккуратно не введено; первое использование обозначений для напряжений в выкладках имеется на стр. 21, где они никак математически не описаны; в первом абзаце на стр. 30 компоненты тензора напряжений обсуждаются в новых обозначениях, исходя из тензорной записи для координат (x_1, x_2, x_3) вместо используемых ранее (x, y, z) с соответствующим переобозначением компонент вектора скорости (u, v, w) на (u_1, u_2, u_3) , при этом замена обозначений никак не вводится; в следующем абзаце стр. 30 – новый взгляд на обозначения через пристеночную скорость без уточнения ориентации стенки. Конечно, искушенному читателю понятно, о чем идет речь в каждом случае, но это немного портит впечатление от действительно отличного обзора моделей турбулентности в первой главе.

3. Затрудняет сравнение численных результатов в главе 3 не очень точное попадание в цвета в палитрах иллюстраций расчетов по моделям автора, с помощью пакета ANSYS и иллюстраций с данными экспериментов.

4. Как уже отмечалось, четвертая глава написана немного торопливо. Некоторые использующиеся обозначения параметров модели никак не описаны. Например, отсутствуют пояснения 1) для параметра f_i в формуле на стр. 116, описывающей силы вязкого трения, действующие на частицы со стороны несущей среды; 2) для параметра f в (4.8) на стр. 121, причем в табл. 5 на стр. 133 декларируется вариация по параметру f , обозначенному как коэффициент формы, это один и тот же параметр или нет, – остается неизвестно; 3) для параметров φ_i в описании к формуле (4.8) на стр. 121.

5. Как и в любом длинном тексте, в диссертации содержится некоторое количество опечаток.

Несмотря на указанные замечания, следует отметить положительное впечатление о работе, которая содержит добротный обзор литературы, тщательно проведенное тестирование предлагаемых моделей, решение в рамках предложенной методики широкого спектра интересных и трудоемких практических задач.

Представленная Чуруксаевой В.В. диссертация «Численное исследование турбулентных течений в открытых каналах и руслах на основе модели мелкой воды» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы» является научной квалификационной работой, в которой автором рассмотрены математические модели в длинноволновом приближении, а также приведены результаты расчетов на основе новых численных методов для однофазных и двухфазных изотермических турбулентных течений несжимаемой жидкости в открытых каналах и руслах рек. Предлагаемые модели и методы являются актуальными и практически значимыми для исследования распространения загрязнений в речном потоке и прогнозов подтопления прибрежных зон во время весеннего паводка. В целом данная работа составляет законченное научное исследование и соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а автор, Чуруксаева Владислава Васильевна, продемонстрировала хорошую квалификацию и заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент

заведующий отделом вычислительных моделей в гидрофизике обособленного подразделения – «Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук» Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», кандидат физико-математических наук (01.01.07 – Вычислительная математика), доцент

Кареева Евгения Дмитриевна

27.02.2017 г.



Адрес: 660036, Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 44,
тел.: 8 (391) 243–27–56,
сайт: <http://icm.krasn.ru>, e-mail: e.d.karepova@icm.krasn.ru

Я, Кареева Евгения Дмитриевна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Чуруксаевой Владиславы Васильевны.

Подпись Кареевой Евгении Дмитриевны удостоверяю.

Директор Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН д.ф.-м.н., профессор




В.М. Садовский