

ОТЗЫВ

официального оппонента Шеретова Юрия Владимировича о диссертации Булатова Олега Витальевича “Численное моделирование течений в приближении мелкой воды на основе регуляризованных уравнений”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Для описания течений жидкости со свободными границами широко использовались классические уравнения теории мелкой воды, называемые также уравнениями Сен–Венана. Обобщенные решения системы Сен–Венана могут иметь особенности в виде ударных волн, слабых разрывов, участков сухого дна. Это создает дополнительные трудности при их нахождении численными методами. Рецензируемая диссертация посвящена построению новых вычислительных алгоритмов решения уравнений мелкой воды в одномерном и двумерном случаях. В качестве основы при таком построении выступают так называемые регуляризованные уравнения мелкой воды, тесно связанные с исходной классической системой. Эта тема является **актуальной** по многим причинам. Предложенные явные алгоритмы обладают свойствами однородности и консервативности. Они сравнительно просты в реализации, имеют хорошую точность, допускают возможность распараллеливания, могут применяться при решении большого круга проблем, в том числе прикладного характера.

Во **введении** дан краткий обзор работ, посвященных аналитическому и численному решению задач теории мелкой воды. Обоснована актуальность избранной темы. Сформулированы цели работы. Анонсировано ее содержание по главам. Особое внимание уделено достоверности полученных результатов, их новизне, ценности для науки и практики. Имеется информация об апробации и полноте опубликования материала диссертации.

В **главе 1** выписана классическая система уравнений теории мелкой воды с учетом внешних сил и неровностей дна. Она является основной математической моделью в данной работе. Усреднением по времени из указанной системы выведены регуляризованные уравнения, на базе которых строятся численные методы. Рассмотрен упрощенный вариант регуляризованной системы при малых числах Фруда. Подробно описан вычислительный алгоритм расчета одномерных нестационарных течений. Он протестирован на задаче Римана о распаде сильного разрыва. Полученное приближенное решение сходится при сгущении пространственной сетки к известному точному решению системы Сен–Венана, которое также построено в работе. Исследовано влияние параметра регуляризации на характер решения.

Поставлена задача о стационарном транскритическом движении жидкости над неровным дном. Изучены два режима течения, как без образования гидродинамического разрыва, так и с разрывом. В первом случае распределения уровня жидкости и числа Фруда хорошо согласуются с известными аналитическими формулами. Во втором случае для получения сглаженного адекватного решения приходится вводить дополнительную схемную вязкость типа Навье–Стокса. Еще одним тестом служит задача об эволюции малого возмущения в канале с неровным дном.

Особо следует выделить пять тестовых задач о распаде сильного разрыва, расположенного над неровным дном в виде ступеньки. Результаты численных расчетов подсказали автору структуру точного решения и стимулировали его поиск аналитическими методами. Решение может быть представлено в виде комбинации волн Римана, движущихся ударных волн, неподвижных разрывов и участков постоянных значений параметров. Все пять вариантов обстоятельно проанализированы. Оценена точность используемого алгоритма.

В **главе 2** численно исследованы одномерные нестационарные течения жидкости с промежутками сухого дна. Для учета эффекта сухого дна введен дополнительный малый параметр ε . Его выбор обсужден в работе. Решена серия тестовых задач, а именно, о стационарном уровне жидкости в окрестности холма, о прорыве плотины, о симметричном растекании двух половин слоя жидкости в разные стороны, о движении периодических и одиночных волн над наклонным дном. Аккуратное сравнение с имеющимися аналитическими решениями свидетельствует об эффективности используемого алгоритма.

Вычислительные алгоритмы расчета двумерных нестационарных течений на равномерных прямоугольных сетках построены в **главе 3**. Одной из тестовых является задача о разрушении плотины в несимметричной постановке. Для нее разработан и реализован вариант алгоритма для проведения расчетов на многопроцессорной вычислительной системе, позволивший значительно ускорить работу программы. Важное прикладное значение имеет задача об отражении уединенной волны от берега сложной формы. Расчетная область в этом случае содержит изменяющиеся во времени зоны сухого дна, что создает дополнительные трудности. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, а также с расчетами другими методами. Численное моделирование волны прорыва в расширяющемся канале также имеет прикладной характер. Правильность и точность результатов подтверждается их сопоставлением с данными натурных и других вычислительных экспериментов в девяти контрольных точках.

Глава 4 посвящена обобщению алгоритма на треугольные сетки нерегулярной структуры. Подробно описана аппроксимация уравнений движения и граничных условий. Такой подход открывает новые возможности для расчета течений в областях сложной формы. Алгоритм апробирован на задаче о распаде столба жидкости. Его эффективность проиллюстрирована в задаче о разрушении плотины и затоплении поверхности с тремя конусами, где присутствуют меняющиеся во времени участки сухого дна.

В **заключении** перечислены основные результаты, полученные в работе.

Диссертационная работа содержит два приложения. В **приложении А** предложен и апробирован усовершенствованный алгоритм решения задач с сухим дном. В **приложении Б** изложены результаты расчетов одномерных нестационарных газодинамических течений с помощью алгоритма, построенного на основе квазигидродинамических уравнений.

Созданный автором комплекс программ, реализующий предложенные численные алгоритмы, был тщательно протестирован. При этом использовались средства современной компьютерной графики. Проведено детальное сравнение полученных результатов с уже имеющимися данными по многим параметрам. Это позволяет прийти к заключению о **достоверности** результатов диссертации. Перспективность использования регуляризованных уравнений мелкой воды подтверждается также теоретическими исследованиями других авторов. В теории мелкой воды такой подход применяется впервые. Ранее аналогичные схемы строились в газовой динамике и показали свою эффективность. Можно сделать вывод о том, что основные результаты диссертации являются **новыми, обоснованными, представляют ценность для теории и практики.**

Проведенные исследования поддерживались грантами РФФИ, были отмечены премией для молодых ученых в МГУ им. М.В. Ломоносова. Результаты диссертации докладывались на многих научных конференциях международного уровня, а также на семинарах. Они достаточно полно опубликованы, в том числе в журналах из перечня ВАК. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертации могут использоваться на Факультете вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М.В. Ломоносова, в Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирском государственном университете, Южном федеральном университете, ряде других организаций, где исследуются течения жидкостей со свободными границами.

В процессе изучения работы возникли следующие **замечания**:

1. Можно было бы дополнить материал работы более детальным исследованием свойств регуляризованных уравнений мелкой воды.
2. Следовало бы уделить больше внимания теоретическому обоснованию используемых алгоритмов.
3. Вопрос о включении членов с искусственной вязкостью типа Навье–Стокса при построении вычислительного алгоритма обсужден недостаточно подробно.

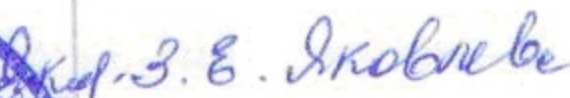
Отмеченные замечания не влияют на высокую оценку данной диссертации, которая является законченной научно-исследовательской работой и содержит новое решение актуальной научной задачи о численном моделировании течений жидкости со свободными границами с помощью вычислительных алгоритмов, построенных на основе регуляризованных уравнений теории мелкой воды. Считаю, что диссертационная работа “Численное моделирование течений в приближении мелкой воды на основе регуляризованных уравнений” удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям. Ее автор Булатов Олег Витальевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Профессор кафедры математического анализа Тверского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор

 Шеретов Ю.В.

Подпись Шеретова Ю.В.
удостоверяю:
Начальник отдела докторантуры
и диссертационных советов
Тверского государственного
университета



 З.Е. Яковлев