

ОТЗЫВ

Официального оппонента ведущего научного сотрудника «Научно-Исследовательского Московского комплекса ЦАГИ» доктора физико-математических наук Усачова Александра Евгеньевича на диссертационную работу Истоминой Марии Александровны «Численное моделирование гидродинамических структур с помощью квазигазодинамического алгоритма и создание нового вычислительного ядра в открытом программном комплексе OpenFOAM», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18-«Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

В представленной работе диссертант рассматривает возможности численного моделирования по широкому спектру задач аэрогидродинамики в рамках подхода применения численных алгоритмов решения уравнений газовой динамики, основанных на использовании предварительного осреднения, или сглаживания газодинамических величин по малому пространственно-временному интервалу. Уравнения, полученные для описания поведения таких сглаженных величин, были названы квазигазодинамическими (КГД) или регуляризованными уравнениями газовой динамики. **Актуальность темы** диссертационной работы состоит в дальнейшем развитии численных алгоритмов, основанных на КГД уравнениях, для решения задач гидро- и газодинамики, а также в обобщении КГД алгоритма на широкий круг прикладных и инженерных задач путем включения этого алгоритма в качестве нового вычислительного ядра в открытый программный комплекс OpenFOAM.

В качестве основы взят КГД подход, основанный на регуляризации систем уравнений, добавляющей к системам уравнений слагаемые, пропорциональные параметру регуляризации размерности времени. В работе автор построил новые вычислительные алгоритмы для уравнений мелкой воды с силой ветра и трением, для уравнений мелкой воды в полярной системе координат и для уравнений газовой динамики в баротропном приближении в полярной системе координат. Предложенные явные алгоритмы, использующие схемы с центральными разностями, просты в реализации, имеют хорошую точность и допускают возможность распараллеливания. КГД алгоритм оказалось возможным внедрить в качестве вычислительного ядра в открытый программный комплекс OpenFOAM, что дает существенные возможности для применения КГД алгоритма к широкому кругу задач.

Во введении описаны структура диссертации актуальность, цели и задачи работы, степень разработанности КГД подхода, теоретическая и практическая значимости и научная новизна работы, основные положения, выносимые на защиту. Представлены, также, достоверность результатов

работы, список печатных трудов автора, апробация результатов диссертации на семинарах и конференциях.

Первая глава посвящена КГД системам уравнений, выведенным ранее и системам уравнений, которые используются в качестве новых математических моделей для численного моделирования задач гидродинамики и астрофизики. КГД система уравнений мелкой воды выводится в векторном и координатном видах. Для полярной системы координат приведен вывод КГД системы уравнений газовой динамики в баротропном приближении для частного случая мелкой воды. Приведены примеры решения тестовых задач для построенных разностных алгоритмов, в частности, задачи о неподвижном гидравлическом скачке и равновесном течении.

Вторая глава посвящена численному моделированию формирования уединенной волны в кольцевом аэрогидроканале. Интерес к данной задаче связан с проблемой исследования так называемых волн-убийц, изучение процесса зарождения и формирования которых представляет на сегодняшний день существенные трудности. В рамках КГД приближения мелкой воды для плоского случая построена математическая модель, в рамках которой при определенном соотношении сил ветра и трения возможно проследить процесс зарождения и формирования одиночной волны в кольцевом аэрогидроканале. Найденный профиль волны совпадает с данными эксперимента.

Третья глава посвящена численному моделированию спирально-вихревых структур во вращающихся аккреционных дисках. В основе лежат КГД уравнения газовой динамики в баротропном приближении в полярной системе координат, для которых построен соответствующий численный алгоритм. Случай мелкой воды качественно соответствует результатам, полученным для газовых дисков. Указано, что реализованная автором программа позволяет проводить расчеты этой задачи существенно быстрее, чем предложенный ранее в литературе подход.

Четвертая глава диссертации посвящена описанию процесса внедрения КГД уравнений газовой динамики в открытый программный комплекс OpenFOAM. В OpenFOAM используется метод конечного объема, лежащий также в основе КГД подхода, что позволяет переписать алгоритм в соответствующем потоковом виде. Решатель QGDFoam сравнивался с решателем rhoCentralFoam. Для всех тестов указаны невязки и набор параметров, улучшающих решения. Данное внедрение открывает новые перспективы перед пользователями КГД алгоритма.

В приложении приведен вариант вывода КГД уравнений мелкой воды с магнитным полем для одномерного случая, в котором компоненты для магнитного поля выражаются через остальные переменные. КГД уравнения мелкой воды с магнитным полем могут быть использованы при численном моделировании процессов в солнечном тахоклине.

Структура диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения, списка литературы из 86 наименований (всего 147 стр. текста).

Научная новизна работы заключается:

1. В разработке математической модели описания процесса формирования уединенной волны в аэрогидроканале и результаты прямого численного моделирования процесса формирования такой волны под воздействием ветровой нагрузки.

2. В создании новой математической модели эволюции аккреционного диска, записанной в баротропном приближении с использованием оригинальных начальных распределений. В разработке нового численного алгоритма, построенного для этой задачи, который впервые позволил получить ее численное решение с использованием возможностей персонального компьютера за весьма малое время. Кроме того, впервые в рамках чисто гидродинамического подхода удалось получить эффект раздвоения рукавов плотности газа во вращающемся диске.

3. В создании вычислительного ядра QGDFoam в открытом программном комплексе OpenFOAM, а также сравнение вычислительного ядра QGDFoam и встроенного решателя rhoCentralFoam на примере характерных одномерных задач газовой динамики.

Практическая значимость. Результаты работы, выносимые на защиту имеют реальную практическую ценность. Данные численного моделирования для уединенной волны в кольцевом аэрогидроканале вносят существенный вклад в теорию образования волн-убийц. Результаты численного моделирования формирования спирально-вихревых структур в аккреционных газовых дисках дают вклад в понимание возможности образования рукавов плотности в рамках чисто гидродинамического приближения. Создание нового вычислительного ядра QGDFoam в открытом программном комплексе OpenFOAM расширяет возможности применения КГД алгоритма и позволяет пользователям, знакомым с КГД алгоритмом, решать свои задачи в рамках этого пакета.

Диссертация написана четко и ясно, что свидетельствует о высокой квалификации ее автора. **В качестве замечаний по работе отмечу следующее:**

1. Во второй главе диссертации не изложены принципы перенесения результатов численного моделирования одиночных волн на натурные условия.

2. В главе 3 при постановке задачи о вращающемся диске не совсем ясно, из каких соображений выбираются размеры расчетной области.

Указанные замечания не снижают высокого научного уровня представленной диссертации.

Заключение

Диссертационная работа Истоминой Марии Александровны является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Основные результаты диссертации прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях и в должной

мере отражены в научных публикациях, включая издания из перечня ВАК. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Основываясь на сказанном, считаю, что представленная диссертация по объему и глубине проработки, новизне и достоверности ее результатов соответствует квалификационным требованиям, предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям, в том числе соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Истомина Мария Александровна, безусловно заслуживает присуждения ей искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Ведущий научный сотрудник

«Научно-Исследовательского Московского комплекса ЦАГИ»

г. Москва, ул.Радио17, т.(495)916-90-91 (44-07), usachov_al@mail.ru

д ф.-м. н:

А.Е. Усачов

Подпись Ведущего научного сотрудника «Научно-Исследовательского Московского комплекса ЦАГИ» Александра Евгеньевича. Усачова удостоверяю,

Начальник «Научно-Исследовательского Московского комплекса ЦАГИ», канд. техн. наук



В.П. Соколянский