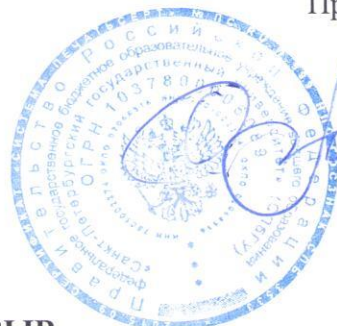


УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной
работе СПбГУ
С.В. Аплонов



«21» марта 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Марии Александровны Истоминой

«Численное моделирование гидродинамических структур с помощью квазигазодинамического алгоритма и создание нового вычислительного ядра в открытом программном комплексе OpenFOAM», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Математическое моделирование и развитие численных методов для задач гидрогазодинамики не теряет своей актуальности с течением времени. Одним из эффективных методов решения задач течений вязкого сжимаемого газа является развиваемый в институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН численный метод моделирования, основанный на использовании регуляризованных, или квазигазодинамических (КГД) уравнений. Эти уравнения формально отличаются от системы уравнений Навье-Стокса наличием дополнительных диссипативных слагаемых с малым параметром в качестве коэффициента. Соответствующие малые добавки совместно с подбором указанного малого параметра позволяют строить эффективные численные алгоритмы для решения различных задач динамики газа при использовании, например, условно устойчивых явных разностных схем. **Актуальность** темы исследования состоит в развитии и применении КГД алгоритма для решения современных задач гидродинамики и астрофизики, а так же для обобщения алгоритма на широкий круг прикладных задач с помощью внедрения КГД в открытый программный комплекс OpenFoam.

Диссертационная работа Истоминой М. А. посвящена построению новых вычислительных моделей для двух задач гидродинамики с использованием КГД алгоритма и существенному развитию указанного подхода путем включения его в широко известный открытый программный комплекс OpenFOAM.

Содержание диссертации:

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, приложения и списка литературы, включающего в себя 86 наименования. Объем диссертации составляет 147 стр.

Во введении описаны актуальность, цели и задачи работы и другие формальные аспекты работы.

В первой главе приведены варианты записи КГД уравнений для задач газовой динамики для различных вариантов уравнения состояния, включая баротропное приближение. В качестве примера приведен выполненный автором способ построения КГД уравнений для конкретного вида баротропных уравнений (пп. 1.2.1, 1.2.2). Выписаны построенные

автором варианты КГД уравнений в полярной системе координат. Описан способ построения разностного алгоритма и примеры решения тестовых задач о неподвижном разрыве и о равновесном течении.

Вторая глава посвящена описанию построенной автором в рамках приближения мелкой воды математической модели, позволяющей провести прямое численное моделирование возникновения и развития одиночной волны в ветро-волновой установке. Следует отметить большое количество расчетов, выполненных автором для определения параметров ветровой нагрузки и коэффициента трения, позволяющих получить адекватное эксперименту численное решение (табл. 2.1, с. 55).

В третьей главе выписанные автором КГД уравнения в полярной системе координат и численный алгоритм их решения используются для прямого моделирования многорукавных структур в аккреционном диске. В параграфе 3.1 строится математическая модель этого явления с использованием баротропного приближения уравнений Эйлера. При этом данная модель обобщает и усовершенствует имеющуюся в литературе математическую постановку этой задачи, а именно, расширяет точное решение равновесной задачи на случай $\gamma=1$ и уточняет переход от трехмерной постановки к двумерной (параграф 3.1). Написанная автором программа позволяет проводить расчеты этой задачи в десятки и сотни раз быстрее, чем предложенный ранее в литературе подход. Проведенные расчеты демонстрируют формирование многорукавных структур, эффект расщепления рукавов от центра к периферии диска, а также адекватность известной аналогии «мелкой воды» для изучения задачи об аккреционном диске.

В четвертой главе диссертации описан способ и приведены первые результаты включения разработанного ранее алгоритма решения уравнений динамики вязкого газа, основанного на КГД уравнениях, в открытый программный комплекс OpenFOAM. С этой целью имеющийся разностный алгоритм был переписан автором в терминах, принятых в современной версии открытого пакета, создана соответствующая программа на языке C++ и полученный модуль оформлен в виде дополнительного вычислительного ядра в пакете OpenFOAM, который получил название QGDFoam. Данное ядро протестировано автором на примере набора одномерных тестов, результаты которых описаны в параграфе 4.3 и сопоставлены по точности с результатами, полученными на основе решателя rhoCentralFoam. Данная работа открывает новые перспективы для широкого использования КГД алгоритмов решения уравнений газовой динамики и для расширения возможностей самого открытого комплекса.

В приложении, завершающем работу, приведены начатые автором исследования совместного численного решения уравнений мелкой воды и уравнений магнитной газовой динамики. Данный подход планировался для решения задач, связанных с описанием солнечных пятен.

Результаты, представленные в диссертации, являются **новыми**. Впервые построена новая модель описания процесса формирования уединенной волны в аэрогидроканале, а также математическая модель эволюции аккреционного диска. Реализован вычислительный алгоритм расчета по предложенным моделям.

Достоверность полученных результатов обоснована сопоставлением их с аналитическими расчетами и экспериментальными данными. Произведено сравнение

расчетов в рамках КГД подхода задачи о распаде произвольного разрыва с аналитическим решением.

Теоретическая значимость работы заключается в построении новой математической модели для описания эффекта формирования уединенной волны в гидроканале и построении соответствующего аналитического решения. В работе получены КГД уравнения в полярной системе координат и предложена разностная схема для их решения. Результаты численного моделирования уединенной волны в гидроканале вносят существенный вклад в теорию образования аномально больших волн. Результаты численного моделирования формирования спирально-вихревых структур в аккреционных газовых дисках вносят вклад в понимание возможности образования рукавов плотности в рамках гидродинамического приближения. **Практическая ценность** результатов состоит в реализации разработанных алгоритмов в открытый программный комплекс OpenFoam. Полученные автором результаты представляют интерес для организаций, занимающихся численным моделированием широкого круга газодинамических задач. Среди многочисленных организаций, занимающихся такой тематикой, укажем Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (С-Петербург), институт проблем механики РАН (Москва), институт механики МГУ (Москва), кафедру физики моря и вод суши физического факультета МГУ, институт космических исследований РАН (Москва), институт вычислительной математики РАН (Москва), институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск), Южный федеральный университет, (Ростов-на-Дону), вычислительный отдел Центра гидравлических исследований ОАО "НИИЭС" РусГидро (Москва), институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (Новосибирск).

Вместе с тем работа не лишена определенных недостатков, и у нас по ней есть следующие **замечания**:

1. В формулах 1.51, 1.54, 1.57 – 1.60 в правой части опущены частные производные. Вероятно, это опечатка, и далее (в уравнении 1.61) производные присутствуют, но это несколько затрудняет понимание цепочки выкладок.
2. На стр. 28 указано, что в формулах 1.70 – 1.71 приведена КГД система уравнений мелкой воды с плоским дном в отсутствии внешних сил и тензора Навье-Стокса. Ниже на этой же странице сказано, что Π_{xx} является тензором вязких напряжений, что, видимо, является опечаткой. Вероятно, этот член является диссипативной добавкой, связанной с выводом КГД-версии уравнений.
3. В главе 4 представлена реализация явной схемы для одномерной нестационарной КГД-версии системы уравнений Эйлера. В работе остался нераскрытым вопрос о пределах устойчивости такой схемы. Было бы полезно привести реализацию КГД схемы для простейшего гиперболического уравнения переноса, показать условия устойчивости схемы, изучить диссипативные свойства схем методами на базе первого дифференциального приближения.

Указанные замечания в целом не снижают положительного впечатления о диссертации. Работа выполнена на высоком уровне, свидетельствующем о квалификации автора.

Диссертационная работа Истоминой М. А. является законченной научно-квалификационной работой, вносящей заметный вклад в развитие вычислительной гидромеханики. Основные результаты работы в достаточной мере отражены в публикациях и изданиях из перечня ВАК (6) и прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях и семинарах (10). Работа ясно изложена и хорошо оформлена. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842. Автор – Истомина Мария Александровна – заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры гидроаэромеханики Санкт-Петербургского государственного университета 20 марта 2018 г., протокол № 1.

Карпенко Антон Геннадьевич
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры гидроаэромеханики
Санкт-Петербургского государственного университета

А.Г. Карпенко

Куцова Елена Владимировна
доктор физико-математических наук,
доцент, профессор кафедры гидроаэромеханики
Санкт-Петербургского государственного университета
198504, Санкт-Петербург
Университетский пр., д. 28
(812) 428 49 11
e.kustova@spbu.ru

Е.В. Куцова



20. 03. 2018