

ОТЗЫВ

официального оппонента **Бабакова Александра Владимировича** 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

Актуальность темы выполненной работы

Актуальность темы диссертационной работы состоит в развитии и применении КГД алгоритма для решения актуальных задач гидродинамики и астрофизики, а также для обобщения алгоритма на широкий круг прикладных задач с помощью внедрения КГД алгоритма в открытый программный комплекс OpenFOAM.

Оригинальный КГД алгоритм, разрабатывающийся в стенах ИПМ им. М.В. Келдыша РАН в течение 30 лет, сглаживает уравнения газовой динамики по малому пространственно-временному интервалу. Такой подход позволяет решать задачи математического моделирования летательных аппаратов при до- и сверхзвуковых скоростях полета, задачи экологии, включая задачи описания течений в акваториях морей и океанов, задачи, связанные с исследованиями астрофизических газовых объектов и многие другие, перечень которых огромен.

В настоящее время повышенное внимание уделяется возможностям параллельной реализации газодинамических алгоритмов на современных высокопроизводительных комплексах. Встроенный в OpenFOAM КГД алгоритм позволяет это сделать.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы. Общий объем работы 147 страниц, 33 рисунков на страницах и по тексту, 4 таблиц по тексту, список литературы на 10 страницах, включающий 86 наименований.

Во введении обоснована актуальность исследования, указана степень разработанности темы, определены цели и сформулированы задачи исследования, приведены методы исследования и степень разработанности темы, описана новизна темы исследований, представлены положения, выносимые на защиту, и степень достоверности результатов исследований.

Первая глава посвящена описанию основных систем уравнений, использующихся в работе. Приведены КГД уравнения газовой динамики, приведены выводы уравнений мелкой воды, в том числе в полярной системе координат. Приведены характерные тесты для построенных систем.

Вторая глава посвящена прямому численному моделированию образованию уединенной волны в кольцевом аэрогидроканале. Построена одномерная плоская математическая модель, включающая силы ветра и трения. Для численной реализации используется регуляризованная система уравнений мелкой воды. В результате серии численных экспериментов найдено соотношение между силой ветра и силами трения, при выполнении которого образуется уединенная волна. Построен аналитический профиль волны, соответствующий натурному и численному экспериментам.

Третья глава содержит результаты по прямому численному моделированию формирования спирально-вихревых структур во вращающихся аккреционных дисках. Была показана чисто гидродинамическая природа формирования рукавов плотности с раздвоением и переносом углового момента к центру.

Четвертая глава содержит результаты по внедрению КГД алгоритма в открытый программный комплекс OpenFOAM в виде ядра, названного QGDFoam. Приведены результаты расчета характерных одномерных тестов, выполненных решателями QGDFoam и rhoCentralFoam. Приведены невязки полученных решений.

В заключении формулируются основные результаты диссертационной работы.

Степень обоснованности и достоверности

Автором корректно выведены КГД уравнения для систем уравнений МВ и уравнений газовой динамики в баротропном приближении в полярной системе координатах.

В ходе численного моделирования образования уединенной волны в кольцевом аэрогидроканале в результате серии численных расчетов автором получено соотношение между силой ветра и силами трения. Автор находит подтверждение факту образования уединенной волны в кольцевом аэрогидроканале с помощью построения аналитического профиля волны. Найденное ограничение на скорость ветра и тормозящие силы в ходе численных экспериментов хорошо согласуются с условием, выведенным при нахождении аналитического профиля волны. Обоснованность результатов, выдвинутых соискателем, основывается на согласованности данных натурального и численного эксперимента, а также согласуется с аналитическим исследованием.

Автором решается задача о формировании спирально-вихревых структур во вращающихся аккреционных дисках, предложенная и решенная ранее астрофизическая задача (в работах В.М. Чечеткина и А.Ю. Луговского) в рамках полных уравнений газовой динамики. Достижения развития спирально-вихревых структур у указанных авторов удалось повторить в

рамках баротропного приближения уравнений газовой динамики в чисто гидродинамическом приближении.

В работе диссертанта грамотно используется математический аппарат для переписывания системы уравнений газовой динамики для вида, необходимого для написания программного кода для внедрения КГД алгоритма в открытый программный комплекс OpenFOAM.

Научная новизна полученных результатов

В диссертационной работе получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

уравнения мелкой воды в плоском одномерном случае с силами ветра и трения являются новой математической моделью, позволяющей провести прямое численное моделирование процесса формирования уединенной волны в кольцевом аэрогидроканале (пункт 2.2);

КГД алгоритм был расширен на случай полярной системы координат для уравнений мелкой воды (пункт 1.3.2) и баротропного приближения системы уравнений газовой динамики (пункт 3.2). Возможность использования нового численного алгоритма позволила рассматривать задачи в кольцевой геометрии для аккреционных дисков. Была построена новая математическая модель развития спирально-вихревых структур во вращающихся газовых дисках, использующая КГД уравнения газовой динамики в баротропном приближении (пункт 3.1). Начальные условия при этом строго согласованы между собой, а начальное возмущение сглажено по радиусу. При этом использование персонального компьютера не требует дополнительного распараллеливания в виду малого времени расчета. Эффект раздвоения рукавов плотности впервые получен в рамках гидродинамического подхода (результаты численного моделирования в пункте 3.4);

новым является внедрение КГД системы уравнений газовой динамики без внешних сил и источников с уравнением состояния для идеального газа в

виде программного модуля или вычислительного ядра, в программный комплекс OpenFOAM (4 глава, пункт 4.2). Вычислительное ядро, названное QGDFoam, сравнивается со встроенным ядром rhoCentralFoam на примере задач Римана (пункт 4.3, таблица 4.1) и задачи Вудворда-Колелла (пункт 4.3, тест 8).

Замечания по диссертационной работе

1. В первой главе в тексте работы недостаточно ясно сформулированы предположения, используемые при выводе уравнений гидродинамики в так называемом приближении мелкой воды, а именно, касающиеся условия несжимаемости среды.
2. Во второй главе при описании математической модели для прямого численного моделирования формирования уединенной волны в аэрогидроканале следовало пояснить физический смысл введенных автором сил ветрового напряжения и силы трения, которые в значительной мере определяют процесс.
3. В рассматриваемой автором постановке при моделировании спирально вихревых структур во вращающихся газовых дисках должен выполняться закон сохранения импульса, не входящий в систему основных уравнений. Желательно контролировать выполнение этого закона для всей области интегрирования в эволюционном расчете.

Считаю, что отмеченные выше недостатки принципиально не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение

Диссертационная работа Истоминой Марии Александровны посвящена актуальным вопросам математического моделирования гидродинамических структур и внедрению КГД алгоритма в открытый программный комплекс OpenFOAM. Она выполнена на хорошем научном уровне и является законченным научно-квалификационным исследованием. Научная новизна

основных результатов диссертации высокая. 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.

Работа «Численное моделирование гидродинамических структур с помощью квазигазодинамического алгоритма и создание нового вычислительного ядра в открытом программном комплексе OpenFOAM» удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Истомина Мария Александровна, безусловно заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Главный научный сотрудник, зав.отделом,
руководитель научного направления

д.ф.-м.н.



/Бабаков А.В./

20.03.2018

Подпись А.В. Бабакова заверяю

Ученый секретарь

к.ф.-м.н.



/Сызранова Н.Г./