ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Крюкова Юрия Александровича «Разработка методов математического моделирования ламинарных течений вязкой несжимаемой жидкости в слое с межфазной границей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Актуальность работы

В настоящее время к инструментарию исследователей, занимающихся математическим моделированием течений вязкой жидкости, добавляются удобные и мощные по своему функционалу пакеты математического моделирования физических явлений (Fluent, Flow3d, CFX, FlowVision и др.). Как правило, общий подход при моделировании в пакетах заключается в следующем: исследователь самостоятельно создает геометрическую и сеточную модели области, в которых моделируется интересующий физический процесс или явление, затем из готового перечня выбираются уравнения, задаются граничные и начальные условия, задача решается в обозначенной области по готовому, реализованному в программах, численному алгоритму. Таким образом, если до широкого распространения вычислительных пакетов, известную триаду академика Самарского «модель-алгоритм-программа» исследователю приходилось, как правило, создавать самому, то благодаря специальному программному обеспечению, создание этой триады во многом происходит автоматически.

Главное математическое преимущество вышеперечисленных программных пакетов – использование уравнений Навье-Стокса и, следовательно, возможность моделирования в них «физически полноценных» (в рамках этих уравнений) явлений. Вместе с тем, одним из главных вопросов, с которым приходится сталкиваться исследователю при использовании этих программ, является скудно представленная в литературе методическая база по решению задач, и необходимость в подтверждении достоверности полученных результатов.

Подтверждением достоверности полученных в программном пакете результатов может служить сравнение их с результатами приближенного моделирования (когда физический процесс моделируется с учетом только основных с точки зрения исследователя параметров, на него влияющих). Таким образом, вопросы интеграции, сопоставления разных инструментов, доступных для математического моделирования вязкой жидкости, являются, несомненно, актуальными, а именно этим проблемам и посвящена диссертационная работа Крюкова Ю.А.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертационная работа изложена на 143 страницах и включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы из 166 наименований (на 19 страницах), приложения (А–Ж на 29 страницах). Структура работы отражает содержание диссертации и основные результаты. Разделы работы находятся в логическом единстве, изложены последовательно и грамотно.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертационной работы, определяется новизна исследования, выделяются выносимые на защиту результаты исследования, описывается их теоретическая и практическая значимость.

В первой главе анализируются научные публикации последних лет, посвященные теоретическому и экспериментальному исследованию течений в замкнутых полостях, частично или полностью заполненных жидкостью, в тонких слоях (пленочных течений вязкой жидкости), а также связанные с изучением аэрогидродинамических сил, действующих на сферическое тело, помещенное в поток жидкости; формулируются цель диссертационной работы и задачи научного исследования.

Во второй главе автором предлагаются методы математического моделирования для исследования процесса контроля расходования топлива в баке ракеты-носителя. Особенностью этого процесса является рассогласование уровней свободных поверхностей жидкости в баке и в цилиндрическом канале-уровнемере (по показаниям уровнемера оценивают уровень жидкости в баке), которое наблюдается в реальных условиях.

В пакете Ansys Fluent автором в расчетной области (которая, для экономии ресурсов, представлена с учетом предположения о симметрии течения) построена блочная структурированная гексаэдрическая сетка. Для исследования процесса им применяется модель «Volume of fluid», реализованная в пакете для моделирования свободной поверхности течений нескольких неперемешивающихся сред. Модель основана на решении уравнения Навье-Стокса, которое является общим для всех рассматриваемых фаз и зависит от них через теплофизические свойства, уравнение неразрывности записывается отдельно для каждой фазы. Также в главе автором предлагаются разработанные им лично приближенные (основанные на одномерном уравнении парабалического типа) методы моделирования этого динамического процесса для двух различных конфигураций уровнемера (с удлинителями и без них) – квазистационарный (в котором напряжение трения такое же, как и при стационарном течении) и нестационарный. Для моделирования нестационарного течения автор развил метод конечных разностей: построил схему и алгоритм ее решения, которую запрограммировал в пакете Maple. Логическим завершением главы являются результаты вычислительных экспериментов по представленным автором разным методам (хорошо совпадающим между собой), которые позволяют сделать ему заключение о колебательном характере изменения уровня свободной поверхности в уровнемере относительно уровня в баке.

В третьей главе диссертант проводит математическое моделирование двухсредного неперемешивающегося пограничного слоя на плоской пластине. Вначале он разрабатывает собственный метод, для которого распространил теорию пограничного слоя. Автор разделяет задачу на внутренную (для тяжелой жидкости) и на внешнюю (для легкого газа), получая таким образом сопряженную задачу. В силу малости толщины тонкого слоя кривизной межфазной границы пренебрегается. Для поиска решения внутреннего пограничного слоя автор развил приближенный аналитический метод (решение задачи раскладывается в асимптотический ряд), для решения внешнего пограничного слоя – метод конечных разностей. Задачи решаются с помощью последовательных приближений – внутренний

пограничный слой решается с учетом функции напряжения трения, полученной из решения внешнего пограничного слоя, который, в свою, очередь, решается с учетом функций скорости на межфазной поверхности, полученных из решения внутреннего пограничного слоя на предыдущей итерации. Автором представлен алгоритм решения сопряженной задачи, который реализован им в пакете Maple.

Далее в главе описывается метод решения задачи двухсредного пограничного слоя в пакете Ansys Fluent. Автор сочетает уравнение Навье-Стокса для описания внешнего пограничного слоя с моделью «Eulerian Wall Films», описывающей течение тонких слоев.

Глава завершается вычислительным экспериментом по приведенным методам – результаты моделирования хорошо согласуются между собой, что подтверждает их адекватность, и позволяют утверждать автору о том, что напряжение трения двухсредного пограничного слоя меньше напряжения трения односредного пограничного слоя, разница сильно варьируется от параметров задачи.

Четвертая глава посвящена математическому моделированию движения тяжелой сферической частицы в односредном пограничном слое газа на плоской пластине. Разработанный автором метод моделирования заключается в постановке краевой задачи, описывающей движение частицы по уравнению ее центра масс. При этом учитываются силы, действующие, по мнению автора, на частицу – инерции, тяжести, аэродинамического сопротивления и Сэфмана. Частица не деформируется, не вращается, не изменяет свою массу. Разработана компьютерная программа в среде Maple для реализации изложенного в работе алгоритма решения краевой задачи.

Постановка задачи в пакете Ansys Fluent является оригинальной: строится криволинейная трехмерная область, где будет двигаться частица, на границах задаются условия, соответствующие решению задачи Блазиуса. Используется подход динамически-перестраивающейся сетки и применяется модель «6DOF», которая нужна для перемещения частицы (перемещение частицы происходит на основе анализа приложенных к ней массовых и поверхностных сил, получаемых решателем численным интегрированием

напряжений, распределенных по поверхности частицы во время движения). Сравнение результатов вычислительных экспериментов, полученных по авторскому методу и по методу в пакете Ansys Fluent подтверждает выбранную автором систему активных сил, действующих на частицу.

Степень новизны и обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

К числу новых научных результатов, лично полученных автором данной работы, следует отнести:

1. Метод математического моделирования процесса рассогласования уровней свободных поверхностей в уровнемере (двух видов – с удлинителями и без них) системы управления расходованием топлива в баке ракеты-носителя. Метод позволяет прогнозировать колебания уровня свободной поверхности, вызванные инерционностью жидкости и затухающие вследствие действующих на нее сил вязкости в уровнемере.

2. Метод математического моделирования двухсредного пограничного слоя, разработанный автором в рамках теории пограничного слоя. Метод позволяет получать характеристики двухсредного пограничного слоя (поле скоростей, трение) в зависимости от трех параметров задачи – чисел Рейнольдса внутреннего и внешнего пограничных слоев и угла наклона пластины.

3. Развитые автором диссертационной работы

– аналитический приближенный метод для решения краевой задачи внутреннего пограничного слоя (позволивший записать решение в готовом для применения виде с учетом переменного межфазного трения на верхней границе, что отличает его от известных);

– метод конечных разностей для краевой задачи внешнего пограничного слоя (позволивший найти численное решение его характеристик – поле скорости и верхнюю границу – из выведенной автором замкнутой оригинальной системы интегро-дифференциальных уравнений);

– метод конечных разностей для краевой задачи с интегро-дифференциальным уравнением параболического типа (отличающийся выбранными автором итерациями для «разрешения нелинейности») для

поиска характеристик течения вязкой жидкости в уровнемере системы управления расходованием топлива в баке ракеты-носителя.

4. Автор диссертационной работы самостоятельно разработал алгоритмы решения (численные – для решения краевых задач конечно-разностным методом, приближенный – для задачи внутреннего пограничного слоя) для всех представленных в диссертации методов математического моделирования.

5. Разработан комплекс программ для реализации представленных в диссертации алгоритмов решения краевых задач в среде Maple, позволяющий существенно (на несколько порядков) сократить время вычислительных процедур без потери точности решения.

Достоверность и обоснованность научных положений, сформулированных в диссертации, подтверждается корректностью применяемых моделей механики сплошной среды и используемых допущений при разработке методов математического моделирования, а также хорошим согласованием численных результатов, полученных с помощью разных методов математического моделирования и сравнением численных решений рассматриваемых краевых задач с известными аналитическими результатами в частных случаях.

Основные материалы диссертации опубликованы в 14 научных работах (в том числе 4 в статьях рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 2 в статьях из библиометрической базы Scopus) и материалах международных и всероссийских конференциях. Автором работы получено 1 свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

Полученные диссертантом результаты имеют теоретическое и практическое значение. С теоретической точки зрения – в части новых математических моделей, описывающих движение в слое вязкой несжимаемой жидкости с межфазной границей, в форме обыкновенного дифференциального уравнения, интегро-дифференциальных уравнений в частных производных, приближенных аналитических и численных методов

решения краевых задач с межфазной границей, методике исследования характеристик течений.

С практической точки зрения – в части создания алгоритмов и программ на их основе для моделирования и исследования ламинарных течений вязкой несжимаемой жидкости в слое с межфазной границей.

Кроме того, результаты работы могут быть использованы в высших учебных заведениях при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Фундаментальная математика и механика», «Прикладная математика и информатика», «Механика», «Теплоэнергетика и теплотехника», «Трубопроводный транспорт» и другим родственным направлениям.

Апробация работы

Работа носит теоретико-прикладной характер, ее основные результаты достаточно полно изложены в научных работах, включающих в себя и ряд публикаций в реферируемых журналах, в том числе включеных в перечень рекомендованных ВАК изданий. Основные результаты диссертационной работы представлены на международных и всероссийских симпозиумах и конференциях. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что основные результаты диссертационной работы Крюкова Ю.А. в достаточной мере опубликованы и апробированы.

Соответствие диссертации и автореферата

Диссертация и автореферат написаны ясным и понятным научным языком. Содержание диссертации достаточно полно, подробно и исчерпывающе раскрывает постановку, методы и результаты решения рассмотренных задач. Автореферат, в целом, отражает содержание диссертации. Оформление диссертации и автореферата в основном соответствует существующим требованиям.

Личный вклад автора диссертации

Судя по библиографическому списку, по изложению материала самой диссертации можно сделать вывод о значительном личном вкладе автора диссертации. Содержание работ, выполненных Крюковым Ю.А. лично,

создает благоприятное впечатление своей актуальностью и законченностью. Программный комплекс, разработанный автором, готов к применению на практике.

Замечания по работе

1. Считаю, что закон стационарного трения в задаче о колебаниях можно было модифицировать (доработать), учитывая в нем вклад, который вносит местное сопротивление (например, сопротивление датчиков уровня или граничные эффекты).

2. Из материалов, представленных в третьей и четвертой главах, непонятно, как контролировалась сходимость решения задач, выполненных в Ansys Fluent (в отличии от второй главы, где решение представлено на разных по количеству ячеек сетках – рис. 2.11 на стр. 47 или на рис. 2.18 на стр. 53).

3. Во второй и в третьей главах проводится теоретическое априорное исследование предложенных автором нелинейных разностных схем, причем исследуются на устойчивость их линеаризованные варианты. Зачем, ведь это совершенно разные схемы?

4. При анализе результатов в четвертой главе (стр. 91) сказано, что количественное рассогласование результатов объясняется спорным вопросом о величине и направлении силы Сэфмана. Необходимо пояснить данный вопрос.

5. Часть третьей главы диссертации (где речь идет о внутреннем пограничном слое) загромождена подстрочными индексами: для обозначения внутреннего пограничного слоя используется индекс «1», при этом, этот же индекс используется для обозначения решения первого приближения этой задачи. Это вызывает трудности для восприятия содержания работы. Сложности восприятия касаются и второй главы. Для одних и тех же понятий используются разные названия («вертикальный цилиндрический канал», «внутренняя область», «уровнемер» или «топливный бак», «двусвязная полость», «внешняя область»).

6. На каком основании в левой части уравнения движения (2.1) на стр. 30 отсутствует слагаемое $u\frac{\partial u}{\partial x}$, учитывалось ли его влияние в ходе получения решения рассматриваемой задачи?

7. Непонятно, что служит импульсом (движущей силой) в краевой задаче (2.9) на стр. 33, если начальное и граничные условия заданы равными нулю?

8. Каким образом можно объяснить искривление профилей скорости в области G_{us} на рис. 2.17 стр. 52, причем максимум кривой скорости наблюдается сначала в нижней части канала, а затем смещается наверх?

9. Во втором выводе ко второй главе написано: «причиной колебаний уровня свободной поверхности в канале является инерционность вязкой жидкости», что вызывает вопрос – не связано ли это, в первую очередь, с градиентом давления в жидкости и, уже во вторую, – с инерционностью?

10. На стр. 84 в уравнениях краевой задачи (4.1), моделирующих движение частицы в пограничном слое отсутствует слагаемое (первая производная по времени от искомой функции), учитывающее сопротивление среды.

Заключение

Указанные недостатки не снижают научной и практической ценности работы Крюкова Ю.А. По значимости поставленных и решенных задач диссертационная работа «Разработка методов математического моделирования ламинарных течений вязкой несжимаемой жидкости в слое с межфазной границей» является научно-квалифицированной работой, выполненной автором самостоятельно, в которой содержится постановка и решение ряда новых задач, описывающих ламинарное течение вязкой несжимаемой жидкости, имеющих важное прикладное значение при исследовании этих течений в слое с межфазной границей. Работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» и удовлетворяет требованиям ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы

программ», и ее автор Крюков Юрий Александрович заслуживает присуждения ему степени кандидата технических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент:
доцент кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика»
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара,
кандидат технических наук (05.13.18), доцент — Кудинов Игорь Васильевич

Подпись Кудинова Игоря Васильевича заверяю:
секретарь ученого совета
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара,
доктор технических наук
08 мая 2018 г. — Ю.А. Малиновская

Полное название организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Тел. +7(846) 332-42-35; e-mail: igor-kudinov@bk.ru