

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Кагенова Ануара Магжановича
«Математическое моделирование взаимодействия сверхзвуковых многоблочных струй посадочного модуля с поверхностями», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность темы диссертации

Актуальность исследования сверхзвуковых многоблочных струй обусловлена широким их применением для самых разнообразных областей науки и техники (машиностроительной, ракетно-космической, авиационной и т.д.). Поэтому изучению газодинамики струйных потоков уделяется весьма серьезное внимание, и к настоящему времени, начиная с 60-х годов 20 века, выполнено значительное количество экспериментальных и теоретических работ. Сформировался ряд газодинамических научных школ, которые работают над обширными практически важными классами струйных течений. Ежегодно проходят научные конференции по различным их аспектам. Тем не менее, дальнейшие исследования особенностей структур струйных течений позволят более полно изучить динамику изменения локальных газодинамических параметров и интегральных величин и применить полученные результаты для развития науки и различных технологий.

В связи с этим, тема диссертационной работы «Математическое моделирование взаимодействия сверхзвуковых многоблочных струй посадочного модуля с поверхностями» является весьма **актуальной** для оптимального управления тормозной двигательной установкой и уменьшения возможных рисков при посадке космических аппаратов на поверхность планет с разреженной атмосферой.

Общая характеристика структуры и содержания диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка условных обозначений и сокращений, списка использованных источников и литературы и приложений. Общий объем работы составляет 155 страниц, включая 7 приложений, список использованных источников и литературы насчитывает 143 наименования.

Во введении сформулированы цель и задачи исследования, обозначена актуальность, обоснованы степень достоверности результатов, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрено современное состояние теоретических и экспериментальных работ, посвященных взаимодействию одиночных и многоблочных сверхзвуковых струй с твердыми непроницаемыми преградами. Диссертант отмечает проблемы недостаточности исследований многоблочных струйных течений при натекании на поверхности.

Приводятся основные работы, посвященные изучению эффекта «lift loss» для самолетов вертикального взлета и посадки. Диссертант обращает внимание, что исследований данного эффекта для посадочных платформ в условиях других планет ранее не проводилось.

Далее описаны свойства грунтов Марса и их характеристик в зависимости от места посадки, на основании данных предыдущих марсианских миссий. В дальнейшем соискатель использовал данную информацию для проведения оценок возможной эрозии грунта Марса в результате натекания струй посадочной платформы на место посадки.

В конце главы анализируются достоинства и недостатки современных пакетов прикладных программ применимые для решения этих задач. На основе обзора, приводится обоснование выбора программных платформ с открытым исходным кодом.

Во второй главе сформулированы физическая и математическая постановки задач. В физической постановке рассматривается течение продуктов сгорания гидразина в соплах тормозных двигателей и истекающих недорасширенных струях при их взаимодействии с поверхностями посадки и посадочного модуля. Показано, что многоблочные струи являются трехмерными, турбулентными.

Математическая постановка основана на уравнениях Навье-Стокса. Рассмотрены три основных подхода для решения этих уравнений. Это метод прямого численного моделирования, метод моделирования крупных вихрей и метод моделирования на основе осредненных по Рейнольдсу или Фавру уравнений Навье-Стокса. Соискателем проводится анализ достоинств и недостатков каждого метода, применительно к поставленной задаче, и на его основе выбран подход, основанный на осреднении по Фавру уравнений Навье-Стокса. Для замыкания системы уравнений используются два уравнения модели турбулентности *SST k- ω* . В конце главы сформулированы начальные и граничные условия задачи.

В третьей главе представлены численные методы и вычислительный алгоритм для реализации сформулированной задачи. Используется метод контрольных объемов для решения задачи на неструктурированных расчетных сетках. Для интегрирования по времени применяется четырехшаговый метод Рунге-Кутты второго порядка точности. В работе выбрана схема MUSCL-Hancock с ограничителем van Leer типа TVD, а определение потоков на гранях ячеек осуществляется по трехволновой HLLC схеме.

Значительную часть главы занимает описание вычислительного комплекса и его применения. Автором создана трехмерная модель, описывающая элементы конструкций посадочного модуля на платформе САПР Salome с привлечением разработанных программ на языке Python. Построение расчетной сетки произведено с использованием алгоритма автоматического генератора тетраэдральных сеток NetGen. Вычислительная часть комплекса основана на решателе dbnsTurbFoam из состава пакета OpenFOAM-Extended с использованием стандарта MPI, методом декомпозиции расчетной области. Определено оптимальное количество подобластей в зависимости от числа контрольных объемов в расчетной области. Для обработки результатов расчетов использовалась программа ParaView, которая была собрана для работы в многоуровневой архитектуре «клиент-сервер», что позволило диссертанту ускорить получение и обработку результатов расчетов.

В этой же главе представлены результаты тестирования вычислительного комплекса. Проводится исследование на сеточную сходимость задачи взаимодействия одиночной сверхзвуковой струи с преградой. Определены оптимальные размеры ячеек расчетной сетки. Выполнено качественное и количественное сравнение результатов вычислительного комплекса с теоретическими и экспериментальными данными других авторов. Валидация результатов осуществлялась на задачах о течении газа в сопле JPR, при натекании одиночной нерасчетной струи на преграду и проявления эффекта «lift loss» для модельной задачи. Показано хорошее качественное и количественное согласование с результатами других авторов.

В четвертой главе приведены результаты вычислительных экспериментов взаимодействия четырех сверхзвуковых струй с неровной поверхностью. В расчетах варьировались конфигурация посадочного модуля, расположение сопел тормозных двигателей, высота от среза сопел до поверхности посадки, уровни тяг двигательной установки и т.д. Результаты представлены в виде рисунков, на которых изображены изоповерхности и поля чисел Маха с нанесенными на них линиями тока газа, распределения давлений на поверхностях посадочных платформ и мест посадки. Проанализированы газодинамические структуры многоблочных струй и получено изменение распределения силовых нагрузок на исследуемых поверхностях в зависимости от варьируемых параметров. Для посадочной платформы № 1 при работе двигательной установки на максимальной тяге силовая нагрузка может возрасть 26.8 %, для посадочной платформы № 2 – 22.4 %.

Далее представлены новые результаты исследований эффекта «lift loss» для рассматриваемых конфигураций посадочных платформ при разреженных условиях посадки. В работе показано, что предельное значение этого эффекта не превышает 6 % от уровня тяги.

В заключение этой главы приведены расчетные оценки возможной эрозии грунта Марса с использованием эмпирических данных по его грунтам и критерия Кулона-Мора. Анализ оценок проводился в сравнении с экспериментами для аналогов марсианского грунта. Из результатов следует, что возможная эрозия будет наблюдаться практически для всех рассмотренных типов грунтов при минимальном расстоянии посадочного модуля от поверхности.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, и их достоверность

В диссертационной работе выполнен анализ известных теоретических и экспериментальных работ по струйным течениям, эффекту «lift loss», строению и составу поверхности Марса на основании данных отечественных и зарубежных авторов. Также проанализированы подходы для решения и реализации поставленных задач диссертационного исследования, а именно физико-математической формулировки задачи, выбора численных методов и программного исполнения.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов, рекомендаций, сформулированных в работе, достигается использованием общепринятых уравнений, допущений и численных методов. Дополнительно это подтверждается сеточной сходимостью задачи и согласованием результатов тестовых задач, полученных в ходе численных экспериментов, с известными экспериментальными и теоретическими данными и решениями, полученными другими авторами.

Научная новизна

В диссертации были получены следующие новые результаты:

1. Разработан и реализован вычислительный комплекс для проведения вычислительных экспериментов трехмерных нестационарных турбулентных течений сжимаемого вязкого газа и его взаимодействия с твердыми непроницаемыми поверхностями для произвольных расчетных областей.

2. Получены новые результаты по взаимодействию сверхзвуковых многоблочных струй с неровной поверхностью в условиях разреженности и чисел Маха порядка 5 на срезе сопел для двух посадочных платформ.

3. Впервые исследован эффект «lift loss» для рассмотренных эскизных конфигураций посадочных платформ в условиях Марса.

4. Выполнены расчетные оценки возможной эрозии поверхности места посадки для различных типов грунтов Марса в результате воздействия четырех струй двигательной установки.

Значимость результатов диссертационного исследования

В диссертации предложен вычислительный комплекс, основанный на программных платформах с открытым исходным кодом, с помощью которого выполнены вычислительные эксперименты для исследований физических процессов на заключительном этапе «мягкой» посадки посадочной платформы на поверхность Марса. Результаты вычислительных экспериментов взаимодействия многоблочных сверхзвуковых турбулентных струй с неровной поверхностью в условиях разреженности дают новые знания в области газовой динамики. Таким образом, исследования, полученные в диссертации, соответствуют паспорту специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, в частности, следующим: пункту 3 «Ламинарные и турбулентные течения», пункту 4 «Течения сжимаемых сред и ударные волны» и пункту 12 «Струйные течения. Кавитация в капельных жидкостях».

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и достаточно полно отражает результаты и выводы исследований.

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 работах, из них 4 работы являются статьями в научных журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, 8 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций.

Апробация работы была выполнена в рамках работ по х/д с Акционерным обществом «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» (г. Химки), при выполнении НИР «Создание научно-технических основ для разработки перспективных систем ракетно-космической техники нового поколения» и при выполнении государственного задания по теме «Разработка моделей, высокоточных численных методов, алгоритмов и программ расчёта для моделирования процессов многофазной газодинамики с использованием высокопроизводительных вычислительных систем».

Замечания

При реализации алгоритмов для задач взаимодействия сверхзвуковых струй с поверхностями возникает достаточно много проблем, относящихся к вычислительным технологиям. На мой взгляд, в диссертации этим вопросам уделено недостаточно внимания. Можно отметить следующие замечания:

1. В работе используются тетраэдральные формы ячеек во всей расчетной области. Это удобно при построении сеток для сложных областей, но с точки зрения точности расчетов у твердых границ области можно было бы проанализировать и другие подходы построения сеток.

2. Для рассмотренных недорасширенных струй можно было использовать разделение расчетной области на две подобласти, отдельно выделив течение в сопле и в струях. Такой подход, как правило, дает возможность повысить технологичность алгоритма расчета.

3. В диссертации указано, что при расчетах у обтекаемых поверхностей производилось сгущение расчетной сетки, но не приведены характеристики ячеек.

4. Из работы явно не следует степень влияния учета неровной поверхности при натекании на нее четырех струй. При использовании плоских, в том числе наклонных поверхностей, можно использовать плоскости симметрии. Это позволит существенно сократить общее число расчетных ячеек и время счета.

5. В работе основная часть результатов расчетов представлена в виде полей распределений параметров на плоскостях в зависимости от цветовой шкалы. Было бы наглядней оценивать количественные результаты из графиков и пространственных распределений.

Заключение

Диссертация А.М. Кагенова «Математическое моделирование взаимодействия сверхзвуковых многоблочных струй посадочного модуля с поверхностями» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является **законченной** научно-квалифицированной работой, выполненной на высоком научном уровне и на **актуальную** тему. В работе представлены **новые результаты** исследований взаимодействия сверхзвуковых многоблочных струй с неровной поверхностью в условиях разреженности и чисел Маха порядка 5 на срезе сопел, которые имеют большое значение для развития теории газовой динамики струй и могут использоваться для разработки и проектирования ракетно-космической техники.

Представленная диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Кагенов Ануар Магжанович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент

главный научный сотрудник лаборатории прикладной и вычислительной гидродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, доктор физико-математических наук (01.01.07 – Вычислительная математика), профессор



Воеводин Анатолий Федорович
voevodin@hydro.nsc.ru

04.12.2017

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской академии наук
630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15
тел.: 8-(383) 333-17-82
igil@hydro.nsc.ru
<http://www.hydro.nsc.ru>

Подпись А.Ф. Воеводина удостоверяю

Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН
кандидат физико-математических наук



Любашевская Ирина Васильевна