

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию 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 представленной работы обусловлена задачами практической аэрогазодинамики, связанными с необходимостью обеспечения посадки возвращаемых с околоземной орбиты космических пилотируемых аппаратов, а также исследовательских космических аппаратов, запускаемых на другие планеты. Важной особенностью этой проблемы становится существенная роль тормозной двигательной установки, выбор режимов ее работы, учет характера взаимодействия сверхзвуковых тормозных струй с посадочной поверхностью и определение степени воздействия отраженных струй двигательной установки на спускаемый аппарат. В работе исследуется задача мягкой посадки разрабатываемого АО «НПО Лавочкина» посадочного модуля автоматической космической станции на поверхность Марса в рамках международного проекта «ЭкзоМарс». Следует отметить востребованность результатов подобных исследований и при разработке перспективных пилотируемых транспортных космических кораблей нового поколения, разрабатываемых в РКК Энергия.

Перспективным способом решения такой задачи представляется использование результатов численного моделирования, что требует как разработки математических моделей физических процессов, так и численной, в том числе аппаратной, реализации данного направления.

В диссертации рассмотрены газодинамические параметры и ударно-волновая структура сверхзвукового струйного течения, истекающего из тормозных двигателей и взаимодействующего с посадочной

поверхностью; взаимодействие отражённых от посадочной поверхности потоков с корпусом спускаемого аппарата; определяется силовое воздействие вторичных течений, сформированных в процессе взаимодействия струй двигательной установки с посадочной поверхностью, с корпусом спускаемого аппарата. Также рассмотрена возможность эрозии грунта вследствие воздействия газовых струй тормозной двигательной установки.

Новизна представленной диссертации заключается в результатах по исследованию возможной потери тяги двигателей посадочного модуля вследствие эжекции газа из-под посадочного модуля в условиях разреженной атмосферы Марса, а также в результатах оценки эрозии марсианского грунта под действием натекающих на посадочную поверхность газовых струй, истекающих из многосопловой двигательной установки.

В обеспечение достоверности и обоснованности результатов в диссертации приводится:

1. обоснование физической модели течения, описывающей турбулентное сжимаемое течение, выполненной на основе хорошо отработанного к настоящему времени подхода – решению уравнений Рейнольдса с использованием двухпараметрической дифференциальной модели турбулентности SST $k - \omega$;

2. методика численного расчёта, основанная на использовании известных и проверенных алгоритмов решения методом конечных объёмов в сочетании с численными схемами счёта, обеспечивающими второй порядок точности MUSCL-Hancock и HLLC; также приводятся результаты тестирования вычислительного комплекса, включающие в себя решение нескольких задач взаимодействия одиночной струи с преградой с использованием экспериментальных данных.

На основании соответствия полученных расчетных результатов данным эксперимента делается вывод о пригодности данного программного комплекса для решения поставленной задачи.

Научная и практическая значимость заключается:

– в разработке и создании программного вычислительного комплекса, предназначенного для расчёта трёхмерных турбулентных сжимаемых течений на основе программы OpenFOAM с привлечением высокопроизводительной вычислительной системы ТГУ СКИФ Cyberia и его применимости к решению задач прикладной аэрогазодинамики;

– в результатах по взаимодействию многоблочных сверхзвуковых недорасширенных струй с посадочной поверхностью, которые могут быть использованы для выбора параметров работы тормозной двигательной установки посадочного модуля;

– в оценке возможного изменения результирующего силового воздействия двигательной установки за счет возникновения дополнительных аэродинамических сил на поверхности посадочного модуля в условиях Марса в результате воздействия на него отраженных газовых струй.

В качестве замечаний следует отметить, что решение задачи с помощью уравнений Рейнольдса предполагает, что пульсациями давления и температуры можно пренебречь; получаемое при этом решение задачи взаимодействия нерасчётной сверхзвуковой струи с преградой даёт осреднённую во времени картину течения и не позволяет выяснить уровень пульсаций параметров потока (в частности, давления и температуры) как в самой струе, так и на поверхности преграды. В то же время известно, что такое взаимодействие может сопровождаться установлением автоколебательного (пульсирующего) режима течения, уровень пульсаций в котором зависит от расстояния между срезом сопла и преградой. В представленной работе не обсуждается, возможно ли появление таких пульсаций при приближении спускаемого аппарата к посадочной поверхности.

Также отметим, что на представленных на рис. 4.18–4.29 картинах сверхзвукового струйного течения в области между нижней поверхностью посадочного модуля и поверхностью не выявлена ударно-волновая структура

течения, представленная на схемах рис. 1.1–1.5, что ставит вопрос о характеристиках используемой расчетной сетки и требует анализа погрешностей полученных результатов расчёта.

Следует отметить, что указанные замечания в значительной степени обусловлены как выбором самой методики исследования, так и текущего состояния развития научных подходов к решению подобных проблем и могут быть рассмотрены как пожелания для дальнейшей работы автора в данном направлении.

Диссертация является законченным исследованием, выполненным на высоком научном уровне, в которой продемонстрирована возможность проведения детальных численных расчетов на суперкомпьютере с использованием открытых кодов программного комплекса OpenFOAM. В диссертации представлено решение важной научно-практической задачи по определению газодинамической структуры течения, формирующегося при взаимодействии сверхзвуковых многоблочных струй тормозной двигательной установки с посадочной поверхностью применительно к посадке межпланетного космического аппарата на Марс.

Содержание основных разделов диссертации изложено в 12 опубликованных работах автора, в том числе в 4 статьях в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа А.М. Кагенова удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук «Положением о присуждении учёных степеней», утверждённым Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (с изменениями, внесенными постановлением Правительства Российской Федерации от 21.04.2016 № 335). Уровень изложения материала диссертации отражает хорошую подготовленность и высокую квалификацию соискателя.

Выполненное исследование соответствует научной специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, а его автор, Кагенов Ануар Магжанович, безусловно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент

главный научный сотрудник лаборатории экспериментальной аэрогазодинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, доктор технических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), профессор

Запрыгаев Валерий Иванович
(383) 330-77-66, zapr@itam.nsc.ru

05.12.2017

Подпись В.И. Запрыгаева удостоверяю
Ученый секретарь ИТПМ СО РАН,
кандидат физико-математических наук



Ю.В. Кратова

Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Телефон: 330-42-68; e-mail: admin@itam.nsc.ru;

сайт: <http://www.itam.nsc.ru>