

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института механики Уральского отделения
Российской академии наук,
доктор технических наук


В.Б. Дементьев

«28» 11 2017 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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 диссертационной работы. Освоение космоса с целью поиска возможных следов жизни, определения химического состава космических тел, изучения поверхности и окружающей среды планет, выявление опасностей для будущих пилотируемых полетов является одной из актуальных научно-технических задач. В частности, на Марс как на наиболее близкую к Земле планету ориентирован взор исследователей. Подробную информацию о планете можно получить с помощью специального аппарата, способного передвигаться по поверхности и передавать собранные данные на Землю – марсохода. Для доставки марсохода на поверхность Марса необходимо решить множество задач, в число которых входит проведение «мягкой» посадки аппарата. Экспериментальное изучение газодинамических и тепловых процессов, протекающих при посадке модуля, является исключительно сложной задачей, поэтому необходимо разрабатывать методики численного моделирования взаимодействия сверхзвуковых струй продуктов сгорания двигательных установок с поверхностями. Следует отметить, что тематика работы относится к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ (п. 7. «Транспортные и космические системы») и входит в перечень критических технологий РФ (п. 24. «Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения»). Таким образом, диссертационная работа А.М. Кагенова «Математическое моделирование взаимодействия сверхзвуковых многоблочных струй посадочного модуля с поверхностями», посвященная теоретическому

исследованию газодинамических процессов при взаимодействии сверхзвуковых струй продуктов сгорания двигательной установки посадочного модуля с поверхностью посадки и корпусом модуля, является актуальной.

Характеристика содержания диссертационной работы. Цель диссертационной работы заключается в численном исследовании особенностей течений, возникающих при взаимодействии струй продуктов сгорания тормозной двигательной установки многоблочного посадочного модуля с поверхностью Марса, эффекта «lift loss» и возможной эрозии грунта.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и семи приложений, изложенных на 155 страницах машинописного текста, включая 88 рисунков, 5 таблиц и список литературы из 143 наименований.

Во введении представлена актуальность, поставлены цель и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, раскрыта новизна исследуемой тематики, теоретическая и практическая ценность диссертационной работы, обоснована достоверность полученных результатов, указаны сведения об апробации работы и публикациях автора.

В первой главе проведен обзор литературы по теме диссертационной работы. Выполнен подробный анализ задачи взаимодействия недорасширенных струй с препятствиями. Показаны как образующаяся в результате взаимодействия сложная структура течения, зависящая от многих параметров (числа Маха на срезе, количества и ориентации сопел двигательной установки и т.д.), так и отсутствие работ по исследованию газодинамики при «мягкой» посадке посадочного модуля на поверхность Марса. Отмечено существенное влияние эффекта «lift loss», проявляющегося во время приземления самолетов вертикального взлета и посадки. Проведен обзор структуры и свойств марсианского грунта. Описаны различные вычислительные средства для решения задач газодинамики.

Во второй главе сформулирована постановка задачи взаимодействия струй продуктов сгорания блоков двигательной установки с поверхностью посадки. Описаны элементы конструкции посадочного модуля «ЭкзоМарс» и этапы процесса посадки модуля на поверхность Марса. Обосновано применение RANS для решения поставленной задачи. Приведены уравнения математической модели. Для описания вихревого течения использована модель турбулентности $k-\omega$ SST. Сформулированы начальные и граничные условия.

В третьей главе приведено описание алгоритма решения уравнений математической модели, вычислительного комплекса, представлены тестовые и сравнительные расчеты. Решение задачи газодинамики осуществляется в программном пакете OpenFOAM. Показан

используемый метод решения уравнений. Система интегрируется по времени четырехшаговой схемой Рунге-Кутты, используется метод MUSCL-Hancock, конвективные потоки на гранях определяются по схеме HLLC, вязкие – по центральной схеме второго порядка. Описана общая используемая методика математического моделирования: построение геометрической модели, создание расчетной сетки, подготовка расчетного модуля OpenFOAM, методика распараллеливания задачи и визуализации результатов. Проведено тестирование вычислительного комплекса на задачах взаимодействия сверхзвуковых струй, истекающих из двигательных установок с одним соплом, с преградами и элементом (диском) установки. Показано хорошее согласование результатов расчетов с экспериментальными и теоретическими данными из литературы по эффекту «lift loss», распределению давления в сопле и вдоль преграды.

Четвертая глава посвящена численному исследованию взаимодействия четырех сверхзвуковых струй продуктов сгорания двигательной установки посадочного модуля с поверхностью Марса. Приведены геометрические параметры двух конфигураций посадочного модуля, параметры тормозных двигателей. Показана сложная структура течения при истечении газов из тормозных двигателей и их взаимодействия с поверхностью. Проведен подробный анализ картины течений. Выявлены различные образующиеся ударно-волновые структуры в зависимости конфигурации модуля, его расположения относительно поверхности и режима работы двигательной установки. Оценен характер воздействия струй газа на поверхность посадки и корпуса модулей. Выявлено слабое влияние эффекта «lift loss» на процесс «мягкой» посадки модуля в марсианских условиях. Проведена оценка возможности эрозии грунта при различных режимах работы двигательной установки.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Среди полученных **новых** результатов следует отметить следующие:

- Разработан и создан вычислительный комплекс для проведения исследований газодинамических процессов, протекающих при взаимодействии истекающих из сопел двигательной установки продуктов сгорания с поверхностями при посадке модуля на планету.

- Проведен подробный анализ образующейся в результате взаимодействия истекающей струи при торможении модуля с поверхностью планеты и корпусом в зависимости от ориентации модуля, его конфигурации и режима работы двигательной установки. Показаны особенности сложной ударно-волновой структуры течения, а также характера распределения сил, действующих со стороны потока на поверхность планеты и корпус модуля.

– Исследован эффект «lift loss» при посадке модуля на поверхности Марса. Показана незначительность влияния возникающего эффекта на процесс посадки.

– Проведена оценка возможности эрозии грунта Марса в результате натекания струй двигательной установки посадочного модуля.

Достоверность и обоснованность полученных автором в диссертационной работе результатов обеспечивается использованием фундаментальных законов сохранения, апробацией используемых методов решения, хорошим согласованием результатов численного моделирования с опубликованными в литературе экспериментальными данными.

Практическая значимость результатов исследований. Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, являются частью работ по разработке перспективных систем ракетно-космической техники нового поколения в рамках международного проекта «ЭкзоМарс-2020». Полученные результаты, методика численного исследования и реализованный вычислительный комплекс могут найти применения в исследованиях газодинамических процессов взаимодействия сверхзвуковых многоблочных струй посадочных модулей с реальными поверхностями планет в научных и учебных заведениях: Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск), Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск), Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (г. Королев), Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского (г. Жуковский), Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (г. Москва), Московский авиационный институт, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Национальный исследовательский Томский государственный университет, Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова (г. Санкт-Петербург), Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» (г. Химки), а также в других организациях, исследования которых направлены на развитие ракетно-космической отрасли.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации, в нем последовательно раскрыты поставленные цели и задачи исследования, представлены все основные результаты работы, сформулированы положения, выносимые на защиту. Результаты и выводы исследования в автореферате соответствуют поставленным целям и задачам.

Основные научные результаты диссертации **опубликованы** в 12 работах, 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, 8 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций.

По работе имеется ряд **замечаний**:

1. В качестве граничного условия для использованной в работе модели турбулентности k - ω на твердой непроницаемой поверхности задается как условие в вязком подслое (выражения (2.32)–(2.33) на стр. 51 диссертации) так и пристеночные функции (первый абзац стр. 53 диссертации и предпоследний абзац стр. 10 автореферата). Какие на самом деле граничные условия определялись для k и ω на твердой стенке?

2. В качестве начальных условий задач u_i , k , ω принимаются равными нулю (стр. 51 диссертации, стр. 10 автореферата). Однако в данном случае в знаменателе формулы по расчету турбулентной вязкости окажется ноль (уравнение (2.23) ст. 49 диссертации, уравнение (7) стр. 10 автореферата). Каким образом разрешалась данная ситуация?

3. В качестве параметров окружающей среды (атмосферы Марса) при расчете взаимодействия четырех струй с поверхностью приняты следующие величины: давление 650 Па, температура 250 К (стр. 88 диссертации). Чем обусловлен выбор таких параметров, из каких источников они брались?

4. В таблице 4.2 стр. 116 диссертации, таблице 1 стр. 18 автореферата приведены интегралы давления (G) по внутренней стороне диска в зависимости от режима работы двигательной установки, высоты и типа посадочного модуля. Как можно объяснить тот факт, что с уменьшением высоты расположения ПсМ для минимального режима работы ПсМ № 2 G уменьшается, когда в остальных расчетных случаях с уменьшением высоты наблюдается увеличение G ?

5. Интересно было бы видеть график изменения параметра f (выражение (3.11) стр. 58 диссертации), где за f , например, принят интеграл давления по поверхности места посадки или по нижней части корпуса модуля – имеются ли в области нестационарные эффекты, выявленные для данных конкретных расчетных случаев (для подтверждения или опровержения общепринятых представлений, приведенных на стр. 40 и 41 диссертации)?

Отмеченные замечания не противоречат основным положениям, полученным результатам и не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение. Диссертация А.М. Кагенова соответствует отрасли «физико-математические науки», а содержательная часть и полученные результаты соответствуют паспорту научной специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы по областям исследования «Ламинарные и турбулентные течения», «Течения сжимаемых сред и ударные волны», «Струйные течения. Кавитация в капельных жидкостях» (пп. 3, 4, 12 паспорта специальности). Диссертационная работа А.М. Кагенова «Математическое

моделирование взаимодействия сверхзвуковых многоблочных струй посадочного модуля с поверхностями» является завершенным научным исследованием. Диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9–11 (раздел II) «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а А.М. Кагенов заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Настоящий отзыв рассмотрен и одобрен на заседании научного семинара лаборатории физико-химической механики Института механики УрО РАН 23 ноября 2017 г. (протокол № 5).

Заведующий лабораторией
физико-химической механики,
доктор физико-математических наук
(05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ)



Карпов Александр Иванович

Научный сотрудник
лаборатории физико-химической механики,
кандидат физико-математических наук
(01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника)



Шаклеин Артем Андреевич

23.11.2017

Подписи А.И. Карпова и А.А. Шаклеина удостоверяю
Специалист по кадрам




Н.Н. Черных

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики Уральского отделения Российской академии наук; 426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34; тел. (3412) 50-82-00; ipm@udman.ru; <http://www.udman.ru/iam/ru>