

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ С
ПОВЕРХНОСТЬЮ МЕСТА ПОСАДКИ ПЛАТФОРМЫ «ЭКЗОМАРС»**

А.М. Кагенов, К.В. Костюшин, И.В. Еремин

Научный руководитель: профессор, д. ф.-м. н. А.А. Глазунов

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: anuar@ftf.tsu.ru

**MATHEMATICAL MODELING OF PLUMES IMPINGEMENT ON LANDING SITE OF
"EXOMARS" LANDING PLATFORM**

A.M. Kagenov, K.V. Kostyushin, I.V. Eremin

Scientific Supervisor: Prof., Dr. A.A. Glazunov

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: anuar@ftf.tsu.ru

***Abstract.** In the present study the results of mathematical modeling of impingement plumes with landing site of "ExoMars" landing platform are shown. The gas-dynamic parameters while landing platform impingement plumes with surface of Mars were obtained at an altitude of 1; 0,5; 0,3 meter. The thrust at this altitude of four thrusters was set to 7648 N and 54936 N. These results allow further evaluation of thermal and power loads occur on the surfaces of the landing platform and the Martian surface as the result of the impingement of a thruster plume on surface.*

Введение. Одной из приоритетных задач в изучении планет Солнечной системы является исследование Марса. Это обусловлено тем, что Марс относительно других планет имеет наиболее близкие к Земле физические характеристики. В настоящее время исследование Марса осуществляется с использованием искусственных спутников, выведенных на его орбиту, посадочных платформ и марсоходов доставленных на поверхность планеты. Развитие марсианских программ берет начало с 1960 годов [1], когда был запущен ряд космических аппаратов к планете Марс. На данный момент разработано 47 космических программ, среди которых состоялось менее половины (21 миссия). Наибольший интерес, с точки зрения отработки схем посадки, представляют следующие: Viking 1, Viking 2, Pathfinder, Spirit, Opportunity, Phoenix и Curiosity. В продолжение этих марсианских программ в настоящее время реализуется совместный проект «ЭкзоМарс» между Федеральным космическим агентством (Роскосмос) и Европейским космическим агентством (ЕКА). Данный проект состоит из двух этапов. В 2016 году стартовал первый этап программы «ЭкзоМарс», включающий в себя спутник TGO (Trace Gas Orbiter) с научной аппаратурой и спускаемый модуль. Задачи спускаемого модуля ЕКА Schiaparelli заключались в отработке методики мягкой посадки. Однако из-за ошибок в работе бортового компьютера Schiaparelli разбился об поверхность Марса. Второй этап программы «ЭкзоМарс» изначально был запланирован на 2018 год. В связи с некоторыми трудностями разработка второго этапа была продлена на два года. Пуск к планете Марс российского десантного модуля «ЭкзоМарс» с европейским ровером запланирован на 2020 год. Особой интерес представляет теоретическая отработка процесса мягкой посадки посадочной платформы на поверхность Марса. Это связано с возможностью

появления различных негативных эффектов (пыль, lift loss, тепловые и силовые нагрузки) влияющих на корректную работу датчиков, бортовых систем и полезной нагрузки. Поэтому необходима разработка вычислительного комплекса для проведения математического моделирования процесса посадки космических аппаратов на тела Солнечной системы.

Физико-математическая постановка. Десантный модуль, прорабатываемый НПО им. С. А. Лавочкина в укрепленном виде состоит из: корпуса, парашютной системы, радара и другого оборудования [2]. На конечном этапе спуск и посадка посадочного модуля (ПсМ) осуществляется за счет работы 4-х сопловой двигательной установки (ДУ), сопла тормозных двигателей которой направлены к поверхности места посадки. Тяга одного тормозного двигателя ДУ может изменяться в широком диапазоне от 1912 до 13734 Н [3]. Газодинамические и тепловые нагрузки на ПсМ и на место посадки существенно зависят от сложной изменяющейся по времени газодинамической картины течения. Она формируется за счет одновременного истечения струй из сопел двигательной установки, которые взаимодействуют между собой, поверхностью места посадки и разреженной атмосферой Марса. Для математического моделирования процессов взаимодействия сверхзвуковых струй с поверхностью места посадки платформы «ЭкзоМарс» разработан вычислительный комплекс, основанный на базе исходного кода программы OpenFOAM.

Методика расчета основана на решении осредненных уравнений Навь-Стокса по Рейнольдсу совместно с уравнениями двухпараметрической модели турбулентности $SST k - w$ для вязкого идеального газа [4-6]. Интегрирование дифференциальных уравнений в частных производных проводится методом контрольных объемов, потоки через грани ячеек находятся из приближенного решения задачи Римана по схеме HLLC с использованием разностной схемы MUSCL типа TVD второго порядка точности [7]. СЛАУ разрешается методом Гаусса. Дискретизация по времени осуществляется четырех шаговым методом Рунге-Кутты второго порядка точности с коэффициентами: $a_1 = 0,11$; $a_2 = 0,2766$; $a_3 = 0,5$; $a_4 = 1$ [8]. Математическое моделирование выполнено с использованием суперкомпьютера Томского государственного университета СКИФ Cyberia.

Результаты математического моделирования. Проведены параметрические численные исследования в пространственной постановке для упрощенной конфигурации ПсМ «ЭкзоМарс» в условиях Марса. За параметры окружающей среды принималось давление 650 Па, температура 250 К. Место посадки учитывает особенности поверхности Марса. Высота расположения ПсМ над местом посадки изменялась от 1 м до 0,3 м. Тяга ДУ на этих высотах соответствовала 7648 Н и 54936 Н. Время работы ДУ составляло 0,3 секунды. Получено, что при расположении ПсМ на высоте более 1 м влиянием струй ДУ на поверхности ПсМ и Марса незначительны. Максимальные градиенты параметров газа возникают на высоте 0,3 м. Для этой высоты на рисунке 1 и 2 показано распределение чисел Маха в двух перекрестных сечениях проходящих через оси симметрии сопел.

При расположении ПсМ на высоте 1 м и работе ДУ с тягой 7648 Н у поверхности места посадки реализуется давление порядка 5 кПа и температура около 600 К. При снижении ПсМ с высоты 1 м до 0,3 м давление и температура возрастают до значений параметров торможения. При работе ДУ с тягой 54936 Н на высоте 1 м давление и температура у поверхности Марса принимают значения порядка 50 кПа и 1200 К, а на высоте 0,3 м достигают значений параметров торможения.

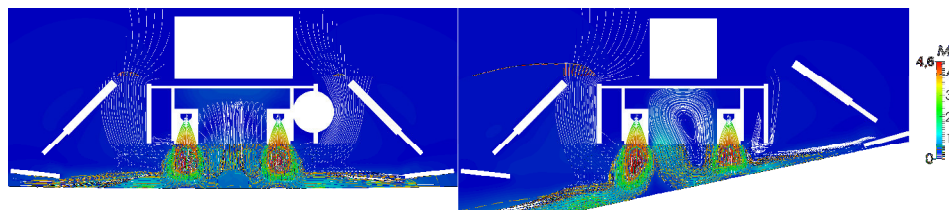


Рис. 1. Распределение числа Маха при работе ДУ с тягой 7648 Н на высоте 0,3 метра

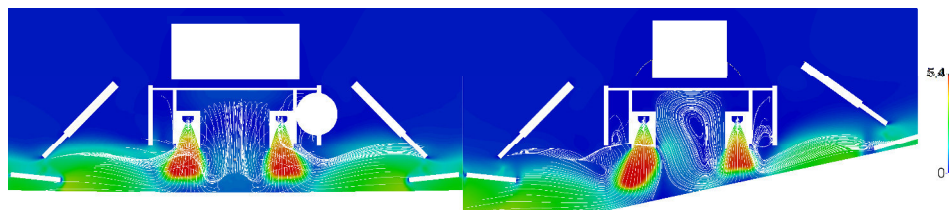


Рис. 2. Распределение числа Маха при работе ДУ с тягой 54936 Н на высоте 0,3 метра

Заключение. Разработан вычислительный комплекс, основанный на базе исходного кода программы OpenFOAM. Проведены параметрические исследования упрощенной конфигурации посадочной платформы «ЭкзоМарс». Получены распределения газодинамических параметров при снижении посадочного модуля с высоты 1 м до 0,3 м при работе двигательной установки с тягой 7648 Н и 54936 Н. Данные результаты являются основой для дальнейших расчетов тепловых и силовых нагрузок возникающих на поверхностях посадочной платформы и Марса в результате работы двигательной установки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания, проект № 9.9063.2017/БЧ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mars Exploration Program. Официальный сайт NASA: National Aeronautics and Space Administration [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mars.nasa.gov>. – 27.02.17.
2. Хартов В.В., Мартынов М.Б., Лукьянчиков А.В., Алексашкин С.Н. Проектная концепция десантного модуля «ЭкзоМарс-2018» создаваемого НПО им. С.А. Лавочкина // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. – 2014. – № 2 (23). – С. 5-12.
3. Александров Л.Г., Морозов В.И., Степанов С.С., Крылов А.А., Кузьмин О.А., Федотов А.В., Мальцев М.В. Двигательная установка посадочной платформы десантного модуля // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. – 2014. – № 2 (23). – С. 116-120.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
5. Дулов В.Г. Газодинамика процессов истечения. – Новосибирск: Наука, 1984 – 226 с.
6. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. – V. 32. – No 8. – P. 1598-1605.
7. Toro E.F. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics. – Berlin: Springer-Verlag, 2009. – 724 p.
8. Lallemand M.-H., Steve H., Dervieux A. Unstructured multigridding by volume agglomeration: Current status. Computers and Fluids, 1992. – V. 21, I. 3, – P. 397-433.