

УДК 533.17, 631.42  
DOI 10.17223/19988621/40/8

А.М. Кагенов

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «ЭКЗОМАРС» НА ЭРОЗИЮ ПОВЕРХНОСТИ МАРСА<sup>1</sup>

В работе представлены результаты математического моделирования воздействия струй продуктов сгорания двигательной установки (ДУ) на поверхность Марса при посадке десантного модуля (ДМ) «ЭкзоМарс». Проведены численные исследования разрушения различных типов грунтов (сыпучего, комковатого, кусковатого и песка) под действием истекающих сверхзвуковых струй продуктов сгорания ДУ в процессе посадки десантного модуля на поверхность Марса. Рассмотрены два режима работы ДУ посадочной платформы «ЭкзоМарс»: режим максимальной и минимальной тяги. По результатам параметрических исследований выявлено расстояние, с которого начинается эрозия поверхности Марса, более разрушительную силу сверхзвуковые струи ДУ проявляют на высоте с 1 м и ниже. Показано, что в момент касания ДМ поверхности Марса при работе ДУ на максимальном режиме возможна эрозия всех типов грунтов, за исключением сыпучего грунта, а на минимальном эрозия не наблюдается.

**Ключевые слова:** *космический аппарат «ЭкзоМарс», математическое моделирование, сверхзвуковая струя, эрозия, марсианский грунт, прочность на сдвиг.*

В связи с повышенным интересом к планете Марс активно развиваются различные космические программы, направленные на изучение космоса, ближайших планет и спутников, такие, как «Фобос-Грунт», «ЭкзоМарс», «Mars Scout», «MAVEN», «Curiosity» и т.д. С этой целью проектируются и модифицируются посадочные платформы космических аппаратов, предназначенных для изучения планеты Марс. В ходе посадки десантного модуля сверхзвуковые струи импульсных двигательных установок воздействуют на поверхность Марса. Процесс спуска ДМ может привести к разной степени эрозии почвы. Согласно результатам проведенных численных исследований, на большом удалении ДМ от поверхности Марса может образовываться пылевое облако, а на малых высотах и в момент касания поверхности возможно разрушение грунта. Эти факторы могут негативно сказаться на корректной работе бортовых приборов и полезной нагрузке посадочной платформы. В связи с этим, для обеспечения штатного функционирования бортовых приборов и защиты полезной нагрузки посадочной платформы КА «ЭкзоМарс» необходимо проведение исследований по оценке степени влияния воздействия истекающих струй на процесс разрушения марсианского грунта в планируемых местах посадки ДМ.

<sup>1</sup> В статье использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта (№ 8.2.45.2015), в рамках Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета».

### Физико-математическая постановка задачи и метод решения

В данной работе рассматривается десантный модуль проекта «ЭкзоМарс» [1]. На рис. 1 показана примерная конфигурация посадочной платформы. Десантный модуль в основном состоит из: платформы, ДУ, радара, баков с топливом и гелием, тепловых сотопанелей, комплекса научной аппаратуры и марсохода. ДУ оснащена четырьмя импульсными жидкостными ракетными двигателями с возможностью изменения силы тяги. Согласно планируемому спуску КА на поверхность Марса, на высоте от 600–1000 м после отделения защитного кожуха системой управления выдается команда на включение ДУ. На высоте 10 м скорость спуска снижается до 1.8–2 м/с, далее ДУ обеспечивает заданную скорость спуска и касания с поверхностью. По сигналу касания одного из датчиков, установленных на каждой опоре, выполняется выключение ДУ [2]. В целях обеспечения безопасной посадки и достижения поставленных задач для марсохода и посадочной платформы у программы «ЭкзоМарс» имеется ряд требований к свойствам грунтов для места посадки ДМ [3]. Место для посадки должно быть древним, обладать в избытке морфологическими и минеральными свидетельствами о водной активности, содержать в себе осадочные отложения, выходящие на поверхность пласта, которые должны быть распределены по посадочному эллипсу и иметь небольшой пыльный покров.

В целях детального изучения протекающих процессов во время посадки ДМ на поверхность Марса с учетом сложной конфигурации посадочной платформы, характера ландшафта места посадки, наличия частиц грунта и пыли в окружающей среде и возможной эрозии марсианского грунта, математическая постановка задачи рассматривается в трехмерном приближении. При описании нестационарного сжимаемого вязкого течения газа записываются законы сохранения массы, количества движения и энергии совместно с моделью турбулентности  $k-\omega SST$  с использованием следующих допущений: газ считается идеальным, сила тяжести не учитывается [4–7].

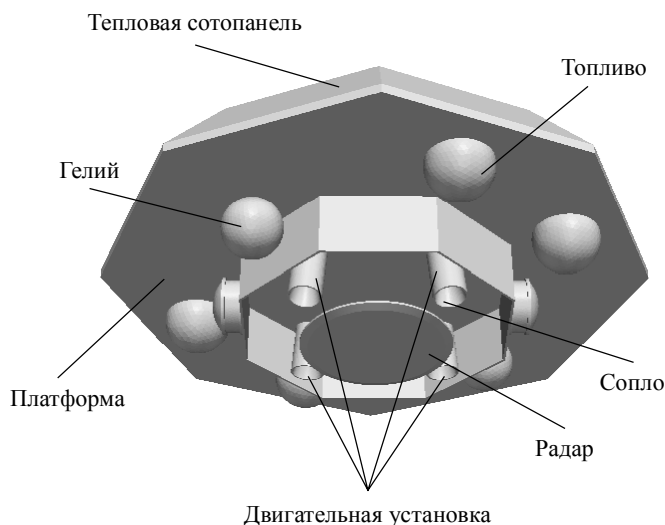


Рис. 1. Примерная конфигурация посадочной платформы «ЭкзоМарс»

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j] = 0,$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время, с;  $u_j$  – скорость, м/с;  $x_j$  – координата, м.

Уравнение движения

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_i u_j + p \delta_{ij} - \tau_{ji}] = 0,$$

где  $i = 1, 2, 3$ ;  $p$  – давление, Па;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера.

Тензор вязких напряжений имеет следующий вид:

$$\tau_{ij} = 2\mu \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right],$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

Уравнение энергии

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j E + u_j p + q_j - u_i \tau_{ij}] = 0,$$

где  $E$  – полная внутренняя энергия, Дж;  $q_j$  – тепловой поток, Дж/(м<sup>2</sup>·с).

Уравнение состояния идеального газа

$$p = \rho R T,$$

где  $T$  – температура, К;  $R$  – удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К).

В качестве модели грунта используется уравнение Кулона для сухого связного грунта [8]. Сопротивление грунта сдвигу характеризуется прочностными свойствами грунта и складывается из сопротивления трения, пропорционального нормальному давлению, плюс сцепление, не зависящее от давления. Прочностью грунта называют способность его воспринимать силы внешнего воздействия не разрушаясь. Разрушение грунта происходит в виде перемещения-сдвига одной его части относительно другой тогда, когда силы внешнего воздействия превысят силы внутреннего сопротивления. Прочность грунта определяется его сопротивляемостью сдвигу и оценивается показателем, который называется предельным сопротивлением сдвигу  $\tau$ . Величина прочности на сдвиг  $\tau$  имеет следующее соотношение:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg}(\varphi) + c,$$

где  $\sigma$  – давление, направленное перпендикулярно плоскости сдвига, Па;  $\varphi$  – угол внутреннего трения, град;  $c$  – величина когезии, Па.

На рис. 2 представлена исследуемая расчетная область, приведены обозначения границ расчетной области, ДМ и ДУ.

Для границ Г1 и Г7 используются следующие граничные условия (ГУ): для давления – условия непроницаемости:

$$\operatorname{grad}(P) = 0;$$

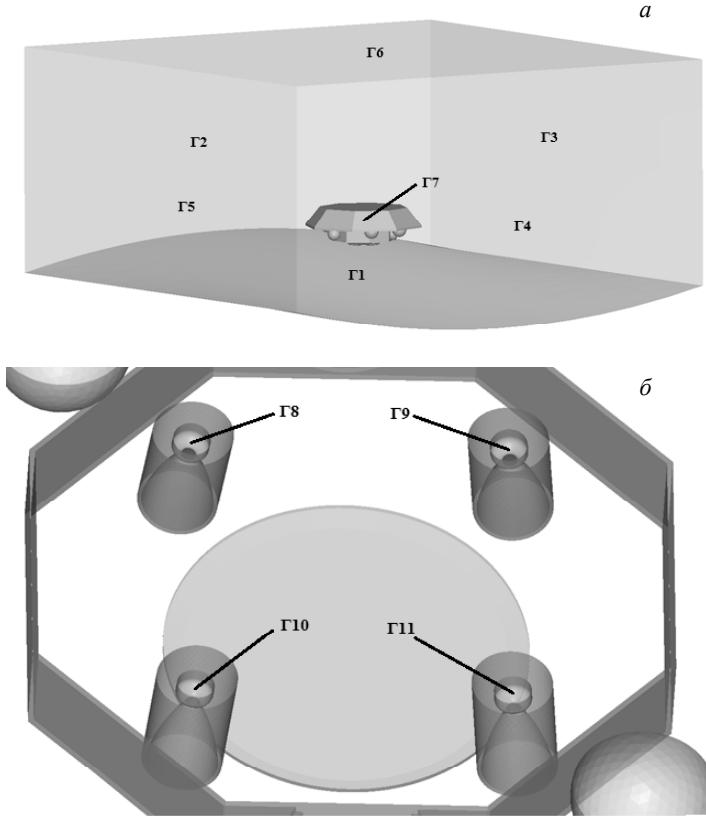


Рис. 2. Расчетная область и обозначения ГУ: Г1 – поверхность Марса; Г2, Г3, Г4, Г5, Г6 – внешние границы расчетной области; Г7 – поверхность ДМ; Г8, Г9, Г10, Г11 – камера сгорания ДУ

для скорости – условия прилипания (все компоненты вектора скорости равны нулю):

$$U_x = 0, \quad U_y = 0, \quad U_z = 0;$$

для температуры (стенки сопла полагаются теплоизолированными)

$$\text{grad}(T) = 0.$$

Для кинетической энергии турбулентности и диссипации кинетической турбулентной энергии ГУ моделируются пристеночными функциями.

Для Г2, Г3, Г4, Г5 полагаются следующие условия:

$$P = P_a, \quad T = T_a, \quad U = 0.$$

где  $P_a$  – давление окружающей среды,  $T_a$  – температура окружающей среды.

$$\begin{aligned} \text{grad}(k) &= 0, \\ \text{grad}(\omega) &= 0. \end{aligned}$$

Как только истекающие струи достигают этих границ, используются граничные условия второго рода:

$$\text{grad}(P) = 0, \quad \text{grad}(U) = 0.$$

ГУ для Г6 имеют следующий вид:

$$P = P_a, \quad T = T_a, \quad U = 0.$$

На границах Г8, Г9, Г10, Г11 задаются следующие ГУ:

$$H = H_0, \quad S = S_0,$$

где  $H, S$  – энтальпия и энтропия.

$$k = k_0, \quad \omega = \omega_0.$$

Для реализации физико-математической модели и проведения численных исследований применялось свободное программное обеспечение OpenFOAM [9]. Численный метод реализован на методе конечных объемов, математическая модель основана на приближенном решении задачи Римана по схеме HLLC с использованием многомерного градиентного ограничителя [10]. СЛАУ разрешается методом Гаусса. Дискретизация по времени производится методом Рунге – Кутты. Численные исследования выполнены с использованием суперкомпьютера Национально исследовательского Томского государственного университета СКИФ Cyberia.

### Результаты численных исследований

Рассматривается работа ДУ на минимальном и максимальном режиме на высотах 1, 0.5 и 0.3 м. На максимальном режиме сила тяги одного двигателя ДУ соответствует 13734 Н, а на минимальном – 1962 Н. Время импульса ДУ составляет 0.03 с. Конечные характеристики ДУ посадочной платформы приведены в [2]. Давление окружающей среды полагается равным 650 Па, а температура 250 К. В расчетах принимается, что в начальный момент времени среда покоится. Поверхность, расположенная под ДМ, задается неровной. Расчеты проводятся для сыпучего (1–10 мкм), комковатого (5–500 мкм), кусковатого (50–3000 мкм) грунта и песка (60–200 мкм). В табл. 1 приведены используемые в модели грунта эмпирические константы, которые были получены из предыдущих космических программ Viking, Pathfinder и MER [11]. Согласно оценкам, прочность на сдвиг рыхлого сухого грунта Марса находится в пределах от 2 до 20 кПа. При превышении значения 20 кПа происходит разрушение марсианского грунта.

Таблица 1

Тип и параметры грунта

Тип грунта		Угол внутреннего трения, градус	Когезия, кПа
$\tau_1$	Сыпучий	18	3
$\tau_2$	Комковатый	35	3
$\tau_3$	Кусковатый	30	11
$\tau_4$	Песок	30	1

В табл. 2 приведены максимальные расчетные значения прочности на сдвиг сыпучего, комковатого, кусковатого грунта и песка при работе ДУ на стационарном режиме. Показано, что предельное значение 20 кПа превышают только случаи для комковатого и кусковатого грунта на высоте 0.3 метра при работе ДУ на

максимальном режиме. В остальных случаях превышение порогового значения не наблюдается.

Таблица 2

**Максимальные значения прочности на сдвиг связного сухого грунта**

Режим ДУ	Высота, м	$\tau_1$ , Па	$\tau_2$ , Па	$\tau_3$ , Па	$\tau_4$ , Па
Максимальный	0.3	13000	25500	28700	18700
	0.5	8410	15700	20600	10600
	1	5010	8330	14600	4570
Минимальный	0.3	4780	7840	14200	4160
	0.5	4360	6930	13400	3420
	1	3620	5330	12100	2100

На рис. 3 представлено распределение величины прочности на сдвиг для песка на поверхности Марса в случае расположения ДМ на высоте 0.3 м при работе ДУ на максимальном режиме. Изменение величины прочности на сдвиг для песка с течением времени на максимальном режиме работы ДУ и расположении ДМ на высоте 0.3, 0.5 и 1 м приведено на рис. 4–6. Здесь номера кривых соответствуют точкам, подписанным на рис. 3. Следует отметить, что качественная картина распределения прочности на сдвиг для других рассмотренных типов грунтов сохраняется, наблюдается отличие по величине. При работе ДУ на минимальном режиме, качественная картина распределения прочности на сдвиг подобна максимальному режиму, но воздействие струй на поверхность Марса менее интенсивное.

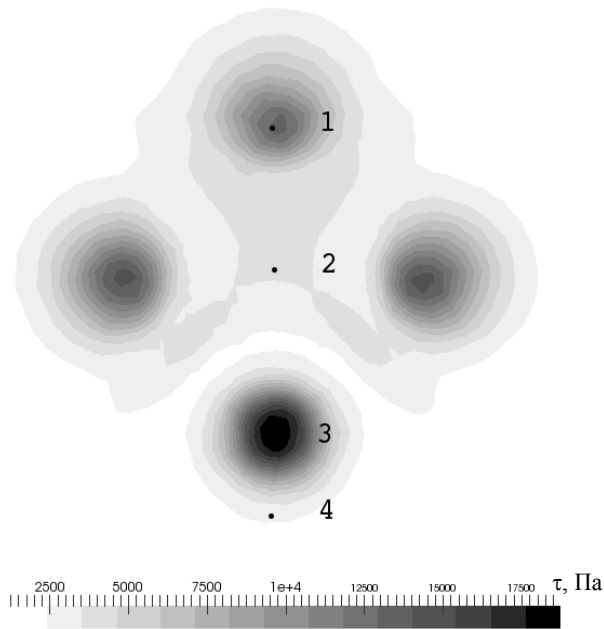


Рис. 3. Распределение  $\tau_4$  на высоте 0.3 м при работе ДУ на максимальном режиме

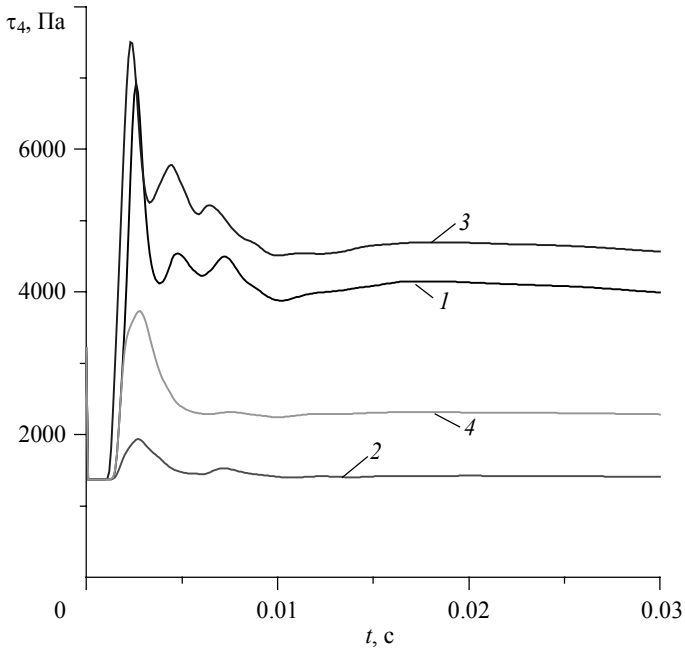


Рис. 4. Значение параметра  $\tau_4$  при расположении ДМ на высоте 1 метра

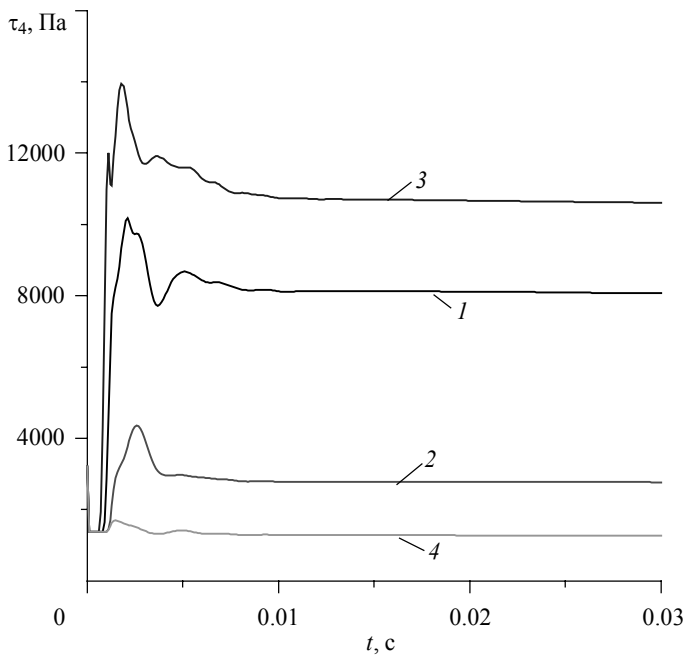


Рис. 5. Значение параметра  $\tau_4$  при расположении ДМ на высоте 0.5 метра

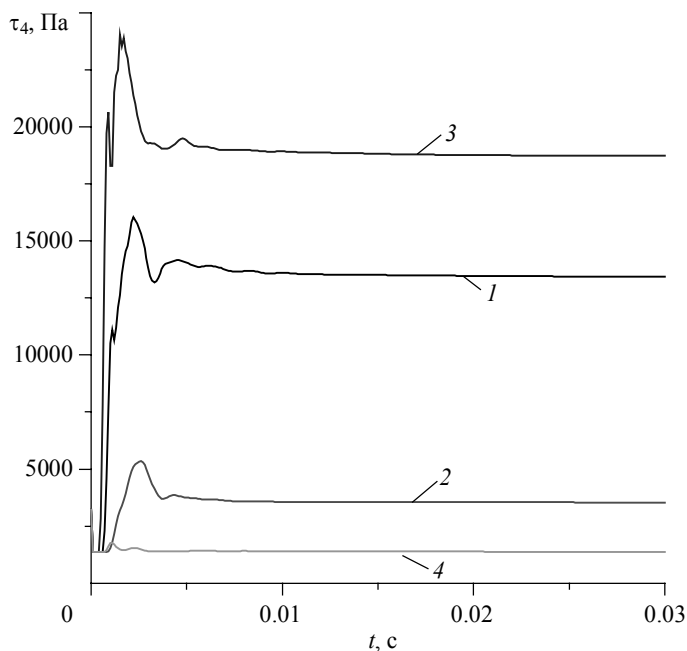


Рис. 6. Значение параметра  $\tau_4$  при расположении ДМ на высоте 0,3 м

При снижении ДМ с 1 м и ниже величина прочности на сдвиг увеличивается. При этом, в момент включения ДУ возможна эрозия марсианского грунта в результате ее нестационарной работы. Вследствие этого на поверхность в месте посадки последовательно приходят несколько ударных волн с уменьшающейся интенсивностью. Согласно результатам расчетов, при наличии данной конфигурации ДУ требуемое время для выхода на стационарный режим составляет 0,01 с.

Согласно результатам математического моделирования во всех случаях, наиболее разрушительное воздействие на почву, оказываемое сверхзвуковыми струями, происходит в первые сотые доли секунды работы ДУ. После выхода на стационарный режим интенсивность силового воздействия на поверхность Марса падает. Расчеты показывают, что при расположении ДМ на высоте 1 м в момент старта двигателей независимо от режима работы ДУ какой-либо разрушительный эффект на поверхность сверхзвуковые струи не оказывают. На высоте 0,5 м возможна эрозия почвы только для комковатого и кусковатого грунта на максимальном режиме работы ДУ. В момент касания ДМ поверхности Марса при работе ДУ на максимальном режиме может произойти разрушение почвы для всех типов грунта за исключением сыпучего, а на минимальном режиме работы ДУ эрозия почвы не наблюдается.

### Заключение

Проведено трехмерное математическое моделирование воздействия струй продуктов сгорания ДУ на поверхность Марса при посадке ДМ «ЭкзоМарс». Получены качественные результаты разрушения различных типов грунта Марса под



действием сверхзвуковых струй ДУ. Расчетные оценки проведены по пределу прочности на сдвиг сыпучего, комковатого, кусковатого грунта и песка с учетом нестационарных эффектов, характерных для выхода ДУ на режим. Выполнены многопараметрические численные исследования для случаев расположения ДМ на высоте 1, 0.5 и 0.3 м при работе ДУ на максимальном и минимальном режиме.

Получено, что в случае расположении ДМ на высоте 1 м и выше, какой-либо разрушительный эффект сверхзвуковые струи на поверхность Марса не оказывают. При сближении ДМ с поверхностью Марса при работе ДУ на максимальном режиме, возможно разрушение комковатого и кусковатого грунта на высоте 0.5 и 0.3 м после выхода ДУ на режим. Отмечено, что в момент включения ДУ также возможно разрушение песчаного грунта на расстоянии 0.3 м от поверхности. На минимальном режиме работы ДУ независимо от расположения ДМ, от момента старта ДУ и до выхода на стационарный режим, какое-либо разрушение почвы Марса не наблюдается.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Лихачев В.Н., Федотов В.П. Управление движением посадочного модуля космического аппарата «ЭкзоМарс» на этапе его спуска и посадки на поверхность Марса // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 2 (23). С. 58–64.
3. Ваго Хорсе, Лорензони Лейла, Калантропио Фабио, Зацциринский А.М. Выбор места посадки для миссии «ЭкзоМарс-2018» // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 2 (23). С. 42–46.
4. Глазунов А.А., Еремин И.В., Кагенов А.М., Кувишинов Н.Е. Численное исследование взаимодействия продуктов сгорания двигателей космических аппаратов с обтекаемыми поверхностями в условиях Марса // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 8/2. С. 97–103.
5. Глазунов А.А., Еремин И.В., Кагенов А.М., Тырышкин И.М. Математическое моделирование взаимодействия продуктов сгорания двигателей КА с обтекаемыми поверхностями // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 9/3. С. 57–59.
6. Глазунов А.А., Еремин И.В., Кагенов А.М., Тырышкин И.М. Применение пакета OpenFOAM для расчетов течений газа в соплах и струях // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 9/3. С. 66–68.
7. Menter F.R. Zonal Two Equation  $k-\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows // AIAA Paper. 1993. 93-2906. P. 1598–1605.
8. Kryzhanovskii L. Coulomb's friction law and soil failure in a three-dimensional stress-strain state // Hydrotechnical Construction. 1982. V. 16. No. 12. P. 664–674.
9. OpenFOAM / Официальный сайт OpenFOAM. [Электронный ресурс]. URL: <http://openfoam.com> (дата обращения 11.01.2016).
10. Toro E.F. Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. P. 315–344. DOI: 10.1007/b7976-1\_10.
11. Golombek M. P., Huertas A., Marlow J., McGrane B., Klein C., Martinez M., Arvidson R. E., Heet T., Barry L., Seelos K., Adams D., Li W., Matijevic J. R., Parker T., Sizemore H. G., Mellon M., McEwen A. S., Tamppari L. K., Cheng Y. Size-frequency distributions of rocks on the northern plains of Mars with special reference to Phoenix landing surfaces // Journal of Geophysical Research: Planets. 2008. V. 113. Issue E3.

Kagenov A.M. NUMERICAL INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE “EXOMARS” SPACECRAFT PROPULSION SYSTEM JETS ON EROSION OF THE MARS SURFACE

DOI 10.17223/19988621/40/8

The paper presents results of mathematical modeling of the effect caused by supersonic propulsion system jets on the surface of Mars during the descent of the ExoMars module. The action of propulsion system supersonic jets on the Mars surface was investigated numerically using the OpenFOAM software. According to results of the force action of supersonic jets on the Mars surface, the possible erosion of the Mars soil is estimated using Coulomb's law of shearing resistance. The soil model involves empirical constants which were obtained from previous Viking, Pathfinder, and MER space programs. The soil erosion during the landing of the spacecraft on the surface of Mars under the influence of the propulsion system at the maximum and minimum mode for loose, lumpy soil, and sand was investigated. During the numerical research, the distance from which soil erosion begins was revealed. The destructive force of propulsion system supersonic jets is greatest at one meter height and below. At the time of the spacecraft contacts with the surface of Mars at the maximum mode of the propulsion system, erosion of all soil types is possible except for the loose soil; for the minimum mode of the propulsion system, erosion is not observed.

Keywords: SC «ExoMars», mathematical modeling, supersonic jet, erosion, Mars, martian soil, shear strength.

KAGENOV Anuar Magzhanovich (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: anuar@ftf.tsu.ru

#### REFERENCES

1. Khartov V.V., Martynov M.B., Luk'yanchikov A.V., Aleksashkin S.N. (2014) Proektnaya kontsepciya desantnogo modulya “EkzoMars-2018” sozdavaemogo NPO im. S.A.Lavochkina [Conceptual design of EXOMARS-2018 descent module developed by Lavochkin association]. *Vestnik FGUP NPO im. S.A. Lavochkina – Scientific and technical quarterly journal “NPO imeni S.A. Lavochkina”*. *Vestnik*. 2(23). pp. 5–12.
2. Likhachev V.N., Fedotov V.P. (2014) Upravlenie dvizheniem posadochnogo modulya kosmicheskogo apparata “EkzoMars” na etape ego spuska i posadki na poverhnost' Marsa [Control of EXOMARS SC landing module during its descent and landing on the Mars surface]. *Vestnik FGUP NPO im. S.A. Lavochkina – Scientific and technical quarterly journal “NPO imeni S.A. Lavochkina”*. *Vestnik*. 2(23). pp. 58–64.
3. Vago J., Lorenzoni L., Calantropio F., Zashchirinskii A.M. Vybora mesta posadki dlya missii “EkzoMars-2018 [Selecting a landing site for the EXOMARS-2018 mission]. *Vestnik FGUP NPO im. S.A. Lavochkina – Scientific and technical quarterly journal “NPO imeni S.A. Lavochkina”*. *Vestnik*. 2(23). pp. 42–46.
4. Glazunov A.A., Kagenov A.M., Eremin I.V., Kuvshinov N.E. (2014) Chislennoe issledovanie vzaimodeystviya produktov sgoraniya dvigateley kosmicheskikh apparatov s obtekaemyimi poverhnostyami v usloviyah Marsa [Numerical study of the interaction of the spacecraft propulsion systems supersonic jets with the surfaces under conditions of Mars]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika – Russian Physics Journal*. 57(8/2). pp. 97–103.
5. Glazunov A.A., Eremin I.V., Kagenov A.M., Tyryshkin I.M. (2013) Matematicheskoe modelirovanie vzaimodeystviya produktov sgoraniya dvigateley KA s obtekaemyimi poverhnostyami [Mathematical modeling of the interaction of the spacecraft propulsion systems supersonic jets with the surfaces]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika – Russian Physics Journal*. 56(9/3). pp. 57–59.
6. Glazunov A.A., Eremin I.V., Kagenov A.M., Tyryshkin I.M. (2013) Primenenie paketa OpenFOAM dlya raschetov techeniy gaza v soplakh i struyakh [Application of OpenFOAM for calculates gas flows in nozzles and jets]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika – Russian Physics Journal*. 56(9/3). pp. 66–68

7. Menter F.R. (1993) Zonal Two Equation  $k-\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows. *ALAA Paper-93-2906*. pp. 1–23.
8. Kryzhanovskii L. (1982) Coulomb's friction law and soil failure in a three-dimensional stress-strain state. *Hydrotechnical Construction*. 16(12). pp. 664–674.
9. OpenFOAM. Official website. OpenFOAM C++ Documentation. [Online] Available from: <http://www.openfoam.com/docs/cpp> (accessed 11.01.2016).
10. Toro E.F. (2009) *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*. Springer-Verlag. pp. 315–344. DOI: 10.1007/b7976-1\_10.
11. Golombek M. P., Huertas A., Marlow J., McGrane B., Klein C., Martinez M., Arvidson R. E., Heet T., Barry L., Seelos K., Adams D., Li W., Matijevic J. R., Parker T., Sizemore H. G., Mellon M., McEwen A. S., Tamppari L. K., Cheng Y. (2008) Size-frequency distributions of rocks on the northern plains of Mars with special reference to Phoenix landing surfaces. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 113(E3). pp. 1–32.