

УДК 629.785

ПРИМЕНЕНИЕ РЕАКТИВНЫХ ПЕНЕТРАТОРОВ ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ В ЛУННОМ ГРУНТЕ

В. В. Родченко¹, В. А. Заговорчев², Э. Р. Садретдинова³, П. Ф. Пронина⁴

¹ rodchenkovv@mai.ru, ² zagovorchev@mai.ru, ³ ers@mai.ru, ⁴ kaf610@mai.ru

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ)

Поступила в редакцию 25.01.2019

Аннотация. Рассмотрена возможность использования пенетраторов для исследования подповерхностных слоев Луны. Указаны возможные варианты запуска подобных пенетраторов, т.к. от того, каким образом осуществляется запуск, зависит глубина их проникания в реголит. Выявлено, что при тяге двигательной установки меньше статического сопротивления лунного грунта движения не произойдет, если запуск пенетратора осуществлен с поверхности с нулевой скоростью входа. Приведены зависимости, позволяющие с достаточной точностью рассчитать массу пенетратора, глубину проникания и возникающие при этом перегрузки. Глубина проникания инерционного пенетратора зависит от его массогабаритных характеристик и скорости входа в грунт, которая ограничена уровнем допустимых перегрузок. Использование на пенетраторе твердотопливного двигателя позволяет увеличить допустимую скорость входа пенетратора в грунт за счет снижения действующих на него перегрузок, и тем самым увеличить глубину проникания.

Ключевые слова: пенетратор; Луна; грунт; реголит; проникание; внедрение; преграда; зонд; реактивный аппарат; РДТТ.

ВВЕДЕНИЕ

Для проведения ряда научных исследований и практических работ по освоению Луны и других планет с целью доставки аппаратуры и иной полезной нагрузки на некоторую глубину необходимо создание устройств, способных проникать в грунтово-полупространство (реголит).

Существующие в настоящее время устройства для движения в грунте образуют скважину либо путем разрушения породы с последующей транспортировкой ее на поверхность, либо уплотнением частиц грунта.

В данной работе рассматриваются пенетраторы, образующие скважину методом уплотнения и движущиеся в грунте как за счет кинетической энергии, так и за счет тяги ракетного двигателя твердого топлива. Цель данного исследования – оценка возможности использования реактивных пенетраторов для скоростного проникновения в реголит на определенную глубину.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ ГЛУБИНЫ ПРОНИКАНИЯ

Возможны три варианта запуска подобных пенетраторов [1]. Первый вариант предусматривает сброс пенетратора с посадочного модуля, имеющего некоторую скорость. При этом проникновение в грунт происходит по инерции за счет кинетической энергии пенетратора.

Второй вариант осуществляется путем запуска реактивного пенетратора с посадочного модуля, находящегося на поверхности Луны. В этом случае движение пенетратора в грунте происходит за счет тяги ракетного двигателя твердого топлива.

Третий вариант является комбинацией первых двух и осуществляется путем сброса пенетратора с посадочного модуля, имеющего некоторую скорость. Включение двигателя производится на участке движения пенетратора по инерции. При этом проникновение в лунный грунт осуществляется

как за счет кинетической энергии пенетратора, так и за счет тяги ракетного двигателя твердого топлива.

Очевидно, от того, каким образом запускается пенетратор, глубина проникания его в реголит будет различной [2]. В частности, если тяга двигательной установки меньше статического сопротивления, то, при запуске пенетратора с нулевой скоростью входа, движение в лунном грунте не произойдет. С другой стороны, целесообразный вариант использования имеющейся на участке спуска кинетической энергии пенетратора требует учета прочности его конструкции по причине высокого уровня ударных перегрузок, действующих в момент входа пенетратора в лунный грунт [3]. Кроме этого, при проведении анализа использования инерционного или снабженного двигательной установкой пенетраторов необходимо вести сравнение при одинаковых значениях их массогабаритных характеристик, которые в данном исследовании представлены наружным диаметром пенетратора ($D_H=0,2$ м); массой полезной нагрузки ($M_{ПН}=10$ кг), суммарной (полной) массой пенетратора ($M_{П}=20$ кг) и диапазоном предельно допустимых перегрузок:

$$n_x = 5000 \div 10000.$$

Уравнение движения пенетратора с работающей двигательной установкой в реголите (без учета силы тяжести) запишется следующим образом:

$$m \frac{dV}{dt} = R - F, \quad (1)$$

где m – текущее значение массы пенетратора; R – тяга двигателя; F – сила сопротивления грунта; V и t – скорость и время движения пенетратора.

Известно [4], что сила сопротивления грунта при движении пенетратора со скоростью V может быть определена зависимостью вида

$$\begin{aligned} F &= F_0 + BV^2, \\ F_0 &= \pi \frac{D_H^2}{4} F_{0уд}; \\ B &= \frac{\pi}{4} D_H^2 C_x \frac{\rho_r}{2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $F_{0уд}$ – удельное статическое сопротивление грунта, значение которого для некоторых грунтов представлены в табл. 1; ρ_r – плотность грунта; C_x – коэффициент сопротивления грунта, зависящий от соотношения скорости движения пенетратора к скорости звука в грунте.

Если скорость звука $V_{зв}$ достаточно мала по сравнению со скоростью движения V , то C_x становится величиной почти постоянной.

При $\frac{V}{V_{зв}} \approx 1$ значение C_x может

весьма сильно измениться при малых изменениях скорости движения. Наконец,

при $\frac{V}{V_{зв}} \geq 1$ величина C_x может считаться

постоянной при изменениях скорости V в интервалах, небольших по сравнению с $V_{зв}$. Кроме того, C_x в некоторой мере зависит от числа Рейнольдса.

Расчеты по формуле (2) дают сравнительно хорошие результаты, но для практического использования ее необходимо определить коэффициент сопротивления экспериментальным путем.

Таблица 1

Значение удельных лобовых сопротивлений для некоторых грунтов

№ n/n	Наименование грунта	$F_{0уд}$ МПа
1	Суглинки и глины	6÷8
2	Иловатые суглинки и торф	2,5÷4
3	Суглинки с галькой	>10
4	Песок рыхлый	2,5÷5
5	Песок средней плотности	5÷10
6	Песок плотный	10÷20
7	Песок очень плотный	>20
8	Мягкопластичная глина, торф, насыпь	<1,0
9	Слабые известняки	6÷8
10	Сухая плотная глина	40÷50

Оценить порядок величины C_x можно путем представления грунта моделью «пластического газа», предложенной А. Я. Сагомояном [5]. В частности, для твердого тела цилиндрической формы с конической головной частью получено выражение для определения коэффициента B в формуле (2) в виде

$$B = \frac{\pi}{4} D_H^2 C_x x \sin \beta \frac{\rho_0}{(v-0)b_1} \left[\frac{v-2}{v} \left(a^{\frac{v}{2}} - 1 \right) + b_1 (v-2) a^{\frac{v}{2}} - \left(a^{\frac{v}{2}-1} - 1 \right) \right],$$

$$\text{где } a = \frac{1}{1-b_1}; \quad b_1 = \frac{\rho_0}{\rho}; \quad x = 1 + \mu_0 \operatorname{ctg} \beta; \quad v = \frac{2\mu}{1+\mu};$$

$\mu = \sin \varphi$; μ_0 – коэффициент трения скольжения, равный $\sim 0,3$ для стали по грунту; b_1 – отношение плотностей перед и за ударной волной в грунте, равное при высоких скоростях движения $\sim 0,6$; $\beta = 30^\circ$ – угол полураствора головного конуса пенетратора; φ – угол внутреннего трения грунта, равный $\sim 30^\circ$ для грунта средней плотности.

Подставляя значения характеристик грунта средней плотности в формулу (3) и сравнивая ее с выражением (2), получаем величину $C_x = 1,7$.

Коэффициент сопротивления грунта [2] зависит от параметра $\theta = V \sqrt{\frac{\rho_\Gamma}{\tau_s}}$; где ρ_Γ – плотность грунта; $\tau_s = 0,2 \div 0,8$ МПа – прочность грунта на сдвиг.

При малых значениях скорости движения коэффициент сопротивления грунта сильно зависит от V и значительно превышает $C_x = 1$, а при больших скоростях $\left(\frac{\tau_s}{\rho_\Gamma V^2} \ll 1 \right)$ практически не зависит от скорости и приближается к постоянному значению $C_x = 0,8$.

Интегрируя уравнение (1) при $R = 0$ (тяга двигателя отсутствует), определим глубину проникания пенетратора в лунный грунт при движении его по инерции

$$L = \frac{4M_\Pi}{\pi C_x \rho_\Gamma D_H^2} \ln \left(1 + \frac{BV_{\text{вх}}^2}{F_0} \right). \quad (3)$$

Кроме полученной нами зависимости (3), для определения глубины проникновения пенетратора по инерции, в первом приближении, можно воспользоваться Березанской формулой [6], полученной экспериментальным путем для внедрения артиллерийских снарядов в разные преграды

$$L = \lambda K_\Pi \frac{M_\Pi}{D_H^2} V_{\text{вх}}, \quad (4)$$

где $\lambda = 1 \div 1,5$ – при удлинении головной части от 1,5 до 2,5; M_Π – масса проникающего пенетратора в кг; D_H – диаметр пенетратора в м; $V_{\text{вх}}$ – скорость входа пенетратора в преграду (грунт) в м/с; K_Π – коэффициент, характеризующий свойства преграды, определяемый опытным путем, и некоторые значения которого представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значение коэффициента K_Π при проникании снаряда в некоторые преграды

№ n/n	Преграда	$K_\Pi \cdot 10^6$
1	Земля рыхлая, мягкая глина	10
2	Земля плотная, обыкновенный грунт	5,5
3	Плотная глина, мокрый песок	5
4	Мягкий грунт, глина с песком	4,5
5	Песчаник, известняк	3
6	Каменная кладка	2,5
7	Бетон	1,3
8	Железобетон	0,9

На рис. 1 представлены зависимости глубины проникания пенетратора в различные преграды для разных значений скорости входа пенетратора в преграду (грунт).

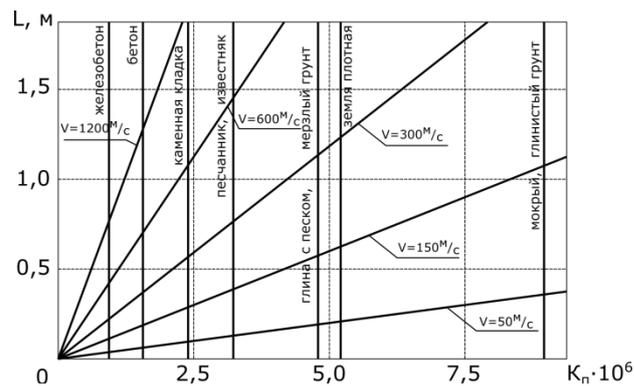


Рис. 1. Зависимость глубины проникания пенетратора в различные преграды для различных значений скорости входа пенетратора

Относительно глубины проникания пенетратора по инерции следует отметить, что в настоящее время существуют несколько эмпирических формул, позволяющих рассчитать эту характеристику с достаточной для предварительного анализа точностью.

Кроме формулы (4), в литературе можно встретить зависимость такого же типа, предложенную в свое время Валье, Вуичем, Забудским, Нобиле, Пересом, Петри и другими исследователями [7]. Принципиальной разницы между всеми этими формулами нет, и внешнее отличие отражает лишь индивидуальный подход каждого из авторов к решению поставленной задачи.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙСТВУЮЩИХ ПЕРЕГРУЗОК

При анализе возможных внешних нагрузок легко установить, что наибольшими из них являются нагрузки при встрече пенетратора с грунтами. В связи с этим именно момент входа пенетратора в грунт принимается расчетным для определения минимально допустимой толщины стенки корпуса.

Экспериментально установлено, что величина перегрузки n_x , действующей на инерционный пенетратор, зависит от глубины проникания [8]. При этом при углублении пенетратора примерно на длину головной части перегрузка достигает максимального значения. На остальном пути движения перегрузка постепенно снижается до нуля.

Опасное сечение пенетратора для расчета на прочность следует искать в момент времени, когда на него действует наибольшая инерционная перегрузка, т.е. действующие силы максимальны. Формально за опасное сечение можно принять любое экваториальное сечение. Однако учитывая тот факт, что деформации сечений в преграде ограничены противодействием самой среды, воспринимающего на себя часть нагрузки, следует принять, что истинное опасное сечение будет находиться в месте перехода конической части в цилиндрическую.

Очевидно, расчетным случаем для определения напряжения в опасном сечении является случай, когда определяющими процессами корпуса пенетратора являются напряжения, вызываемые действием инерционных сил конструкции, расположенной выше опасного сечения.

В этом случае пенетратор рассматривается как жесткая цилиндрическая оболочка, сжатая продольной силой, для которой напряжение сжатия σ_x определяется по формуле

$$\sigma_x = \frac{P_m n_x}{\frac{\pi}{4}(D_H^2 - d_B^2)} = \frac{\sigma_{сж}}{\varepsilon}, \quad (5)$$

где $P_m n_x$ – инерционная нагрузка корпуса пенетратора, лежащего выше опасного сечения; $2\sigma = (D - d_B)$ – толщина стенки пенетратора; $\sigma_{сж}$ – предел прочности материала на сжатие; ε – запас прочности; ($\sigma_{сж} = 600$ МПа); M_k – масса корпуса выше опасного сечения (в первом приближении $P_m = M_k g$).

Из формулы (5) путем решения квадратного уравнения получаем формулу [3] для определения минимально допустимой толщины стенки

$$\delta_{\min} = \frac{D_H}{2} - \sqrt{\frac{D_H^2}{4} - \frac{P_m n_x \varepsilon}{\pi \sigma_{сж}}}. \quad (6)$$

Ориентировочный расчет максимальной перегрузки можно провести по известной кинетической энергии, которая затрачивается только на преодоление сопротивления среды прониканию пенетратора. В этом случае баланс энергии определяется в виде

$$\frac{M_{п\text{вх}} V_{\text{вх}}^2}{2} = A_{\text{сопр}}, \quad (7)$$

где $A_{\text{сопр}}$ – полная работа сил сопротивления среды.

В первом приближении можно принять, что сила сопротивления по мере углубления пенетратора изменяется по линейному закону от некоторого F_{max} до нуля, т.е.

$$A_{\text{сопр}} = \frac{1}{2} F_{\text{max}} L = \frac{1}{2} M_{п\text{вх}} n_x g L, \quad (8)$$

где $F_{\text{max}} = M_{п\text{вх}} g$; L – глубина проникания пенетратора.

Из выражений (7) и (8) получаем:

$$n_x = \frac{V_{\text{вх}}^2}{gL}. \quad (9)$$

Подставляя в (9) глубину проникания, определяемую по формуле (4), будем иметь:

$$n_x = \frac{V_{\text{вх}} D_H^2}{\lambda K_{п} M_{п} g}. \quad (10)$$

Задаваясь предельно допустимым уровнем перегрузок для пенетратора n_x , из вы-

ражения (10) получаем формулу для определения предельной скорости входа пенетратора в грунт по инерции [9].

$$V_{\text{вх}}^{\text{доп}} = \frac{n_x^{\text{доп}} g M_{\text{п}} \lambda K_{\text{п}}}{D_{\text{н}}^2}. \quad (11)$$

На рис. 2 представлена зависимость предельной скорости входа пенетратора в различные грунты для некоторых значений предельно допустимой перегрузки.

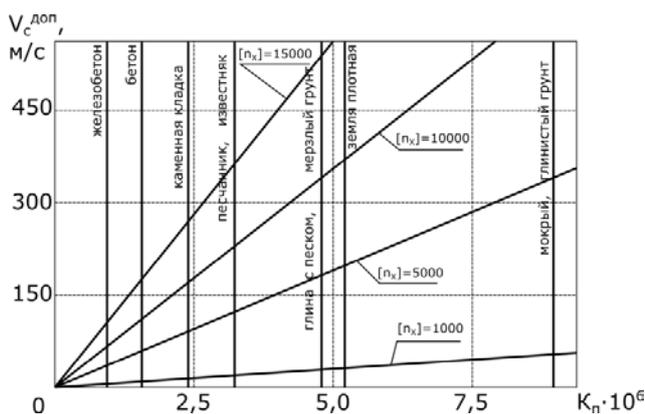


Рис. 2. Зависимость предельной скорости входа пенетратора в различные преграды для некоторых допустимых перегрузок

Следует отметить, что результаты расчетов по определению глубин проникания и допустимых скоростей входа пенетраторов в грунты по инерции, проведенные по формулам (3), (4) и (11), с достаточной для инженерной практики точностью совпадают. Это обстоятельство позволяет утверждать и то, что при определении глубины проникания пенетратора с работающим двигателем правомерно при определении сопротивления лунного грунта пользоваться выражением (2).

Анализ уравнения движения (1) показывает, что при входе пенетратора в лунный грунт с включенной двигательной установкой ($R > 0$), отрицательная перегрузка от сопротивления реголита компенсируется тягой двигателя (в частности, когда $R = F$ будет равна нулю). Из сказанного можно сделать вывод, что при заданном значении предельно допустимых перегрузок, действующих на пенетратор, путем включения двигательной установки в определенный момент времени, для получения большей глубины про-

никания имеет возможность увеличивать его допустимую скорость входа в лунный грунт.

Кроме этого, используя пенетратор с ракетным двигателем твердого топлива, можно при существенно меньшем уровне перегрузки достигать больших глубин проникания в реголит.

В том случае, когда пенетратор запускается с поверхности Луны с нулевой скоростью входа в реголит [10], тяга двигателя должна в обязательном порядке быть больше статического сопротивления среды (иначе движение в лунном грунте не произойдет).

Из теории проектирования реактивных аппаратов для движения в грунте [2] известно, что для достижения максимальной глубины проникания при заданных энергетических затратах в виде массы твердого топлива необходимо, чтобы тяга ракетного двигателя в два раза превышала силу статического сопротивления среды, т.е. $R = 2F_0$. При этом из уравнения (1) следует, что оптимальная скорость движения пенетратора будет определяться по формуле:

$$V_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{2F_{0\text{уд}}}{C_x \rho_{\text{т}}}}. \quad (12)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ МАССЫ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

В работах [4–6] получена зависимость между потребной массой твердого топлива, параметрами скважины, характеристиками среды и пенетратора в случае запуска пенетратора с нулевой скоростью входа в грунт. Эта зависимость имеет следующий вид:

$$M_{\text{т}} = \frac{LD_{\text{н}}^2 \sqrt{2C_x \rho_{\text{т}} F_{0\text{уд}}}}{4I_{\text{ед}}}, \quad (13)$$

где кроме упоминаемых величин $M_{\text{т}}$ – потребная масса топлива для достижения глубины L ; $I_{\text{ед}}$ – единичный импульс твердого топлива, определяющий величину тяги твердотопливного двигателя при сжигании 1 кг топлива.

Известно [3], что для твердотопливных двигателей

$$R = I_{\text{ед}} \rho_{\text{т}} S_{\text{гор}} U_{\text{гор}}, \quad (14)$$

где ρ_t , $S_{гор}$, $U_{гор}$ – плотность, поверхность горения и скорость горения твердого топлива, соответственно.

В табл. 3 приведены основные результаты расчетов потребной массы топлива для пенетраторов различных диаметров на глубину, равную 100 калибрам. Из таблицы, в частности, видно, что для проникания пенетратора диаметром $D_n=0,2$ м на глубину $L=20$ м требуется масса твердого топлива, равная $M_T=40,9$ кг, т.е. при $M_T=1$ кг можно образовать скважину заданного диаметра глубиной $L=0,5$ м.

Из условий прочности конструкции ракетного двигателя [11], масса топлива составляет лишь половину массы снаряженного двигателя. При прочих равных условиях для инерционного и реактивного пенетраторов, по заданным в настоящем исследовании данным масса топлива может составить порядка $M_T=5$ кг, что позволяет проникать подобному аппарату на глубину $L=2,5$ м при запуске его с нулевой скоростью входа в грунт, либо увеличить на 2,5 м глубину проникания, сбрасываемого с насадочного модуля пенетратора с предельной скоростью входа в реголит.

Таблица 3

Результаты расчетов характеристик пенетраторов различных диаметров

Характеристика	Диаметр пенетратора		
	0,2	0,06	0,025
L , м	20	6	2,5
$F_{0уд}$, МПа	7		
ρ_t , кг/м ³	1800		
C_x	1		
$I_{ед}$, м·с/кг	2500		
$U_{гор}$, м/с	0,7		
V_{opt} , м/с	88		
R , кН	440	39,5	6,9
T , с	23	0,07	0,03
M_T , кг	40,9	1,1	0,08
ρ_t , кг/м ³	1600		
$S_{гор}$, м ²	0,157	0,014	0,0024
$S_{мр}$, м ²	0,0314	$2,8 \times 10^{-3}$	$0,5 \times 10^{-3}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для исследования подповерхностных слоев Луны и других планет солнечной системы целесообразно применять инерционные пенетраторы, сбрасываемые с посадоч-

ного модуля на участке его спуска с орбиты планеты и использующие для проникания в грунты имеющуюся кинетическую энергию. Глубина проникания при этом зависит от массогабаритных характеристик пенетратора и скорости его входа в грунт, которая ограничена уровнем допустимых перегрузок.

Для инерционного пенетратора массой $M_n=20$ кг и диаметром $D_n=0,2$ м с уровнем допустимых перегрузок $n_x=5000 \div 10000$ при входе его в планетный грунт ($K_n=5,5 \times 10^{-6}$) предельные скорости входа будут лежать в диапазоне $V_{вх}=195 \div 390$ м/с, а глубина проникания в грунтовое полупространство составит $L=0,9 \div 1,8$.

2. Использование на пенетраторе твердотопливного двигателя позволяет увеличить допустимую скорость входа пенетратора в грунт за счет снижения действующих на него перегрузок, и тем самым увеличить глубину проникания. В частности, для рассматриваемого в качестве примера пенетратора массой $M_n=20$ кг наличие двигателя с массой твердого топлива $M_T=5$ кг позволяет увеличить допустимую скорость входа и глубину проникания пенетратора в грунт в $1,5 \div 2$ раза.

3. При организации процесса проникания пенетратора таким образом, чтобы тяга твердотопливного двигателя была в два раза выше статического сопротивления грунта, можно существенно увеличить глубину проникания пенетратора. При этом в частном случае возможен запуск пенетратора с нулевой скоростью входа в грунт. Для рассматриваемого в работе примера каждый килограмм топлива обеспечивает увеличение глубины проникания пенетратора на 0,5 м.

4. Если в момент входа пенетратора в грунт обеспечить включение двигателя с тягой направленной в сторону движения пенетратора и равной по величине силе сопротивления грунта, то перегрузка, действующая на полезную нагрузку, будет равной нулю. Это обстоятельство позволяет, используя взрывореактивные твердотопливные двигатели, создавать высокоскоростные инерционные пенетраторы глубокого проникания, обеспечивающие приемлемый уровень действующих перегрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Родченко В. В.** Основы проектирования реактивных аппаратов для движения в грунте. М.: МАИ-ПРИНТ, 2007. [V. V. Rodchenko, *Principles of design of a jet apparatus for movement in the soil*, (in Russian). Moscow: MAI-PRINT, 2007.]

2. **Федоров С. В., Федорова Н. А.** Влияние импульса реактивной тяги на глубину проникания исследовательского зонда в грунт планеты // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 1 (13). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-1-571 [S. V. Fedorov, N. A. Fedorova, "Influence of the jet thrust impulse on depth of the research probe penetration into planet soil", (in Russian), in *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, no. 1 (13), 2013.]

3. **Veldanov V. A., Smirnov V. E., Khavroshkin O. B.** Lunar penetrator: Reducing overload and penetration control. *Solar System Research*, 1999, 33(5), pp. 432–436. [V. A. Veldanov, V. E. Smirnov, O. B. Khavroshkin, Lunar penetrator: Reducing overload and penetration control. *Solar System Research*, 1999, 33(5), pp. 432–436.]

4. **Ильющин А. А.** Механика сплошной среды. М.: МГУ, 1990, 310 с. [A. A. Ilushin, *Continuum mechanics*, (in Russian). Moscow: MGU, 1990.]

5. **Сагомоян А. Я.** Проникание. М.: Изд-во Московского ун-та, 2014. 298 с. [A. Ya. Sagomonyan, *Penetration*, (in Russian). Moscow: Izd-vo Moskovskogo un-ta, 2014.]

6. **Казанцев В. Г., Карпутин М. П.** Применение механики разрушения к обоснованию выбора рациональных вариантов конструктивных элементов зарядов РДТТ // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2015. № 41. С. 139–157 [V. G. Kazantsev, M. P. Karputin, "Application of fracture mechanics to choose the rational variants of design elements in solid propellant rocket motor grains", (in Russian), in *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aero-kosmicheskaya tekhnika*, no. 41, pp. 139-157, 2015.]

7. **Велданов В. А., Даурских А. Ю. и др.** Возможности моделирования проникания тел в грунтовые среды // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 9 (21). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-9-947. [V. A. Veldanov, A. Yu. Dauriskikh, et. al., "Possibilities of modeling body penetration in soils", (in Russian), in *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, no. 9 (21), 2013. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-9-947.]

8. **Выбор** земных грунтов-аналогов как среды для движения лунного реактивного пенетратора / В. В. Родченко и др. // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2017. № 28–30 (240–242), С. 69–81. [V. V. Rodchenko, et. al., "The Selection of Terrestrial Soil-Analogs as a Medium for Movement of Lunar Reactive Penetrator", (in Russian), in *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya*, no. 28-30 (240-242), pp. 69-81, 2017.]

9. **Родченко В. В., Садретдинова Э. Р., Гусев Е. В.** Выбор параметров пенетратора для исследования лунного грунта // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17, № 3. С. 11. [V. V. Rodchenko, E. R. Sadretdinova, E. V. Gusev, "The choice of parameters of a penetrator for research of lunar soil", (in Russian), in *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, vol. 17, no. 3, p. 11, 2010.]

10. **Выбор** параметров пенетратора, входящего в лунный грунт с нулевой скоростью / В. В. Родченко и др. // Труды МАИ. 2013. № 64. URL:

<http://trudymai.ru/published.php?ID=36455> [V. V. Rodchenko, et. al. "The choice of the parameters of the penetrator, is included in the lunar soil from zero velocity", (in Russian), in *Trudy MAI*, no. 64, 2013. Available: <http://trudymai.ru/published.php?ID=36455>]

11. **Сорокин Р. Е.** Газотермодинамика ракетных двигателей на твердом топливе. М.: Наука, 1967. 368 с. [R. E. Sorokin, *Hattermultimedia of rocket engines for solid engines*, (in Russian). Moscow: Nauka, 1967.]

ОБ АВТОРАХ

РОДЧЕНКО Владимир Викторович, д-р техн. наук (1991 г.), проф. (1994 г.), почетный работник Высшей школы (2006 г.), действительный член Российской академии космонавтики им. К. Э. Циолковского (2012 г.), проф. каф. «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» Московского авиационного института (национального исследовательского университета). Иссл. в обл. теории и практики создания реактивных устройств, способных двигаться в грунтах с высокими скоростями.

ЗАГОВОРЧЕВ Владимир Александрович, доц. каф. «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), дипл. инженер-испытатель (МАИ, 2011). канд. техн. наук. Иссл. в обл. проектирования и отработки грунтовых реактивных аппаратов; систем автоматизированного проектирования.

САДРЕТДИНОВА Эльнара Рамилевна, доц. каф. «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), дипл. инженер-испытатель (МАИ, 2008). канд. техн. наук. Иссл. в обл. теории создания реактивных устройств, способных двигаться в грунтах; управления эксплуатацией ракетно-космической техники.

ПРОНИНА Полина Федоровна, асп. каф. «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), дипл. магистр (МАИ, 2018). Иссл. в обл. экологической безопасности ракетно-космической техники; моделирования тепловых процессов в технике.

METADATA

Title: The use of reactive penetrators for movement in the lunar soil.

Authors: V. V. Rodchenko¹, V. A. Zagovorchev², E. R. Sadretdinova³, P. F. Pronina⁴

Affiliation: Moscow Aviation Institute (National Research University), Russia.

Email: ¹ rodchenkovv@mai.ru, ² zagovorchev@mai.ru, ³ ers@mai.ru, ⁴ kaf610@mai.ru

Language: Russian.

Source: *Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 1 (83), pp. 56-63, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The possibility of using penetrators to study the subsurface layers of the moon is being considered. These devices form a borehole by compaction and can move in the ground due to both kinetic energy and thrust from a solid-fuel rocket engine. Possible options for launching such penetrators are indicated. From the way in which the

launch is carried out, the depth of penetration into the regolith will be different. In particular, if the propulsion of the propulsion system is less than the static resistance, then when the penetrator is started up with a zero entry speed, movement in the lunar soil will not occur. The dependences are given allowing to calculate with sufficient accuracy the mass of the penetrator, the depth of penetration and the resulting overloads. The depth of penetration of the inertial penetrator depends on its mass-dimensional characteristics and the speed of entry into the soil, which is limited by the level of permissible overloads. The use of a solid fuel engine in the penetrator allows increasing the allowable speed of the penetrator entering the ground by reducing the overloads acting on it, and thereby increasing the penetration depth.

Key words: penetrator; moon; soil; regolith; intrusion.

About authors:

RODCHENKO, Vladimir Viktorovich, Dr. of Tech. Science (1991), Professor (1994), Honorary Worker of Higher School (2006), member of the K. E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics (2012), professor of "Management of exploitation in rocket and space systems" department in Moscow Aviation Institute (National Research University). Research in the field of theory and practice of jet devices designing that can move in the ground at high speeds.

ZAGOVORCHEV, Vladimir Aleksandrovich, associate prof. Candidate of Tech. Sciences, Test engineer (MAI, 2011). Research in the field of design and development of ground-based reactive devices; CAD systems.

SADRETDINOVA, Elnara Ramilevna, associate prof. Cand. of Tech. Sciences, Test engineer (MAI, 2008). Research in the field of theory of jet devices designing that can move in the ground; control of the operation of rocket and space technology.

PRONINA, Polina Fedorovna, graduate student. Master (MAI, 2018). Research in the field of environmental safety of rocket and space technology; modeling of thermal processes in engineering.