электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

 # 11, ноябрь 2015

УДК 523.36; 531.58

Влияние прочностных свойств поверхностного слоя космического тела на глубину проникания реактивных пенетраторов

***Федорова Н.А.**, студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Высокоточные летательные аппараты»

Научный руководитель: Федоров С.В., старший преподаватель
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Высокоточные летательные аппараты»
kafsm4@bmstu.ru

Одной из задач, возникающих при освоении околоземного космического пространства, является получение информации о строении и свойствах поверхностного слоя различных космических тел (планет, астероидов, комет). Для ее решения могут быть использованы высокоскоростные проникающие модули (пенетраторы), оснащаемые датчиками и приборами различного назначения. Заглубляясь за счет имеющегося у них запаса кинетической энергии в породы, слагающие верхние слои коры космического тела, такие исследовательские модули-пенетраторы осуществляют сбор и передачу необходимых данных на Землю для их последующего анализа.

При проникании с большой скоростью в поверхностные слои космического тела пенетратор подвергается воздействию чрезвычайно высоких перегрузок, которые не должны приводить ни к разрушению его самого, ни к выходу из строя размещенной внутри его корпуса аппаратуры. Перегрузки, действующие на пенетратор при проникании, возрастают с увеличением его начальной скорости, что ограничивает ее предельно допустимые значения. Для обеспечения целостности пенетратора и сохранения работоспособности его приборной «начинки» начальная скорость пенетратора по данным исследований проникания ударников в грунтово-скальные преграды [1] не должна превышать 1000…1500 м/с. По указанной причине возможности увеличения глубины проникания пенетраторов, что представляет собой весьма актуальную задачу, за счет повышения их скорости фактически отсутствуют.

С целью повышения проникающей способности в состав пенетратора может быть введен лидер, который не несет в себе никакой регистрирующей аппаратуры для определения свойств пенетрируемой породы и единственным назначением которого является формирование в преграде каверны (канала) необходимой протяженности [2]. Скорость лидера может существенно превышать скорость следующего за ним модуля-пенетратора с приборным оснащением и составлять несколько километров в секунду. При таких скоростях проникание лидера в грунтово-скальную преграду будет происходить в гидродинамическом режиме (с «растеканием» материала проникающего тела по стенкам формирующейся в преграде каверны). Определяющее влияние на глубину проникания тела в гидродинамическом режиме оказывают его длина и плотность [3]. В связи с этим лидер должен иметь форму удлиненного стержня и быть изготовленным из материала (металла) возможно большей плотности. С использованием результатов [4] может быть также учтено влияние на проникание стержня-лидера сжимаемости его материала и материала грунтово-скальной преграды. Определенные преимущества в проникании лидера при реализации гидродинамического режима взаимодействия достигаются за счет его сегментирования [5] и изготовления из пористого материала (например, пористого вольфрама) [6]. Проникание стержня-лидера происходит до момента полного «размазывания» всего его материала (или материала всех элементов сегментированного лидера) по поверхности сформированной в преграде каверны, в результате чего она оказывается «подготовленной» для беспрепятственного движения исследовательского модуля-пенетратора (рис.1).

Что касается непосредственно самого модуля-пенетратора с приборным оснащением, то в качестве возможного пути повышения его проникающей способности может рассматриваться использование импульсного реактивного двигателя, срабатывающего на определенной стадии проникания в преграду [7, 8]. Данный вариант функционирования пенетратора остается пригодным для реализации как в случае отсутствия лидера, так и при его наличии (во втором случае пенетратор, прежде чем начать проникание с «включением» реактивной тяги, сначала движется в преграде по сформированной лидером каверне).

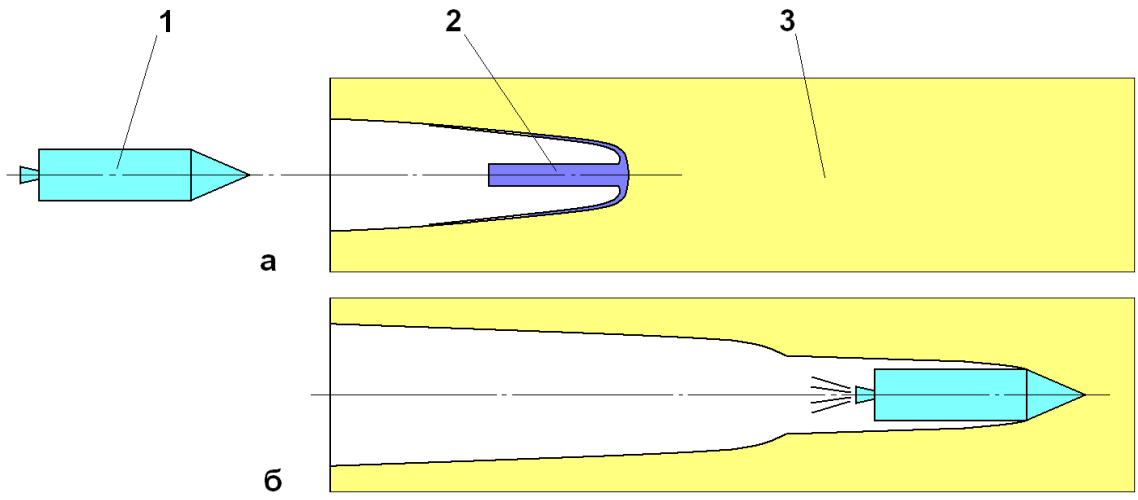

Рис. 1. Схема проникания в грунтово-скальную преграду реактивного пенетратора с имеющим более высокую скорость лидером (1 – реактивный пенетратор; 2 – лидер; 3 – грунтово-скальная преграда): а – стадия проникания лидера в гидродинамическом режиме; б – стадия проникания реактивного пенетратора

Целью исследований, проводившихся при выполнении настоящей работы, являлось выяснение расчетным путем влияния на возможный прирост глубины проникания пенетратора за счет сообщения ему в процессе движения в преграде дополнительного импульса реактивной тяги прочностных свойств пород поверхностного слоя космического тела.

При проведении расчетов предполагалось, что нагрузки, действующие на модуль-пенетратор при проникании, не приводят к его большим деформациям, так что в процессе движения он может рассматриваться, как абсолютно твердое недеформируемое тело. Сила сопротивления преграды находилась в рамках простого инженерного подхода [9] с использованием эмпирических зависимостей для вычисления механических напряжений, действующих на поверхности контакта головной части пенетратора с преградой [10, 11]:

$$\sigma_n = Av_n^2 + C\,; \quad \tau_n \approx 0{,}5C\,, \tag{1}$$

где σ_n, τ_n – соответственно, нормальные и касательные напряжения на контактной поверхности; A и C − эмпирические коэффициенты, зависящие от физико-механических свойств материала преграды и характеризующие ее, соответственно, инерционное и прочностное сопротивление прониканию; v_n − проекция скорости ударника v на нормаль к поверхности его головной части в данной точке. Как и в [12, 13], форма головной части ударника предполагалась конической с углом раствора 2γ.

При задании силы реактивной тяги F_r скорость истечения газовой струи u и массовый расход газа μ предполагались неизменными в течение всего промежутка времени работы реактивного двигателя, что, соответственно, обеспечивало неизменность значения F_r на стадии ее действия. При этом время включения реактивного двигателя t_{r0} и продолжительность его работы τ_r являлись варьируемыми параметрами (рис.2).

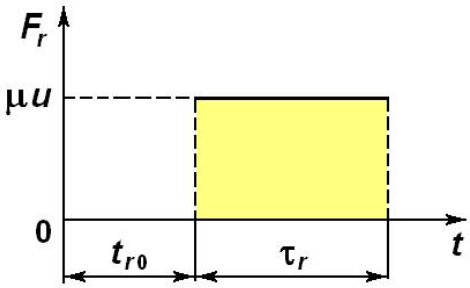

Рис. 2. Закон изменения реактивной силы

На основе анализа математической постановки задачи была введена система безразмерных параметров, позволяющих обобщить результаты ее решения для пенетраторов произвольной массы и диаметра миделя [13]. При этом в качестве временного и пространственного масштабов были использованы время t_{p0} и глубина проникания h_{p0} инертного пенетратора (проникающего в отсутствие импульса реактивной тяги), идентичного по своим характеристикам пенетратору с реактивным двигателем:

$$t_{p0} = \frac{m_0}{S_m \sin\gamma \sqrt{AC(1+0{,}5\operatorname{ctg}\gamma)}} \operatorname{arctg}\left[\sqrt{\frac{A}{C(1+0{,}5\operatorname{ctg}\gamma)}}\, v_0 \sin\gamma\right];$$
$$h_{p0} = \frac{m_0}{2AS_m \sin^2\gamma} \ln\left[\frac{Av_0^2 \sin^2\gamma}{C(1+0{,}5\operatorname{ctg}\gamma)} + 1\right], \qquad (2)$$

где m_0 – масса пенетратора; S_m – площадь миделя; v_0 – начальная скорость.

Соотношение массы твердотопливного заряда m_r с полной начальной массой реактивного пенетратора m_0 характеризовалось числом Циолковского $Z = m_r/(m_0 - m_r)$.

В проведенных расчетах было рассмотрено проникание пенетраторов с импульсным реактивным двигателем в грунтово-скальные преграды трех разновидностей, контрастные по прочностным свойствам, – типа плотного грунта, горной породы малой прочности и высокопрочной горной породы. Задававшиеся для данных преград коэффициенты A и C в законе сопротивления (1), экспериментальное определение

которых может быть осуществлено посредством пьезоакселерометрии проникания [14], выбирались следующими [10]: $A = 1900$ кг/м^3; $C = 4$ МПа для плотного грунта, $A = 2200$ кг/м^3; $C = 20$ МПа для горной породы малой прочности и $A = 2400$ кг/м^3; $C = 100$ МПа для высокопрочной горной породы. Начальная скорость пенетраторов варьировалась от 250 до 1000 м/с, а масса ракетного топлива составляла от 10 до 30 % от общей массы пенетратора. Скорость истечения газа из реактивного двигателя пенетратора, определяющая в сочетании с его массовым расходом силу реактивной тяги, выбиралась на уровне, обеспечиваемом современными ракетными топливами, и составляла 2000 м/с. Коническая головная часть пенетратора имела угол раствора $2\gamma = 45^0$.

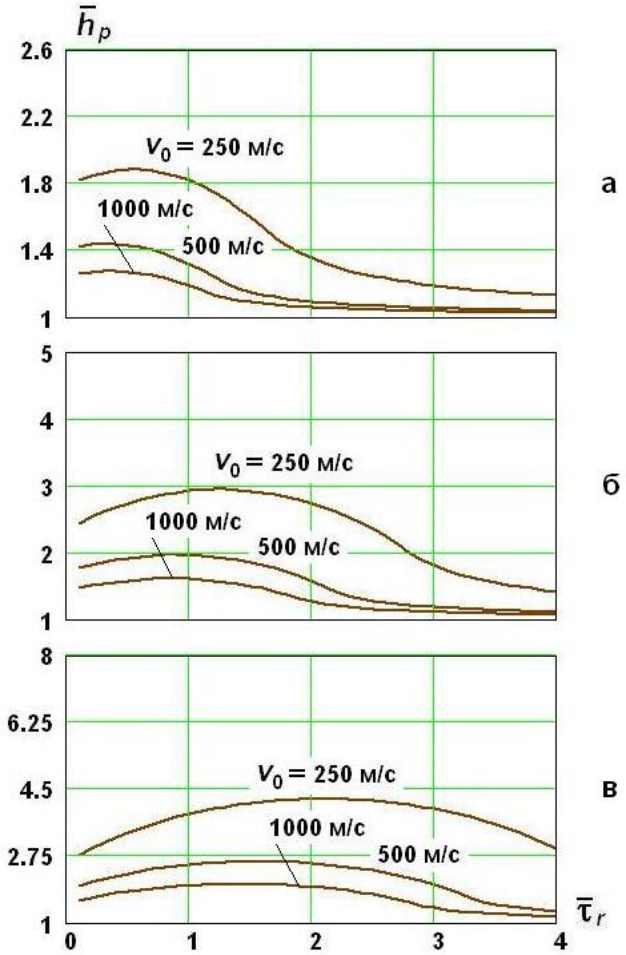

Рис. 3. Относительная глубина проникания реактивного пенетратора в плотный грунт при различной массе твердотопливного заряда: а – $Z = 0{,}1$; б – $Z = 0{,}25$; в – $Z = 0{,}5$

На рис. 3 – рис.5 представлены результаты расчетов по определению относительной результирующей глубины проникания $\bar{h}_p = h_p / h_{p0}$ пенетраторов с

реактивным двигателем (h_{p0}– глубина проникания эквивалентного пенетратора без реактивного двигателя (2)) в различные типы грунтово-скальных преград при значениях числа Циолковского 0,1; 0,25 и 0,5 и начальных скоростях ударников 250, 500 и 1000 м/с. В расчетах был рассмотрен весь возможный диапазон изменения значений $\bar{t}_{r0} = t_{r0}/t_{p0}$ (относительного времени начала действия реактивной силы) – от «запуска» реактивного двигателя сразу же в момент начала проникания ($\bar{t}_{r0} = 0$) до его «включения» в момент полного останова ударника в преграде в результате торможения ($\bar{t}_{r0} = 1$).

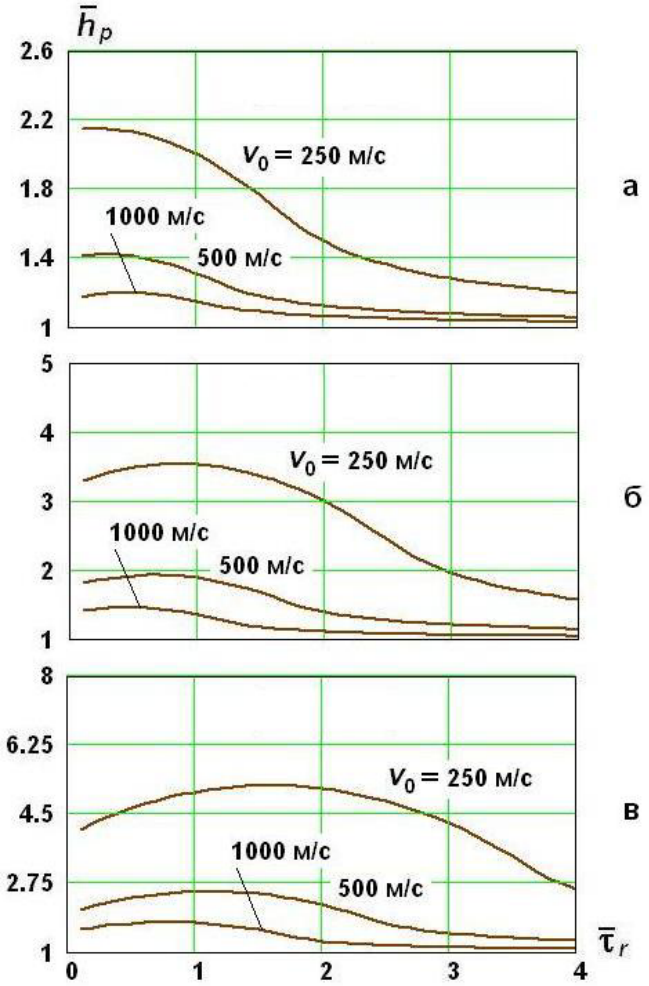

Рис. 4. Относительная глубина проникания реактивного пенетратора в горную породу малой прочности при различной массе твердотопливного заряда: а – Z = 0,1; б – Z = 0,25; в – Z = 0,5

Как показали расчеты, при различных временах «включения» реактивной тяги $\bar{t}_{r0}$ существует оптимальное время ее действия $\bar{\tau}_r = \tau_r/t_{p0}$, при котором обеспечивается максимальный прирост глубины проникания. Отметим, что изменение времени $\bar{\tau}_r$ при

фиксированном значении числа Циолковского Z (фиксированной массе ракетного топлива m_r) приводит к соответствующему изменению силы реактивной тяги F_r, пропорциональной массовому расходу $\mu = m_r/\tau_r$, – ее увеличению при уменьшении $\bar{\tau}_r$ и снижению в противоположном случае.

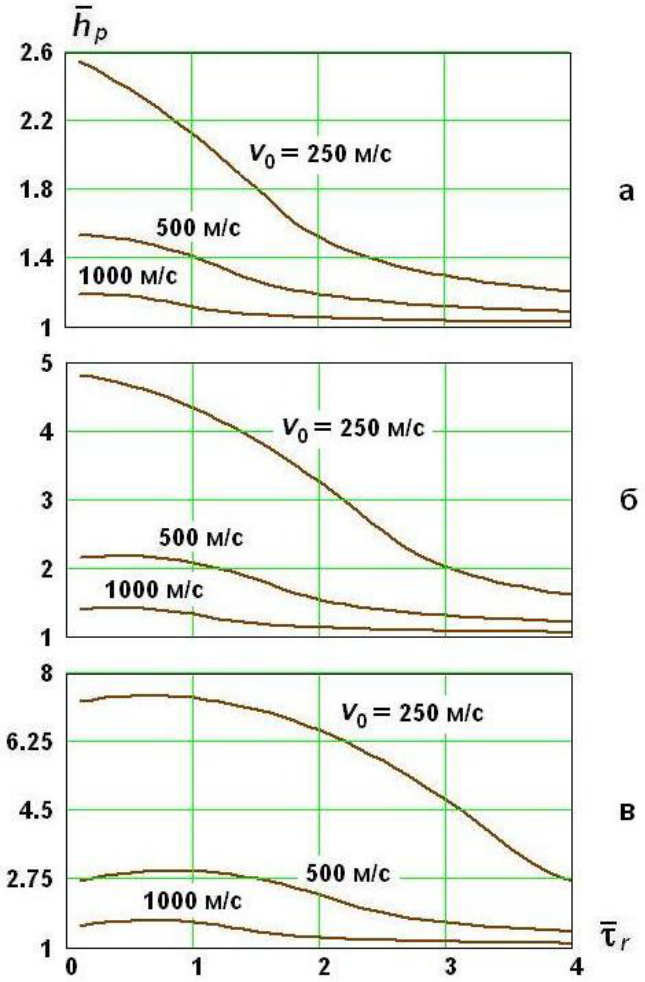

Рис. 5. Относительная глубина проникания реактивного пенетратора в высокопрочную горную породу при различной массе твердотопливного заряда: а – Z = 0,1; б – Z = 0,25; в – Z = 0,5

Для представленных на рис.3 – рис.5 данных безразмерное время «включения» реактивной тяги $\bar{t}_{r0}$ составляло от 0 до 0,5 (в зависимости от начальной скорости пенетратора и типа грунтово-скальной преграды) и выбиралось из условия достижения максимального прироста глубины проникания. Как оказалось, с увеличением начальной скорости некоторую выгоду дает сдвиг момента «запуска» реактивного двигателя на более позднее время $\bar{t}_{r0}$. Напротив, при уменьшении начальной скорости для получения

максимально возможного прироста $\bar{h}_p$ требуется уменьшение времени $\bar{t}_{r0}$ (вплоть до нулевого значения).

При начальной скорости пенетратора $v_0 = 250$ м/с максимально достижимое относительное увеличение глубины проникания при изменении числа Циолковского Z от 0,1 до 0,5 составляет от 1,85 до 4,3 для плотного грунта (рис.3); от 2,15 до 5,25 для горной породы малой прочности (рис.4) и от 2,55 до 7,3 для высокопрочной горной породы (рис.5). При этом практически во всех рассмотренных случаях при $v_0 = 250$ м/с для достижения максимального эффекта необходимо «запускать» реактивный двигатель сразу же в момент начала проникания ($\bar{t}_{r0} = 0$). Лишь для грунтовой преграды максимум на кривой изменения $\bar{h}_p$ при времени «включения» реактивной тяги $\bar{t}_{r0} = 0{,}25$ был на несколько процентов выше, чем при $\bar{t}_{r0} = 0$.

Отметим, что режим реактивного «доразгона» с $\bar{t}_{r0} = 0$ («включение» реактивной тяги в момент начала проникания) и с величиной $\bar{\tau}_r$, стремящейся к нулю (мгновенное сообщение реактивного импульса), соответствует фактически предварительному (до начала проникания в преграду) ускорению пенетратора за счет работы реактивного двигателя, в результате чего начальная скорость взаимодействия пенетратора с преградой возрастает, а его масса вследствие выгорания ракетного топлива уменьшается. Таким образом, при $\bar{t}_{r0} = 0$ и $\bar{\tau}_r = 0$ проникание реактивного пенетратора, имеющего начальную скорость v_0 и начальную массу m_0, фактически эквивалентно прониканию инертного пенетратора (без действия реактивного импульса в процессе взаимодействия с преградой), у которого значения начальной скорости и массы составляют, соответственно, $v_0 + u\ln(1+Z)$ и $m_0/(1+Z)$ [12].

Режим предварительного реактивного «доразгона» ($\bar{t}_{r0} = 0$, $\bar{\tau}_r = 0$) при относительно невысокой скорости пенетратора ($v_0 = 250$ м/с) дает максимальный эффект по увеличению глубины проникания для достаточно прочных грунтово-скальных преград (горных пород малой и высокой прочности) при небольших значениях числа Циолковского. С увеличением значения Z и в случае преград с высоким прочностным сопротивлением для получения максимального прироста $\bar{h}_p$ при $v_0 = 250$ м/с необходимо переходить к режимам, при которых двигатель работает непосредственно на стадии движения пенетратора в преграде.

При начальной скорости пенетратора $v_0 = 500$ м/с режим работы реактивного двигателя с $\bar{t}_{r0} = 0$ и $\bar{\tau}_r = 0$ выгоден только при проникании в высокопрочную горную породу (рис.5) при небольшой относительной массе ракетного топлива ($Z = 0{,}1$). Во всех остальных случаях оптимальное относительное время действия реактивной тяги $\bar{\tau}_r$ отлично от нуля и возрастает с увеличением числа Циолковского.

Анализ полученных результатов при еще большей скорости пенетратора ($v_0 = 1000$ м/с) свидетельствует о том, что при малых значениях числа Циолковского ($Z = 0{,}1$) для грунтово-скальных преград с достаточно высокой прочностью наибольшее повышение эффективности проникания происходит в случае предельно коротких импульсов реактивной тяги ($\bar{\tau}_r \approx 0$), но сообщаемых не в режиме предварительного «доразгона» ($\bar{t}_{r0} = 0$), как это было при малой скорости пенетратора ($v_0 = 250$ м/с), а уже в процессе его движения в преграде ($\bar{t}_{r0} \approx 0{,}5$ для горной породы малой прочности и $\bar{t}_{r0} \approx 0{,}25$ для высокопрочной горной породы). С увеличением относительной массы ракетного топлива до $Z = 0{,}25$ достигаемый эффект увеличения глубины проникания при $v_0 = 1000$ м/с проявляется в наибольшей степени, если $\bar{t}_{r0} \approx 0{,}5$; $\bar{\tau}_r \approx 0{,}4$ для горной породы малой прочности и $\bar{t}_{r0} \approx 0{,}25$; $\bar{\tau}_r \approx 0{,}4$ для высокопрочной горной породы. При $Z = 0{,}5$ оптимальная продолжительность реактивного импульса для обеих преград с достаточно высоким прочностным сопротивлением возрастает примерно до 0,7…0,8 (рис.4, рис.5). Что касается малопрочной грунтовой преграды, то при скорости ударника 1000 м/с для получения наибольшего прироста глубины проникания выгодно «включать» реактивную тягу через время $\bar{t}_{r0} = 0{,}5$ от начала взаимодействия и задавать время $\bar{\tau}_r$ ее действия равным 0,3 при $Z = 0{,}1$; 0,8 при $Z = 0{,}25$ и 1,4 при $Z = 0{,}5$ (рис.3).

Как видно из рис.3 – рис.5, с увеличением начальной скорости пенетратора эффективность его реактивного «доразгона» существенно снижается для всех рассмотренных грунтово-скальных преград. Так, если при $Z = 0{,}25$ и $v_0 = 250$ м/с глубину проникания реактивного пенетратора при надлежащем выборе параметра $\bar{\tau}_r$ можно увеличить в 3 раза для плотного грунта; в 3,6 раза для горной породы малой прочности и почти в 5 раз для высокопрочной горной породы, то при начальной скорости 1000 м/с и том же количестве ракетного топлива (том же значении Z) максимально возможный прирост $\bar{h}_p$ для данных преград составляет, соответственно, 60 %, 45 % и 40 %. Очевидно, зафиксированный эффект уменьшения относительного прироста глубины проникания пенетратора с реактивным двигателем с ростом его начальной скорости обусловлен

сопровождающим этот рост снижением относительной доли химической энергии сгорания ракетного топлива по сравнению с начальной кинетической энергией пенетратора.

В целом проведенные исследования свидетельствуют, что дополнительное действие импульса реактивной тяги позволяет существенно повысить глубину проникания пенетраторов в грунтово-скальные преграды с различными прочностными свойствами при начальных скоростях взаимодействия до 1000 м/с и применение таких реактивных пенетраторов для зондирования поверхностного слоя космических тел является весьма перспективным.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-08319-а.

Список литературы

1. Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский М.Ю., Федоров С.В. Расчет проникания недеформируемых ударников в малопрочные преграды с использованием данных пьезоакселерометрии // Журнал технической физики. 2011. Т. 81. № 7. С. 94−104.
2. Федоров С.В., Велданов В.А. Применение сегментированных ударников для формирования каверны в грунтово-скальных преградах // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2012. № 1(71). С. 43−50.
3. Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А., Шабалин И.И., Бабаков В.А., Куропатенко В.Ф., Киселев А.Б., Тришин Ю.А., Садырин А.И., Киселев С.П., Головнев И.Ф. Высокоскоростное взаимодействие тел. Новосибирск: Издательство СО РАН, 1999. 600 с.
4. Федоров С.В., Баянова Я.М. Особенности гидродинамического режима проникания удлиненных ударников с учетом сжимаемости материалов // Журнал технической физики. 2011. Т. 81. № 9. С. 45−51.
5. Федоров С.В., Велданов В.А. Численное моделирование формирования каверны в грунте при воздействии потока высокоскоростных металлических ударников // Журнал технической физики. 2006. Т. 76. № 7. С. 134−137.
6. Федоров С.В. К определению глубины проникания пористых ударников при гиперскоростном взаимодействии // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. № 10. С. 131−134.

7. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Optimization of penetration into geological and concrete shields by impactor with jet thruster // Journal of Mechanics of Materials and Structures. 2008. Vol. 3, No. 4. P. 707–727.
8. Федорова Н.А., Велданов В.А., Даурских А.Ю., Федоров С.В. Влияние реактивной тяги на проникание пенетраторов при изучении строения поверхностного слоя космических объектов // Наука и образование: электронный научно-технический журнал. 2014. № 2. DOI: 10.7463/0214.0699035.
9. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Engineering models of high speed penetration into geological shields // Central European Journal of Engineering. 2014. No. 4(1). P. 1–19.
10. Велданов В.А. Закон сопротивления прониканию ударников в грунт // Оборонная техника. 1995. № 4. С. 32–34.
11. Велданов В.А., Федоров С.В. Особенности поведения грунта на границе контакта с недеформируемым ударником при проникании // Прикладная механика и техническая физика. 2005. Т. 46. № 6. С. 116–127.
12. Федоров С.В., Федорова Н.А. Влияние импульса реактивной тяги на глубину проникания исследовательского зонда в грунт планеты // Инженерный журнал: наука и инновации. Электронное научно-техническое издание. 2013. № 1(13). Режим доступа: http://technomag.edu.ru/doc/699035.html (дата обращения 09.06.2015).
13. Федоров С.В., Федорова Н.А., Велданов В.А. Использование импульса реактивной тяги для увеличения глубины проникания исследовательских модулей в малопрочные грунтовые преграды // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2014. № 4(84). С. 53–63.
14. Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский М.Ю., Сотский Ю.М., Федоров С.В. Исследование динамических механических свойств алюминиевых сплавов методом акселерометрии // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2010. № 2. С. 37−46.