

## Влияние реактивной тяги на проникание пенетраторов при изучении строения поверхностного слоя космических объектов

# 02, февраль 2014

DOI: 10.7463/0214.0699035

Федорова Н. А., Велданов В. А., Даурских А. Ю., Федоров С. В.

УДК 523.36; 531.58

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

[n2402f@live.ru](mailto:n2402f@live.ru)

[vevladi@mail.ru](mailto:vevladi@mail.ru)

[anna.daurских@gmail.com](mailto:anna.daurских@gmail.com)

[serg-fed-64@mail.ru](mailto:serg-fed-64@mail.ru)

### Постановка задачи

Зондирование поверхностного слоя Земли, а в ближайшей перспективе и других небесных тел Солнечной системы с целью изучения их строения и разведки полезных ископаемых может проводиться с помощью высокоскоростных проникающих модулей [1], оснащаемых датчиками и приборами различного назначения. Исследовательская аппаратура размещается внутри прочного металлического корпуса, имеющего заострение в головной части для уменьшения силы сопротивления при движении модуля в породах, слагающих верхний слой коры космического тела. Начальная скорость взаимодействия подобных модулей-пенетраторов с грунтом планеты может составлять свыше 1000 м/с.

Нагрузки, испытываемые исследовательскими модулями-пенетраторами при проникании, не должны приводить к их значительным деформациям, что позволяет рассматривать динамику проникания модуля в грунтовую преграду, как движение абсолютно недеформируемого тела в сопротивляющейся среде. Важной задачей является увеличение глубины проникания исследовательских модулей. Возможности ее решения за счет повышения начальной скорости модуля ограничены, так как с увеличением скорости возрастают нагрузки, действующие на него при проникании, что может привести к его большим деформациям и разрушению.

В качестве возможного пути повышения проникающей способности исследовательских модулей-пенетраторов может рассматриваться оснащение их импульсным реактивным двигателем, срабатывающим на определенной стадии проникания в преграду. Как было показано в [2] на

частном примере, при определенном выборе параметров импульса реактивной тяги прирост глубины проникания пенетратора может составлять десятки процентов. Однако представленные в [2] данные не дают возможности выйти на какие-либо обобщения относительно достигаемого эффекта и установить его зависимость от характеристик проникающего модуля в широком диапазоне их изменения (таких, например, как диаметр миделя, полная масса пенетратора и ее соотношение с массой твердотопливного заряда реактивного двигателя, время начала и продолжительность действия импульса реактивной тяги). В настоящей работе предпринимается попытка восполнения указанного «пробела» и получения некоторых обобщенных данных по глубине проникания пенетраторов с импульсным реактивным двигателем. Исследования были первоначально проведены применительно к случаю проникания в малопрочные грунтовые преграды, которого и касаются представляемые в работе результаты.

### Модель проникания реактивного пенетратора

Динамика движения недеформируемого пенетратора с реактивным двигателем в грунтовой преграде рассчитывалась в рамках простого инженерного подхода [3]. В основе расчетной методики лежит определение нормальных механических напряжений  $\sigma_n$ , действующих на поверхности головной части пенетратора, контактирующей с преградой (рис.1), с помощью эмпирического закона сопротивления в виде  $\sigma_n = Av_n^2 + C$  [4], где  $A$  и  $C$  – коэффициенты, зависящие от физико-механических свойств материала преграды и характеризующие ее, соответственно, инерционное и прочностное сопротивление прониканию;  $v_n$  – проекция скорости пенетратора  $v$  на нормаль к поверхности его головной части в данной точке. При определении касательных напряжений  $\tau_n$  на поверхности головной части (рис.1) предполагалось, что на границе контакта реализуется режим не скольжения, а прилипания частиц грунтовой преграды [5], при котором для расчета  $\tau_n$  можно воспользоваться приближенным соотношением  $\tau_n \approx 0,5C$ . Как и в [3], форма головной части пенетратора предполагалась конической с углом раствора  $2\gamma$ .

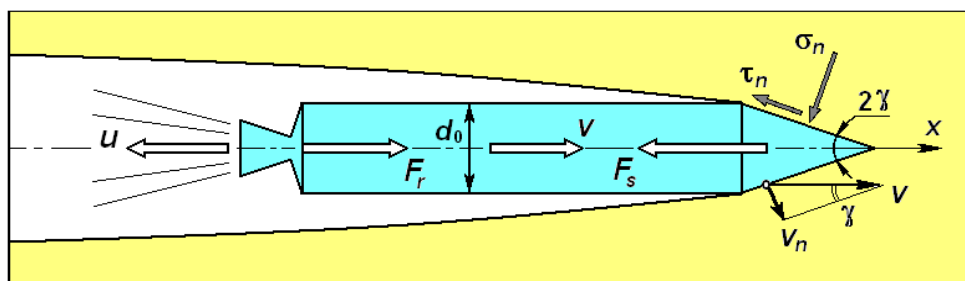


Рис. 1. Расчетная схема проникания в грунтовую преграду недеформируемого пенетратора с реактивным двигателем

Во время работы реактивного двигателя динамика проникания пенетратора, помимо силы сопротивления преграды, определяется также силой реактивной тяги  $F_r = \mu u$  [6], зависящей от скорости истечения газовой струи  $u$  и массового расхода газа  $\mu$ . Массовый расход газа  $\mu$  предполагался постоянным в течение промежутка времени сообщения реактивного импульса  $\tau_r$ , что, в свою очередь, при постоянной скорости истечения  $u$  приводило к неизменности реактивной силы в течение указанного времени  $\tau_r$  (рис.2). Количество реактивного топлива в составе пенетратора характеризовалось числом Циолковского  $Z = m_r/m_c$ , где  $m_r$  – масса реактивного топлива;  $m_c$  – масса конструкции пенетратора (без твердотопливного заряда), включающая, в том числе, полезную нагрузку проникающего модуля. Полная начальная масса пенетратора (до срабатывания реактивного двигателя) равна при этом  $m_0 = m_c + m_r$ .

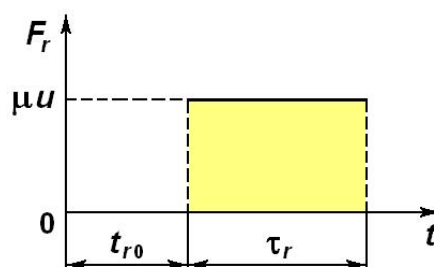


Рис. 2. Закон изменения реактивной силы

В предположении, что взаимодействие пенетратора с преградой происходит по нормали к ее поверхности и в пренебрежении начальной стадией, на которой глубина проникания не превышает высоту головной части пенетратора, динамику движения проникающего модуля с импульсным реактивным двигателем в грунтовой преграде можно представить в следующем безразмерном виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\bar{v}}{d\bar{t}} = -\frac{\arctg \sqrt{\alpha}}{\sqrt{\alpha}}(1 + \alpha \bar{v}^2); \quad 0 \leq \bar{t} < \bar{t}_{r0}, \\ \left[ \left( Z + \frac{1}{Z} \right) \bar{\tau}_r - (\bar{t} - \bar{t}_{r0}) \right] \frac{d\bar{v}}{d\bar{t}} = -\bar{u} \left[ \frac{1 + \alpha \bar{v}^2}{k_r} - 1 \right]; \quad \bar{t}_{r0} \leq \bar{t} < \bar{t}_{r0} + \bar{\tau}_r, \\ \frac{d\bar{v}}{d\bar{t}} = -(1 + Z) \frac{\arctg \sqrt{\alpha}}{\sqrt{\alpha}}(1 + \alpha \bar{v}^2); \quad \bar{t} \geq \bar{t}_{r0} + \bar{\tau}_r, \\ \frac{d\bar{h}}{d\bar{t}} = 2 \frac{\sqrt{\alpha} \arctg \sqrt{\alpha}}{\ln(1 + \alpha)} \bar{v}. \end{array} \right. \quad (1)$$

В записанной системе (1) безразмерные время  $\bar{t}$ , глубина проникания  $\bar{h}$ , скорость пенетратора  $\bar{v}$ , время начала действия реактивной силы  $\bar{t}_{r0}$  и продолжительность действия  $\bar{\tau}_r$

определяются, как  $\bar{t} = t/t_{p0}$ ;  $\bar{h} = h/h_{p0}$ ;  $\bar{v} = v/v_0$ ;  $\bar{t}_{r0} = t_{r0}/t_{p0}$ ;  $\bar{\tau}_r = \tau_r/t_{p0}$ , где  $v_0$  – начальная скорость пенетратора, а в качестве масштабов времени и глубины проникания

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

используются полные время и глубина проникания эквивалентного пенетратора без реактивного двигателя (имеющего те же форму головной части, массу  $m_0$ , площадь миделя  $S_m$  и начальную скорость  $v_0$ , что и реактивный пенетратор). Безразмерный параметр

$$\alpha = \frac{A v_0^2 \sin^2 \gamma}{C(1+0,5 \operatorname{ctg} \gamma)}$$

характеризует соотношение инерционного и прочностного сопротивления преграды, а безразмерная скорость истечения реактивной струи равна  $\bar{u} = u/v_0$ . Наконец, безразмерный коэффициент  $k_r$  в системе (1) задает соотношение реактивной силы и прочностного сопротивления грунтовой преграды и выражается через другие безразмерные параметры, как

$$k_r = \frac{Z \bar{u} \sqrt{\alpha}}{\bar{\tau}_r (1+Z) \operatorname{arctg} \sqrt{\alpha}}.$$

Описание динамики проникания реактивного пенетратора в безразмерной форме (1) с использованием в качестве масштабов времени и глубины проникания значений  $t_{p0}$  и  $h_{p0}$  (2) позволяет избавиться от влияния на результаты решения задачи начальной массы пенетратора  $m_0$  и диаметра его миделя  $d_0$ . Отсутствие такой зависимости удобно для обобщении результатов расчетов – они сохраняют справедливость для пенетраторов произвольной начальной массы и размера миделя. При этом значения  $m_0$  и  $d_0$  влияют лишь на масштабы времени и глубины проникания.

### Исходные данные для расчетов

Наиболее реальным с точки зрения ближайшей перспективы представляется освоение нашего космического соседа – Луны. Уже существуют проекты по созданию на Луне стационарных баз и разработке полезных ископаемых (например, изотопа гелия-3, являющегося идеальным термоядерным горючим). Для исследований строения поверхностного слоя Луны могут понадобиться высокоскоростные проникающие модули. В связи с этим при проведении расчетов

по прониканию пенетраторов в качестве грунтовой преграды рассматривался лунный реголит – малопрочная среда, напоминающая по свойствам мелкозернистый песок. Коэффициенты в законе сопротивления для лунного реголита с учетом данных [1] принимались равными  $A = 1700 \text{ кг/м}^3$ ;  $C = 10 \text{ МПа}$ . Скорость истечения газа из реактивного двигателя пенетратора выбиралась на уровне, обеспечиваемом современными ракетными топливами, и составляла  $u = 2000 \text{ м/с}$ . Система (1) интегрировалась численно.

### Влияние временных параметров реактивного импульса

Первоначально было рассмотрено влияние на относительную результирующую глубину проникания  $\bar{h}_p$  реактивного пенетратора безразмерных времени начала работы двигателя  $\bar{t}_{r0} = t_{r0}/t_{p0}$  и продолжительности действия реактивной тяги  $\bar{\tau}_r = \tau_r/t_{p0}$  (рис.3). Расчеты были проведены при различных значениях числа Циолковского  $Z$  для начальной скорости пенетратора  $v_0 = 500 \text{ м/с}$  и угла раствора конической головной части ударника  $2\gamma = 45^\circ$  (рис.1). Одновременно на рис.3 приводятся также зависимости глубины проникания  $\bar{h}_p$  от коэффициента  $k_r$ , характеризующего соотношение реактивной силы и прочностного сопротивления грунтовой преграды.

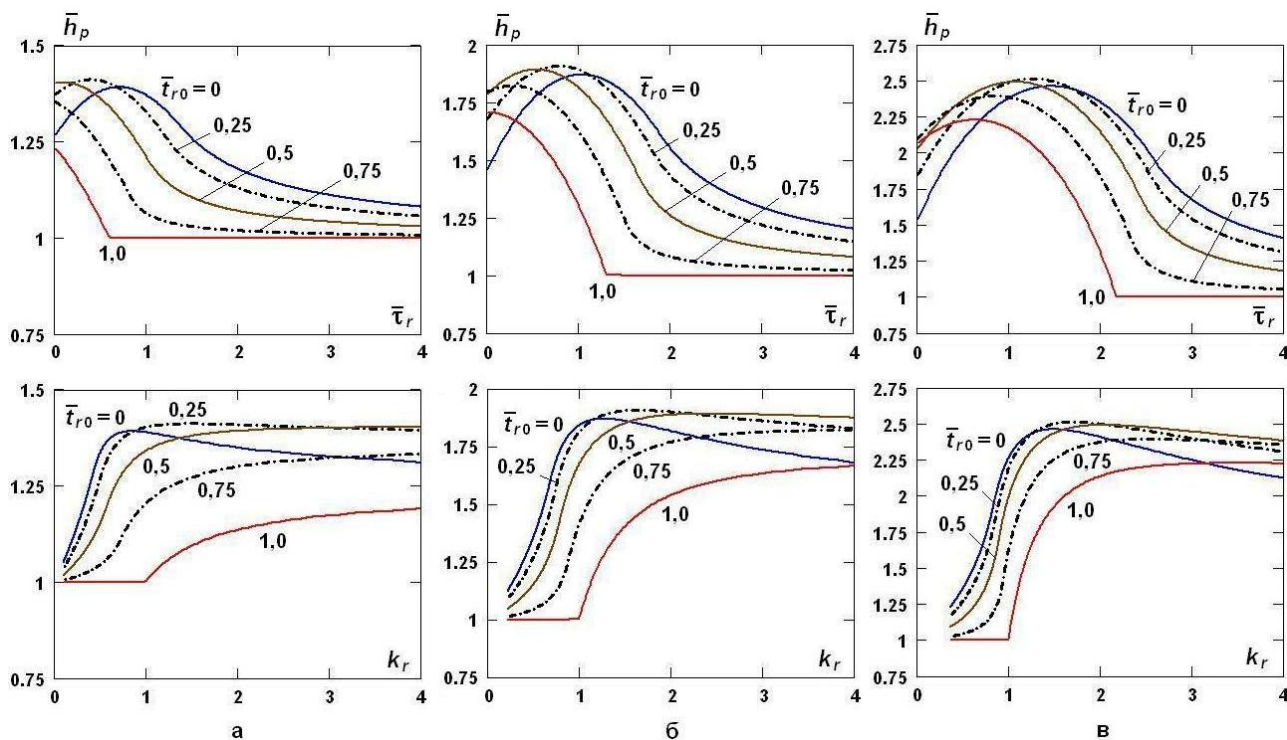


Рис. 3. Влияние на относительную глубину проникания продолжительности действия силы реактивной тяги и ее соотношения с прочностной составляющей силы сопротивления грунтовой преграды при различных значениях числа Циолковского и временах включения

реактивного двигателя:  $a - Z = 0,1$ ;  $b - Z = 0,25$ ;  $c - Z = 0,5$

В расчетах был рассмотрен весь возможный диапазон изменения значений  $\bar{t}_{r0}$  – от «запуска» реактивного двигателя сразу же в момент начала проникания ( $\bar{t}_{r0} = 0$ ) до его «включения» в момент полного останова пенетратора в преграде в результате торможения ( $\bar{t}_{r0} = 1$ ). Как видно из представленных данных, при различных временах «включения» реактивной тяги существует оптимальное время ее действия, при котором обеспечивается максимальный прирост глубины проникания. С увеличением числа Циолковского оптимальные значения  $\bar{\tau}_r$  возрастают. Возрастание оптимальных значений  $\bar{\tau}_r$  наблюдается также при более раннем «запуске» реактивного двигателя. Например, при  $Z = 0,5$  (рис.3, в) и изменении  $\bar{t}_{r0}$  от единицы до нуля время действия импульса реактивной тяги  $\bar{\tau}_r$ , при котором проникание  $\bar{h}_p$  максимально, увеличивается примерно от 0,7 до 1,5.

Если говорить об оптимальном времени начала действия реактивной тяги, то для представленных на рис.3 результатов оно при всех значениях  $Z$  составляет примерно одну и ту же величину  $\bar{t}_{r0} = 0,25$ . При этом необходимо отметить, что значения максимумов на кривых  $\bar{h}_p(\bar{\tau}_r)$ , соответствующих различным значениям  $\bar{t}_{r0}$ , отличаются не очень существенно. Так, при изменении  $\bar{t}_{r0}$  от 0 до 0,75 и оптимальном выборе продолжительности действия импульса реактивной тяги  $\bar{\tau}_r$ , разброс максимальных значений получаемого прироста глубины проникания лежит в пределах 10 %. Таким образом, независимо от времени «включения» реактивного двигателя при рациональном выборе времени его работы можно получить примерно один и тот же прирост глубины проникания.

Интересно проследить за ходом кривых  $\bar{h}_p(\bar{\tau}_r)$  на рис.3 при  $\bar{t}_{r0} = 1$ , что соответствует началу действия реактивной силы в момент останова пенетратора. В этом случае, начиная с некоторого значения  $\bar{\tau}_r$  (примерно 0,6 при  $Z = 0,1$ ; 1,25 при  $Z = 0,25$  и 2,1 при  $Z = 0,5$ ), прирост глубины проникания вообще отсутствует. Объясняется данный факт тем, что с увеличением времени действия реактивного импульса при фиксированной массе реактивного топлива (фиксированном значении числа  $Z$ ) уменьшается массовый расход газа  $\mu$  и, соответственно, сила реактивной тяги  $F_r$ . Когда реактивная сила становится меньше прочностного (статического) сопротивления преграды, проникание уже остановившегося пенетратора делается невозможным. За влиянием соотношения этих сил, выражаемого коэффициентом  $k_r$ , на прирост глубины проникания реактивного пенетратора можно проследить на основании данных, представленных на том же

рис.3. Видно, что для кривых при  $\bar{t}_{r0}=1$  значение  $\bar{h}_p$  равно единице (что соответствует отсутствию прироста глубины проникания) как раз на участках, где  $k_r \leq 1$ . Важно также отметить, что в тех случаях, когда импульс реактивной тяги начинает действовать еще в процессе движения пенетратора ( $\bar{t}_{r0} < 1$ ), определенный прирост глубины проникания достигается и при  $k_r \leq 1$ . Что касается достижения максимального эффекта, то, как видно из рис.3, оно обеспечивается, когда сила реактивной тяги примерно в 1,5...2,0 раза превышает прочностную составляющую силы сопротивления.

Отметим, что режим реактивного «доразгона» с  $\bar{t}_{r0} = 0$  («включение» реактивной тяги в момент начала проникания) и с величиной  $\bar{t}_r$ , 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 реактивного топлива уменьшается [7]. Как видно из рис.3, такой вариант использования реактивного двигателя по достигаемому приросту глубины проникания существенно уступает режимам, при которых двигатель работает непосредственно на стадии движения пенетратора в грунтовой преграде.

### **Влияние числа Циолковского**

Существенное влияние на проникание пенетратора с реактивным двигателем оказывает значение числа Циолковского. С увеличением  $Z$  прирост глубины проникания  $\bar{h}_p$  возрастает. При оптимальных временных параметрах реактивного импульса величина  $\bar{h}_p$  возрастает примерно на 40 % при  $Z = 0,1$ , на 90 % при  $Z = 0,25$  и в 2,5 раза при  $Z = 0,5$  (рис.3). Очевидно, за счет дальнейшего увеличения значения  $Z$  (то есть, увеличения массы реактивного топлива по отношению к массе пенетратора) можно получить еще больший прирост глубины проникания. Однако эта возможность ограничивается чрезвычайно большими перегрузками, которые испытывает проникающий модуль при движении в преграде. Чтобы выдержать действие таких перегрузок, проникающий модуль должен иметь высокопрочную конструкцию с достаточно толстыми стенками корпуса, что ведет к возрастанию его массы. Поэтому с учетом условия обеспечения необходимой прочности реализовать на практике конструкцию реактивного проникающего модуля со значениями числа Циолковского, превышающими несколько десятых долей единицы, представляется сложным.

## Влияние начальной скорости пенетратора

На рис.4 проиллюстрировано влияние на достигаемый эффект прироста глубины проникания  $\bar{h}_p$  начальной скорости реактивного пенетратора и числа Циолковского при различных продолжительностях действия реактивного импульса  $\bar{t}_r$  и, соответственно, различных значениях  $k_r$ . Что касается безразмерного времени «включения» реактивной тяги  $\bar{t}_{r0}$ , то для представленных зависимостей  $\bar{h}_p(\bar{t}_r)$  оно составляло 0,5 при  $v_0 = 1500$  м/с и  $v_0 = 1000$  м/с; 0,25 при  $v_0 = 500$  м/с и задавалось нулевым при  $v_0 = 250$  м/с. Данные значения выбирались 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).

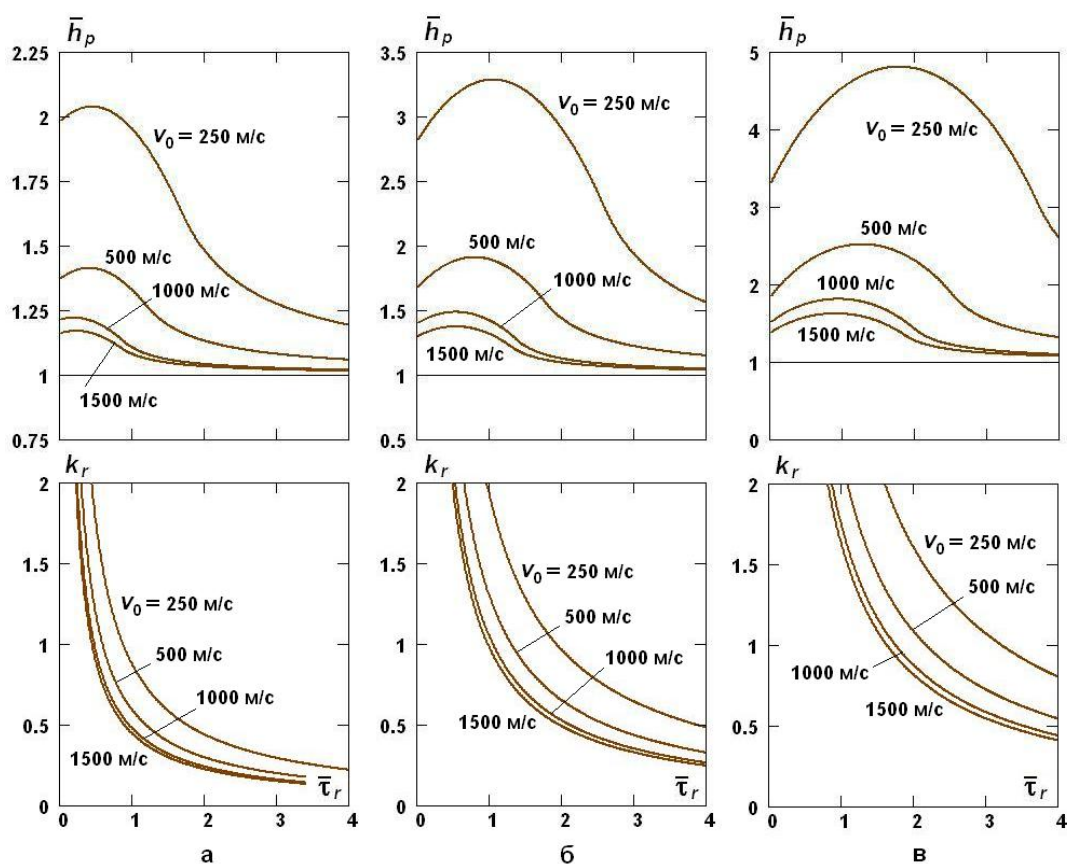


Рис. 4. Влияние на прирост глубины проникания и соотношение реактивной силы с прочностным сопротивлением грунтовой преграды времени работы реактивного двигателя при различных начальных скоростях пенетратора и числах Циолковского: а –  $Z = 0,1$ ; б –  $Z = 0,25$ ; в –  $Z = 0,5$

Как видно из рис.4, с увеличением начальной скорости пенетратора эффективность его реактивного «доразгона» существенно снижается. 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 более, чем в три раза, то при начальной скорости 1500 м/с и том же количестве реактивного топлива (том же значении  $Z$ ) максимально возможный прирост  $\bar{h}_p$  не превышает 40 % (рис.4, б). 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 реактивного топлива по сравнению с начальной кинетической энергией пенетратора.

Внимания заслуживает еще один вывод, который можно сделать на основании анализа данных, представленных на рис.4. С увеличением начальной скорости реактивного пенетратора оптимальная относительная продолжительность действия импульса реактивной тяги  $\bar{\tau}_r$ , при которой достигается максимальный прирост глубины проникания, снижается. К снижению оптимального значения  $\bar{\tau}_r$ , как уже отмечалось выше, приводит и уменьшение числа Циолковского. Однако независимо от начальной скорости ударника и числа Циолковского, значение коэффициента  $k_r$ , соответствующего оптимальным режимам реактивного «доразгона», остается практически неизменным и лежит в диапазоне 1,5...2,0.

### Выводы

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют, что за счет оснащения исследовательского проникающего модуля импульсным реактивным двигателем можно существенно (в несколько раз) увеличить глубину его проникания в малопрочную грунтовую преграду. При этом прирост глубины проникания определяется конкуренцией двух факторов, сопровождающих проникание пенетратора с реактивным двигателем, – действием дополнительной реактивной силы, способствующей увеличению глубины проникания, с одной стороны, и снижением массы пенетратора в результате сгорания реактивного топлива, ведущим, напротив, к уменьшению глубины проникания, с другой стороны. Взаимным влиянием указанных конкурирующих факторов предопределяется существование оптимальных времени начала действия реактивного импульса и его продолжительности, при которых в максимальной степени реализуются потенциальные возможности реактивного «доразгона». Важно отметить, что максимальный прирост глубины проникания достигается не при предварительном (до начала взаимодействия с преградой) срабатывании реактивного двигателя, а при его работе уже в процессе проникания пенетратора в преграду.

### Список литературы

1. Велданов В.А., Смирнов В.Е., Хаврошкин О.Б. Лунный пенетратор: снижение перегрузок, управление прониканием // Астрономический вестник. 1999. Т. 33, № 5. С. 490-494.
2. Велданов В.А., Наумов А.Н. Влияние времени включения и времени работы газодинамического разгонного устройства // Труды междунар. конф. «V Харитоновские тематические научные чтения». Саров: ВНИИЭФ, 2003. С. 499-501.
3. Федорова Н.А. Проникание ударника в грунтовую преграду с импульсом реактивной тяги // Сборник трудов пятой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. С. 230-231.
4. Велданов В.А. Закон сопротивления прониканию ударников в грунт // Оборонная техника. 1995. № 4. С. 32-34.
5. 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.
6. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. М.: Высшая школа, 1990. 607 с.
7. 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. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/machin/airborne/571.html> (дата обращения 01.01.2014).

## **Influence of jet thrust on penetrator penetration when studying the structure of space object blanket**

# 02, February 2014

DOI: **10.7463/0214.0699035**

**N.A. Fedorova, V.A. Veldanov, A.Yu. Dauriskikh, S.V. Fedorov**

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

[n2402f@live.ru](mailto:n2402f@live.ru)

[vevladi@mail.ru](mailto:vevladi@mail.ru)

[anna.dauriskikh@gmail.com](mailto:anna.dauriskikh@gmail.com)

[sergfed-64@mail.ru](mailto:sergfed-64@mail.ru)

The article presents the calculation-and-theory-based research results to examine the possibility for using the jet thrust impulse to increase a penetration depth of high-velocity penetrator modules. Such devices can be used for studies of Earth surface layer composition, and in the nearest future for other Solar system bodies too. Research equipment (sensors and different instruments) is housed inside a metal body of the penetrator with a sharpened nose that decreases drag force in soil. It was assumed, that this penetrator is additionally equipped with the pulse jet engine, which is fired at a certain stage of penetrator motion into target.

The penetrator is considered as a rigid body of variable mass, which is subjected to drag force and reactive force applied at the moment the engine fires. A drag force was represented with a binomial empirical law, and penetrator nose part was considered to be conical. The jet thrust force was supposed to be constant during its application time. It was in accordance with assumption that mass flow and flow rate of solid propellant combustion products were constant. The amount of propellant in the penetrator was characterized by Tsiolkovsky number  $Z$ , which specifies the ratio between the fuel mass and the penetrator structure mass with no fuel.

The system of equations to describe the penetrator dynamics was given in dimensionless form using the values aligned with penetration of an equivalent inert penetrator as the time and penetration depth scales. Penetration dynamics of penetrator represented in this form allowed to eliminate the influence of penetrator initial mass and its cross-section diameter on the solution results. The lack of such dependency is convenient for comparing the calculation results since they hold for penetrators of various initial masses and cross-sections.

To calculate the penetration a lunar regolith was taken as a soil material. Calculations were carried out for initial velocities of interaction between the penetrator and the soil within the range of 250 and 1500 m/s with Tsiolkovsky number from 0.1 to 0.5. Obtained results show that there are optimal times when the jet thrust engine "switches on" and operates, thus providing a maximum increase in penetration depth. This time optimum is due to two competitive factors associated with the reactive projectile penetration. On the one hand, there is an additional reactive force that contributes to penetration depth increase. On the other one, due to fuel combustion, the penetrator mass decreases, thereby leading to its reduced penetration capability.

It was shown that a value of Tsiolkovsky number has a significant influence on the motion of penetrator using a jet engine. With raising  $Z$ , a penetration depth increases as well. At initial velocity of 500 m/s and optimal time parameters of reactive pulse, penetration depth increases almost by 40% for  $Z = 0,1$ , 90 % for  $Z = 0,25$ , and 2.5 times for  $Z = 0,5$ . As initial velocity of the penetrator grows, effectiveness of additional reactive acceleration significantly decreases. This is due to decreased relative portion of chemical energy of rocket propellant combustion as compared to the initial kinetic energy of penetrator with its reducing velocity.

A conclusion based on research results was drawn up that a penetrator module under examination equipped with the pulse jet engine is an efficient facility for the significant increase of penetration depth in low-strength soil targets. It was emphasized that the maximum increase in penetration depth was reached when a running jet engine makes the penetrator to move in the target rather than at its prestart (before coming in contact with the target).

---

**Publications with keywords:** [high-velocity penetration](#), [soil target](#), [reactive impulse](#), [penetrator](#)

**Publications with words:** [high-velocity penetration](#), [soil target](#), [reactive impulse](#), [penetrator](#)

---

### References

1. Veldanov V.A., Smirnov V.E., Khavroshkin O.B. [Lunar Penetrator: Reducing Overloading and Penetration Control]. *Astronomicheskiy vestnik*, 1999, vol. 33, no. 5, pp. 490-494. (English translation: *Solar System Research*, 1999, vol. 33, no. 5, pp. 432-436). (in Russian)
2. Veldanov V.A., Naumov A.N. Effect of on time and operation time of gasdynamic overlocking device]. *Trudy mezhdunar. konf. "5 Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya"* [Proc. of the International Conference "5<sup>th</sup> Kharitonov thematic scientific readings"]. Sarov, Publ. of VNIIEF, 2003, pp. 499-501. (in Russian)
3. Fedorova N.A. [Penetration of impactor into soil barrier with jet thrust pulse]. *Sbornik trudov pyatoy Vserossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov "Budushchee mashinostroeniya"*

Rossii” [Proc. of the Fifth All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists “Future of Mechanical Engineering of Russia”]. Moscow, Bauman MSTU, 2012, pp. 230-231. (in Russian)

4. Veldanov V.A. [The law of resistance to penetration of impactor into the soil]. *Oboronnaya tekhnika*, 1995, no. 4, pp. 32-34. (in Russian)

5. Veldanov V.A., Fedorov S.V. [Soil behavior at the interface with a rigid projectile during penetration]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2005, vol. 46, no. 6, pp. 116-127. (English translation: *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2005, vol. 46, no. 6, pp. 867-875. DOI: [10.1007/s10808-005-0146-x](https://doi.org/10.1007/s10808-005-0146-x) ).

6. Nikitin N.N. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki* [Course of Theoretical Mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 607 p. (in Russian)

7. Fedorov S.V., Fedorova N.A. [Influence of the jet thrust impulse on depth of the research probe penetration into planet soil]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii - Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 1. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/airborne/571.html> , accessed 01.01.2014. (in Russian)