

УДК 523.36; 531.58

**Зондирование поверхности планет с помощью реактивных проникающих модулей**

**# 03, март 2012**

Федорова Н.А.

*Студентка,  
кафедра «Высокоточные летательные аппараты»*

*Научный руководитель: С.В. Федоров,  
старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[sergfed-64@mail.ru](mailto:sergfed-64@mail.ru)

Исследование строения поверхностного слоя планет может проводиться с помощью проникающих модулей, оснащаемых датчиками и приборами различного назначения [1]. Такие модули, проникая за счет сообщаемой им высокой скорости в грунт планеты, могут передавать информацию о свойствах пород, слагающих верхний слой коры планеты. С их помощью может осуществляться разведка полезных ископаемых. Размещение на проникающем модуле небольшого заряда взрывчатого вещества и его подрыв при проникании на определенную глубину позволяет проводить сейсмические исследования верхнего слоя коры. При этом установка сейсмических датчиков в поверхностном слое грунта для регистрации генерируемых взрывом волн может проводиться также с помощью проникающих модулей.

В настоящей работе расчетным путем исследуется возможность увеличения глубины проникания исследовательских модулей в грунтовые преграды за счет оснащения их импульсными реактивными двигателями, время работы которых составляет небольшую долю от времени проникания. При проведении расчетов предполагалось, что нагрузки, действующие на модуль-ударник при проникании, не приводят к его большим деформациям, так что в процессе движения он может рассматриваться, как абсолютно твердое недеформируемое тело.

Динамика движения недеформируемого ударника с реактивным двигателем в грунтовой преграде (рис.1) определяется действующей на него силой сопротивления среды  $F_s$  и силой тяги реактивного двигателя  $F_r$  (во время его работы), зависящей от скорости истечения газовой струи  $u$  и массового расхода газа  $\mu$ .

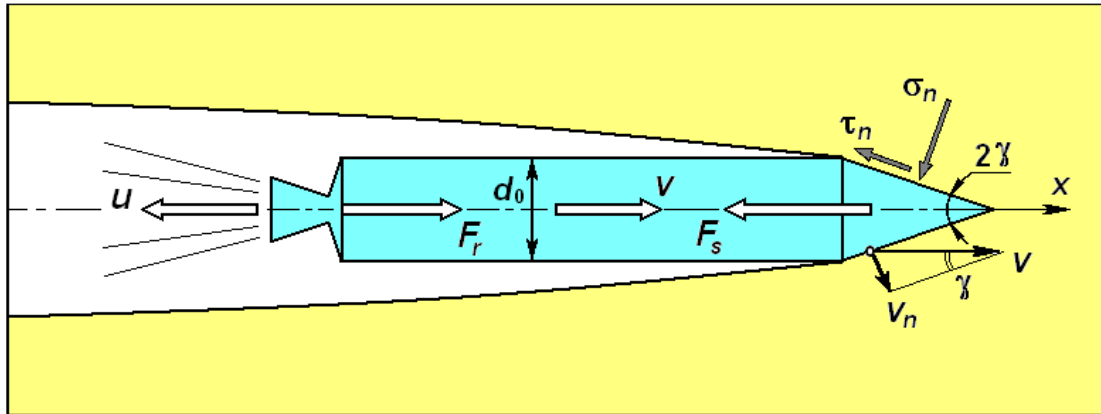


Рис.1 Расчетная схема проникания в грунтовую преграду недеформируемого ударника с реактивным двигателем

Сила сопротивления  $F_s$  зависит от распределения нормальных  $\sigma_n$  и касательных  $\tau_n$  механических напряжений, действующих на поверхности головной части ударника, контактирующей с преградой. В рамках простого инженерного подхода к определению динамики проникания ударников нормальные напряжения  $\sigma_n$  принимаются функцией проекции  $v_n$  скорости ударника  $v$  на нормаль к поверхности его головной части в данной точке (рис.1). Вид этой функции (закон сопротивления) брался следующим [2]:

$$\sigma_n = Av_n^2 + C, \quad (1)$$

где  $A$  и  $C$  – коэффициенты, зависящие от физико-механических свойств материала преграды. В представленной форме закон сопротивления (1) трактует сопротивление среды, как сумму инерционной (первое слагаемое) и прочностной (второе слагаемое) составляющих. При определении касательных напряжений  $\tau_n$  предполагалось, что на границе контакта реализуется режим не скольжения, а прилипания частиц грунтовой преграды [3], при котором для расчета  $\tau_n$  можно воспользоваться приближенным соотношением:

$$\tau_n \approx 0,5C. \quad (2)$$

С использованием соотношений (1), (2) рассчитывается сила сопротивления преграды  $F_s$ . Для ударников с конической формой головной части ( $2\gamma$  – угол раствора конуса, рис.1)  $v_n = v \sin \gamma$ , а выражение для силы сопротивления  $dF_s$ , действующей на элементарной площадке  $dS$ , принимает вид

$$dF_s = (\sigma_n \sin \gamma + \tau_n \cos \gamma) dS.$$

Интегрирование данного соотношения с учетом (1), (2) по поверхности контакта конической головной части с преградой в предположении, что проникание происходит по нормали к свободной поверхности (в этом случае достигается наибольшая глубина проникания) приводит к следующему выражению для определения силы сопротивления:

$$F_s = F_A v^2 + F_C, \quad (3)$$

где  $F_A = AS_m \sin^2 \gamma$ ;  $F_C = CS_m(1 + 0,5 \operatorname{ctg} \gamma)$  – соответственно, инерционный и прочностной коэффициенты силы сопротивления;  $S_m = \pi d_0^2 / 4$  – площадь миделя

ударника ( $d_0$  – диаметр ударника). Интегрирование уравнений движения ударника массой  $m$  (без реактивного двигателя)

$$m \frac{dv}{dt} = -F_A v^2 - F_C; \quad \frac{dh}{dt} = v,$$

где  $h$  – глубина проникания, позволяет получить следующие выражения, описывающие динамику проникания в преграду:

$$v = \sqrt{\frac{F_C}{F_A}} \operatorname{tg} \left[ \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{F_A}{F_C}} v_0 \right) - \frac{\sqrt{F_A F_C}}{m} t \right]; \quad h = \frac{m}{2 F_A} \ln \left[ \frac{F_A v_0^2 + F_C}{F_A v^2 + F_C} \right] \quad (4)$$

при начальных условиях  $t=0$ ;  $v=v_0$  ( $v_0$  – начальная скорость ударника);  $h=0$ . Для расчета конечной (максимальной) глубины проникания служит соотношение:

$$h_m = \frac{m}{2 F_A} \ln \left[ \frac{F_A}{F_C} v_0^2 + 1 \right].$$

Отметим, что представленная динамика проникания получена в пренебрежении начальной стадией взаимодействия, когда глубина проникания еще меньше высоты головной части ударника (на этой стадии происходит увеличение площади контакта головной части ударника с преградой от нулевого значения и, соответственно, сила сопротивления будет меньше использовавшегося значения (3)). Однако исключение данного обстоятельства из внимания является совершенно оправданным, так как размер головной части ударника пренебрежимо мал с характерной глубиной его проникания в грунтовые преграды.

Основное допущение, которое использовалось при расчете проникания ударника с реактивным двигателем, состояло в том, что импульс силы реактивной тяги  $F_r$  сообщается ударнику в определенный момент его проникания мгновенно (то есть, время действия реактивного импульса настолько мало, что влиянием импульса силы сопротивления преграды на изменение скорости ударника за этот промежуток времени можно пренебречь). Данное допущение позволяло определить скорость  $v_{re}$ , приобретаемую ударником в результате действия реактивного импульса, на основании решения первой задачи Циолковского [4]:

$$v_{re} = v_{rb} + u \ln(1 + Z), \quad (5)$$

где  $v_{rb}$  – скорость ударника непосредственно перед включением реактивного двигателя;  $u$  – скорость истечения газов (относительно ударника);  $Z = m_r/m_c$  – число Циолковского, характеризующее соотношение массы ракетного топлива  $m_r$  (сгоревшего и отброшенного в виде газовой струи) и массы конструкции ударника  $m_c$  (включающей, в том числе, полезную нагрузку проникающего модуля). Полная масса ударника до срабатывания реактивного двигателя равна при этом  $m = m_c + m_r$ .

С учетом вышеизложенного процесс проникания ударника с реактивным двигателем складывался из двух этапов, разделявшихся моментом времени  $t_r$  сообщения ударнику реактивного импульса. На первом этапе при изменении времени в диапазоне  $0 < t < t_r$  динамика проникания определялась соотношениями (4), и в момент  $t_r$  непосредственно перед срабатыванием двигателя скорость  $v_{rb}$  и глубина проникания  $h_r$  ударника были, соответственно, равны

$$v_{rb} = \sqrt{\frac{F_C}{F_A}} \operatorname{tg} \left[ \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{F_A}{F_C}} v_0 \right) - \frac{\sqrt{F_A F_C}}{m} t_r \right]; \quad h_r = \frac{m}{2 F_A} \ln \left[ \frac{F_A v_0^2 + F_C}{F_A v_{rb}^2 + F_C} \right].$$

В момент времени  $t_r$  за счет действия реактивного импульса скорость ударника скачкообразно увеличивалась от значения  $v_{rb}$  до значения  $v_{re}$ , определяемого соотношением (5). Одновременно масса ударника уменьшалась до величины  $m_c = m/(1+Z)$ . После этого начинался второй этап проникания  $t > t_r$ , динамика движения ударника на котором по-прежнему может быть описана с использованием зависимостей (4) при соответствующей корректировке начальных данных:

$$v = \sqrt{\frac{F_C}{F_A}} \operatorname{tg} \left[ \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{F_A}{F_C}} v_{re} \right) - \frac{(1+Z)\sqrt{F_A F_C}}{m} (t - t_r) \right];$$

$$h = h_r + \frac{m}{2(1+Z)F_A} \ln \left[ \frac{F_A v_{re}^2 + F_C}{F_A v^2 + F_C} \right].$$

В результате полная глубина проникания при действии реактивного импульса вычисляется, как

$$h_m = h_r + \frac{m}{2(1+Z)F_A} \ln \left[ \frac{F_A}{F_C} v_{re}^2 + 1 \right].$$

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). В связи с этим при проведении расчетов по прониканию ударников в качестве грунтовой преграды рассматривался лунный реголит – малопрочная среда, напоминающая по свойствам мелкозернистый песок. Коэффициенты в законе сопротивления (1) для лунного реголита с учетом данных [1] принимались равными  $A = 1700 \text{ кг/м}^3$ ;  $C = 10 \text{ МПа}$ . Масса  $m$  и диаметр  $d_0$  проникающего модуля были выбраны с ориентировкой на варианты [1], рассматривавшиеся в рамках программы изучения Луны, –  $m = 5 \text{ кг}$ ;  $d_0 = 70 \text{ мм}$ .

Первоначально были проведены расчеты по определению влияния угла заострения  $2\gamma$  конической головной части ударника (рис.1) на глубину проникания. При этом рассматривалось проникание без действия реактивного импульса. На рис.2 проиллюстрированы полученные результаты при различных начальных скоростях ударника. Дополнительно к малопрочному лунному реголиту ( $C = 10 \text{ МПа}$ ) было рассчитано также проникание в более прочную каменистую среду ( $C = 100 \text{ МПа}$ ).

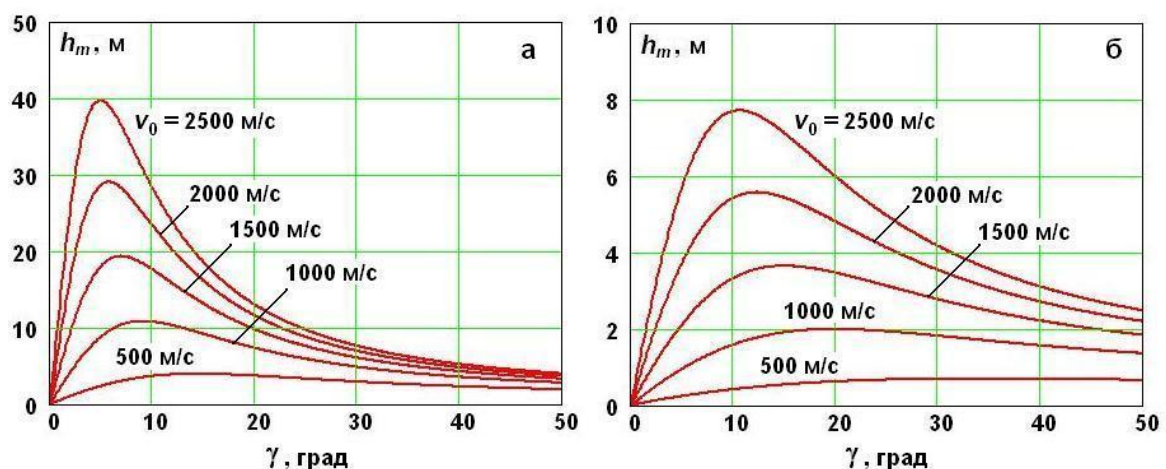


Рис.2 Влияние угла раствора конической головной части ударника на глубину проникания в преграды различной прочности: а –  $C = 10 \text{ МПа}$ ; б –  $C = 100 \text{ МПа}$

Как видно из рис.2, с возрастанием роли прочностного сопротивления преграды (что происходит при уменьшении начальной скорости ударника  $v_0$  и увеличении коэффициента  $C$  в законе сопротивления) оптимальное значение угла конусности головной части, при котором обеспечивается наибольшее проникание, смещается в сторону больших значений. Для малопрочного лунного реголита оптимальный угол раствора конуса  $2\gamma$  составляет менее  $20^\circ$ . При таком заострении головной части сложно обеспечить ее прочность. Поэтому при проведении дальнейших расчетов рассматривался ударник с углом полураствора конической головной части  $\gamma = 15^\circ$ , несколько большим оптимального.

Исследования влияния реактивного импульса, сообщаемого ударнику в процессе его движения в преграде, на глубину проникания были проведены для двух начальных скоростей взаимодействия –  $v_0 = 1000$  м/с и  $v_0 = 2000$  м/с. Первая из этих скоростей соответствует варианту разгона проникающего модуля баллистической установкой, доставленной на базу на поверхности Луны, а вторая – запуску проникающего модуля с космической орбитальной станции, движущейся вокруг Луны. Скорость истечения газа из двигателя ударника выбиралась на уровне, обеспечиваемом современными ракетными топливами, и составляла  $u = 2000$  м/с. По результатам расчетов выяснялась эффективность реактивного доразгона ударника в процессе проникания в зависимости от времени сообщения реактивного импульса  $t_r$  и числа Циолковского  $Z$  для конструкции проникающего модуля.

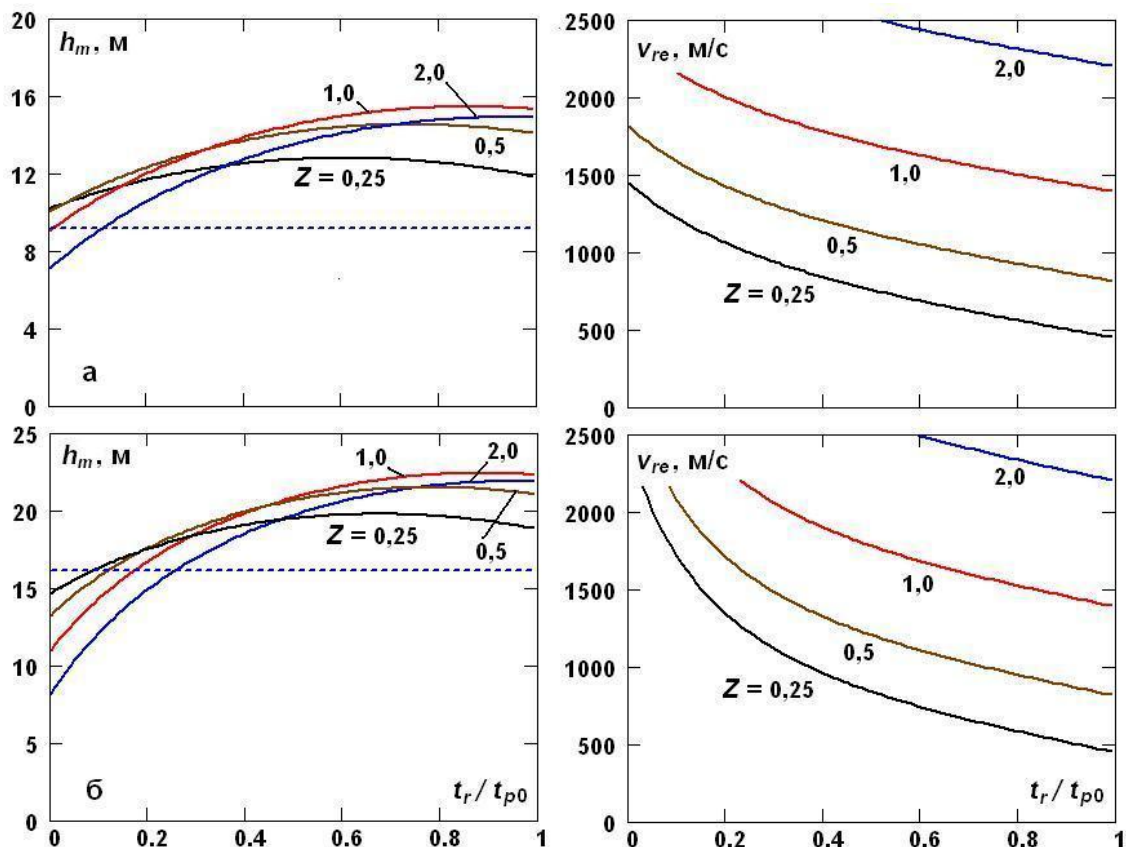


Рис.3 Влияние времени срабатывания реактивного двигателя и числа Циолковского на глубину проникания ударника в малопрочную грунтовую преграду и на скорость ударника сразу после сообщения ему реактивного импульса: а –  $v_0 = 1000$  м/с; б –  $v_0 = 2000$  м/с.

На рис.3 для обеих рассмотренных начальных скоростей взаимодействия  $v_0$  проиллюстрировано влияние параметров  $t_r$  и  $Z$  на полную глубину проникания ударника  $h_m$  и на его скорость  $v_{re}$  (5), приобретаемую сразу после действия реактивного импульса. Время включения реактивного двигателя  $t_r$  на рис.3 отнесено к полному времени проникания ударника  $t_{p0}$  в отсутствие реактивного доразгона (это время составляло  $t_{p0} = 25,1$  мс при  $v_0 = 1000$  м/с и  $t_{p0} = 30,1$  мс при  $v_0 = 2000$  м/с). Горизонтальными пунктирными линиями на рис.3 указана глубина проникания ударников без реактивного доразгона. Как свидетельствуют представленные данные, для обоих параметров  $t_r$  и  $Z$  существуют оптимальные значения, при которых обеспечивается максимальная глубина проникания. Эти значения и для  $v_0 = 1000$  м/с, и для  $v_0 = 2000$  м/с оказались примерно равными  $Z \approx 1,0$ ;  $t_r/t_{p0} \approx 0,8$ . При реализации параметров  $t_r$  и  $Z$  с данными значениями глубина проникания за счет реактивного доразгона повышается почти на 70% при  $v_0 = 1000$  м/с и на 40% при  $v_0 = 2000$  м/с. Очевидно, существование оптимальных режимов сообщения ударнику реактивного импульса обусловлено конкуренцией при работе реактивного двигателя двух факторов, один из которых способствует более глубокому прониканию (увеличение скорости ударника), а второй, напротив, препятствует (уменьшение массы ударника за счет выгорания топлива).

Интересно отметить, что при чересчур раннем действии реактивного импульса глубина проникания может даже снижаться по отношению к глубине проникания в отсутствие реактивного доразгона (рис.3). Преждевременное срабатывание реактивного двигателя неприемлемо и еще по одной причине. Скорость ударника при этом может стать недопустимо высокой с точки зрения обеспечения его прочности при проникании. Как показывают эксперименты, при изготовлении ударников из самой высокопрочной стали максимальная скорость взаимодействия с малопрочной грунтовой преградой (типа песка), при которой еще не наблюдаются значительные деформации головной части ударника и ее разрушение, не должна превышать 2500 м/с [1]. С целью контроля данного обстоятельства на рис.3 и приводятся кривые скоростей, приобретаемых ударником в результате реактивного доразгона при различных режимах его реализации.

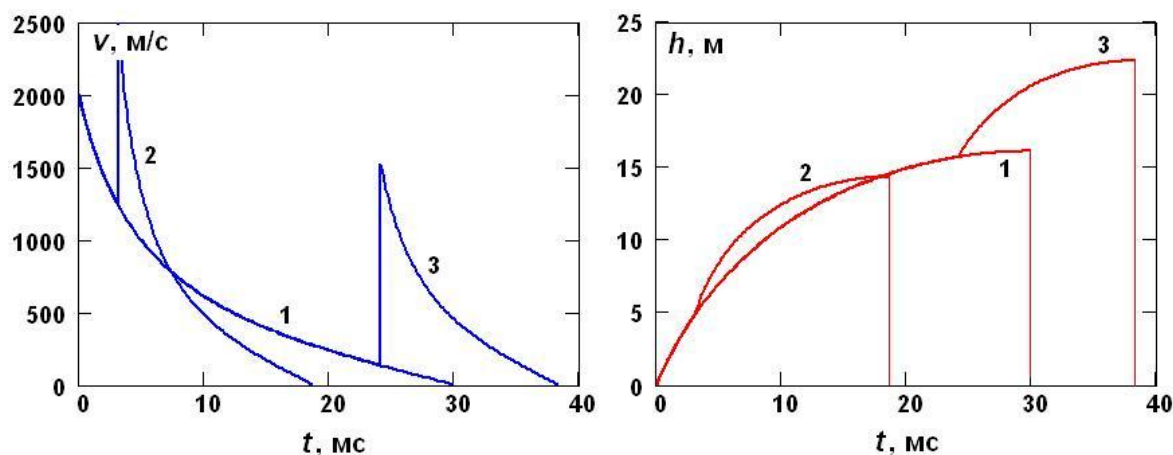


Рис.4 Динамика проникания ударников в малопрочную грунтовую преграду при начальной скорости  $v_0 = 2000$  м/с и различных режимах сообщения реактивного импульса:

1 – без реактивного импульс; 2 –  $Z = 1,0$ ;  $t_r/t_{p0} = 0,1$ ; 3 –  $Z = 1,0$ ;  $t_r/t_{p0} = 0,8$

Характер изменения с течением времени скорости и глубины проникания ударников при различных временах срабатывания реактивного двигателя показан на рис.4. Видно, что в случае срабатывания двигателя в самом начале проникания приобретенная ударником за счет реактивного импульса скорость впоследствии быстро падает из-за уменьшения массы ударника. В результате глубина проникания оказывается меньше, чем в отсутствие реактивного импульса. Действие же реактивного импульса на заключительной стадии проникания дает заметный эффект.

#### Литература

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. Закон сопротивления прониканию ударников в грунт // *Оборонная техника*. – 1995, №4. – С.32-34.
3. 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.
4. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. – М.: Высшая школа, 1990. – 607 с.