

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСА РЕАКТИВНОЙ ТЯГИ НА ГЛУБИНУ ПРОНИКАНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЗОНДА В ГРУНТ ПЛАНЕТЫ

С.В. Федоров, Н.А. Федорова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
e-mail: sm4-2009@mail.ru

Рассмотрена возможность увеличения глубины проникания высокоскоростных исследовательских зондов в грунтовые преграды за счет сообщения им дополнительного импульса реактивной тяги в процессе проникания. В предположении мгновенности действия реактивного импульса и с использованием эмпирического закона сопротивления преграды получено аналитическое решение задачи о движении недеформируемого ударника в сопротивляющейся среде. В рамках данной задачи определены оптимальные моменты времени сообщения реактивного импульса и числа Циолковского, при которых обеспечивается максимальное увеличение глубины проникания.

Ключевые слова: высокоскоростное проникание, недеформируемый ударник, реактивный двигатель, реактивный импульс, грунтовая преграда.

INFLUENCE OF THE JET THRUST IMPULSE ON DEPTH OF THE RESEARCH PROBE PENETRATION INTO PLANET SOIL

S.V. Fedorov, N.A. Fedorova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
e-mail: sm4-2009@mail.ru

The possibility to increase the depth of penetration of high-velocity research probes into soil targets due to imparting an additional jet thrust impulse to them during the penetration is considered. The analytical solution to a problem of non-deformable penetrator movement in the resisting matter is derived on the assumption about instantaneousness of a jet impulse action and with the use of the empirical law of target resistance. Within this problem, the optimum moment of time of the jet impulse delivery and the optimum Tsiolkovsky's number are determined, at which the maximum increase in penetration depth is ensured.

Keywords: high-velocity penetration, non-deformable penetrator, jet engine, jet impulse, soil target.

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 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 μ .

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

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

где A и C — эмпирические 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 τ_n предполагалось, что на границе контакта реализуется режим не скольжения, а прилипания частиц грунтовой преграды [3], при котором для расчета

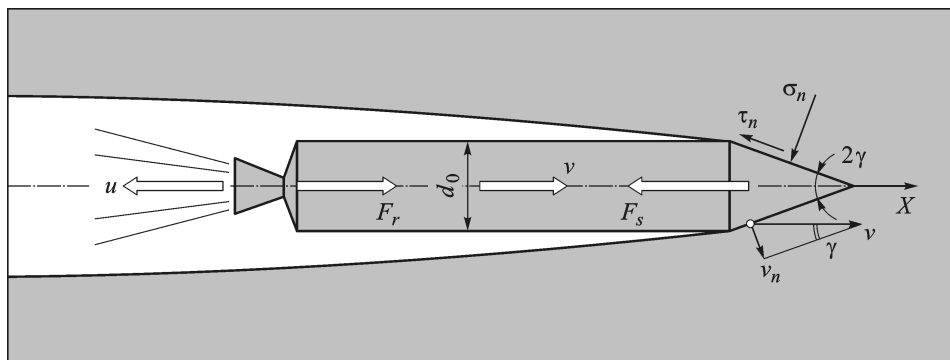


Рис. 1. Расчетная схема проникания в грунтовую преграду недеформируемого ударника с реактивным двигателем

τ_n можно воспользоваться приближенным соотношением

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

С использованием соотношений (1) и (2) рассчитывается сила сопротивления преграды F_s . Для ударников с конической формой головной части (2γ — угол раствора конуса, см. 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) и (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 $F_A = AS_m \sin^2 \gamma$ и $F_C = CS_m(1 + 0,5 \operatorname{ctg} \gamma)$ — 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)

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

(h — глубина проникания) позволяет получить следующие выражения, описывающие динамику проникания в преграду:

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

$$h = \frac{m}{2F_A} \ln \frac{F_A v_0^2 + F_C}{F_A v^2 + F_C}$$

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

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

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 рассмотрения является совершенно оправданным, так как размер головной части ударника пренебрежимо мал по сравнению 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 (т.е. 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 себя полезную нагрузку проникающего модуля). Полная масса ударника до срабатывания реактивного двигателя равна при этом $m = m_c + m_r$.

С учетом сказанного 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 времени t_r непосредственно перед срабатыванием двигателя скорость v_{rb} и глубина проникания h_r ударника были соответственно равны

$$v_{rb} = \sqrt{\frac{F_C}{F_A}} \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{F_A}{F_C}} v_0 \right) - \frac{\sqrt{F_A F_C}}{m} t_r \right];$$

$$h_r = \frac{m}{2 F_A} \ln \frac{F_A v_0^2 + F_C}{F_A v_{rb}^2 + F_C}.$$

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 значения $m_c = m/(1+Z)$. 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:

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

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

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 следующими: $A = 1700 \text{ кг/м}^3$; $C = 10 \text{ МПа}$. 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 2γ конической головной части ударника (см. 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 ($C = 100 \text{ МПа}$).

Как следует 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 2γ составляет менее 20° . При таком заострении головной части сложно обеспечить ее прочность. Поэтому при

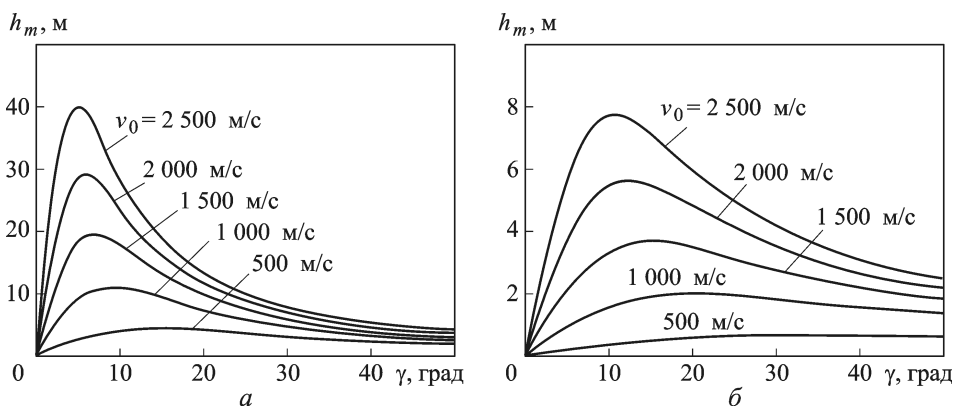


Рис. 2. Влияние угла раствора конической головной части ударника на глубину проникания в преграды различной прочности:

а — $C = 10$ МПа; *б* — $C = 100$ МПа

проведении дальнейших расчетов рассматривался ударник с углом полураствора конической головной части $\gamma = 15^\circ$, несколько бóльшим оптимального.

Исследования влияния реактивного импульса, сообщаемого ударнику в процессе его движения в преграде, на глубину проникания были проведены для двух начальных скоростей взаимодействия: $v_0 = 1000$ и 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.

На рис. 3, *а*, *б* для обеих рассмотренных начальных скоростей взаимодействия v_0 показано влияние параметров t_r и Z на полную глубину проникания ударника h_m и его скорость v_{re} (5), приобретаемую сразу после действия реактивного импульса. Время включения реактивного двигателя t_r (см. рис. 3, *а*, *б*) отнесено к полному времени проникания ударника t_{p0} при отсутствии реактивного доразгона ($t_{p0} = 25,1$ 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 показана 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: $Z \approx 1$; $t_r/t_{p0} \approx 0,8$. При реализации параметров t_r

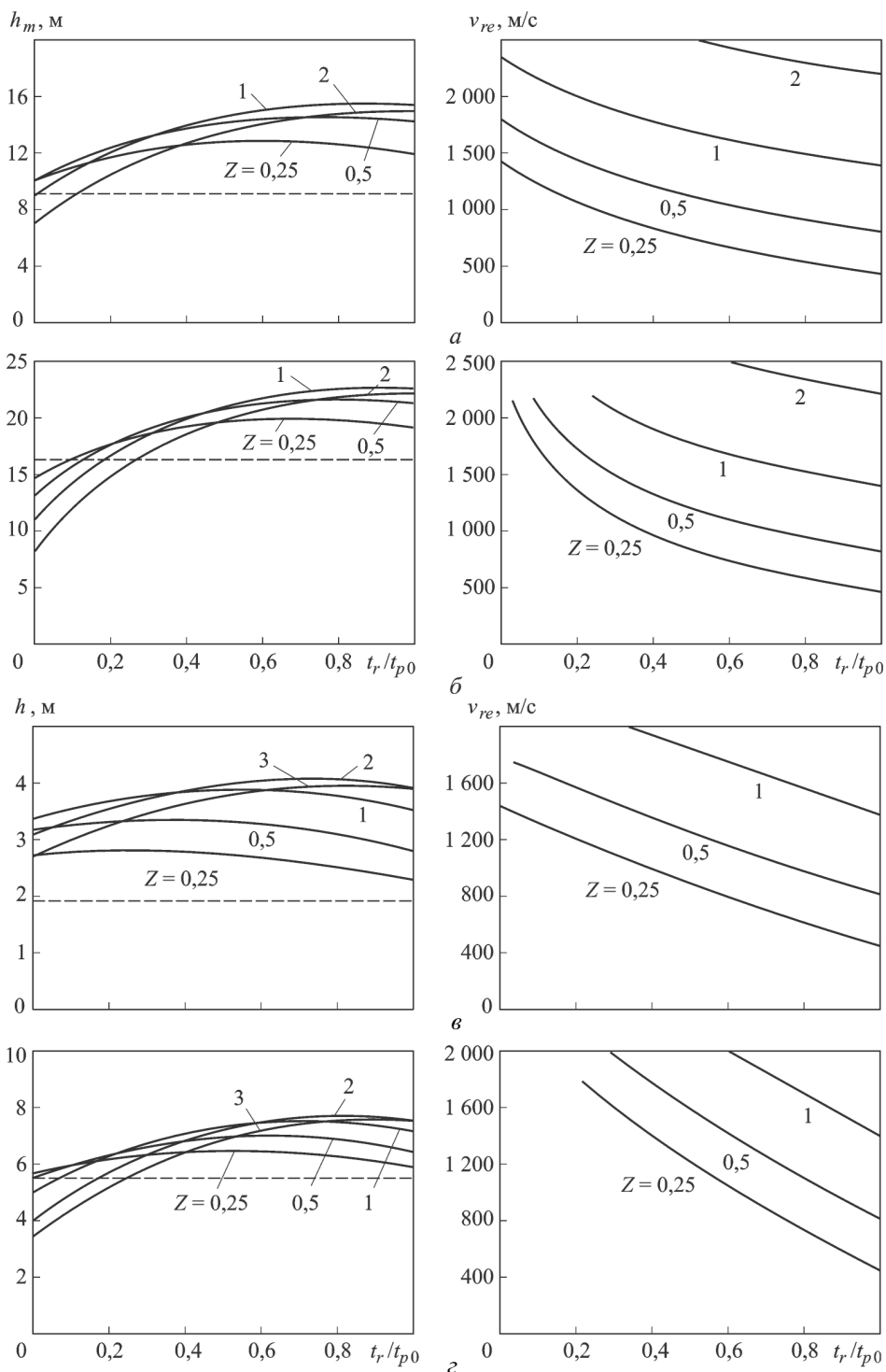


Рис. 3. Влияние времени срабатывания реактивного двигателя и числа Циолковского на глубину проникания ударника в малопрочную (а, б) и прочную (в, з) грунтовую преграду и на скорость ударника сразу после сообщения ему реактивного импульса:

а, в — $v_0 = 1000$ м/с; б, з — $v_0 = 2000$ м/с

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).

Отметим, что при чересчур раннем действии реактивного импульса глубина проникания может даже уменьшаться по отношению к глубине проникания при отсутствии реактивного доразгона (см. 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 2000...2400 м/с [5]. В целях контроля данного обстоятельства на рис. 3 и приводятся кривые скоростей, приобретаемых ударником в результате реактивного доразгона при различных режимах его реализации.

Данные, аналогичные проиллюстрированным на рис. 3 *а, б*, были получены также для случая проникания ударника в прочную каменистую преграду с прочностной составляющей в законе сопротивления (1) $C = 100$ МПа (рис. 3, *в, г*). Полное время проникания при отсутствии реактивного доразгона t_{p0} , являющееся (см. рис. 3, *в, г*) временным масштабом, составляло в этом случае $t_{p0} = 4$ мс при $v_0 = 1000$ м/с и $t_{p0} = 6,5$ мс при $v_0 = 2000$ м/с. Полученные результаты по-прежнему свидетельствуют о существовании оптимальных значений числа Циолковского Z и времени сообщения реактивного импульса t_r , при которых глубина проникания максимальна. Эти значения при обеих начальных скоростях взаимодействия составили для прочной каменистой преграды примерно $Z \approx 2$; $t_r/t_{p0} \approx 0,8$. Реализация реактивного доразгона с указанными параметрами позволяет увеличить глубину проникания ударника в прочную каменистую преграду в 2 раза при $v_0 = 1000$ м/с и приблизительно на 40 % при $v_0 = 2000$ м/с. Однако выбор числа Циолковского на уровне $Z \approx 2$ приводит к сообщению ударнику в результате реактивного доразгона чересчур высокой скорости, недопустимой с точки зрения обеспечения его прочности. Согласно экспериментальным данным использование наиболее высокопрочных сталей позволяет исключить значительные

деформации и разрушение ударников при взаимодействии с каменной преградой, если его скорость не превышает 1600...1800 м/с. С учетом данного обстоятельства рационально пойти на снижение числа Циолковского до значения $Z \approx 1$. Как следует из рис. 3, в, з, максимальная глубина проникания при этом снижается незначительно (не более чем на 5 % по сравнению со случаем $Z \approx 2$). В то же время скорость, приобретаемая ударником в результате действия реактивного импульса, при $Z \approx 1$ оказывается в допустимых пределах. Время сообщения импульса реактивной тяги, обеспечивающее максимум глубины проникания в прочную каменную преграду, при $Z \approx 1$ $t_r/t_{p0} \approx 0,5$ для $v_0 = 1000$ м/с и $t_r/t_{p0} \approx 0,7$ для $v_0 = 2000$ м/с.

Как и при проникании в малопрочный грунт (см. рис. 3, а, б), в случае прочной каменной преграды чересчур раннее действие реактивного импульса может приводить к снижению глубины проникания ударника по отношению к глубине проникания в отсутствие реактивного доразгона. Данный эффект проявлялся при начальной скорости взаимодействия $v_0 = 2000$ м/с (рис. 3, б) для чисел Циолковского $Z \geq 1$.

Характер изменения с течением времени скорости и глубины проникания ударников при различных временах срабатывания реактивного двигателя для случая малопрочной грунтовой преграды ($C = 10$ МПа) показан на рис. 4. Видно, что в случае срабатывания двигателя в самом начале проникания ($t_r/t_{p0} = 0,1$) приобретенная ударником за счет реактивного импульса скорость впоследствии быстро падает из-за уменьшения массы ударника. В результате глубина проникания оказывается меньше, чем без реактивного импульса. Действие же реактивного импульса на заключительной стадии проникания ($t_r/t_{p0} = 0,8$) дает заметный эффект.

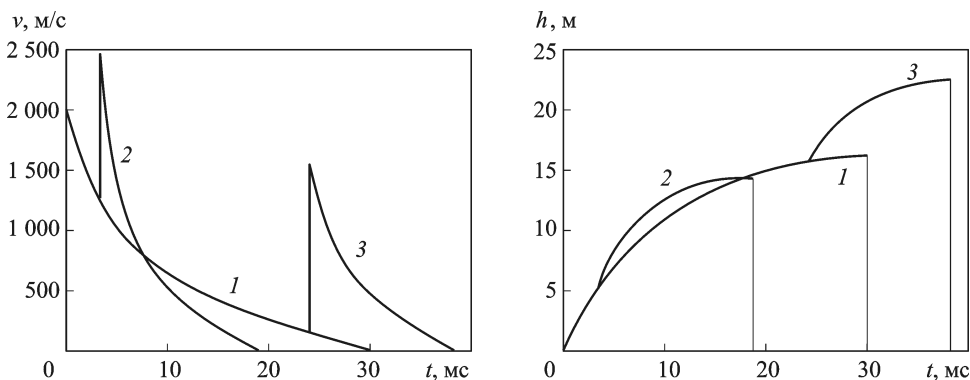


Рис. 4. Динамика проникания ударников в малопрочную грунтовую преграду при начальной скорости $v_0 = 2000$ м/с и различных режимах сообщения реактивного импульса:

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

Представленные в настоящей работе результаты свидетельствуют о возможности существенного увеличения глубины проникания ударников в грунтовые преграды различной прочности за счет оснащения ударника импульсным реактивным двигателем, срабатывающим в определенный момент проникания в преграду. Очевидно, что продолжение исследований в данном направлении должно позволить уточнить полученные данные; в развитие используемой модели процесса необходимо учесть конечность времени действия импульса реактивной тяги.

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.* 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.: Высш. шк., 1990. 607 с.
5. *Каминский М.В., Копытов Г.Ф., Киселев Ю.Г.* и др. Критическая скорость при внедрении ударников с конической носовой формой в грунтовые преграды // *Сб. материалов III Научн. конф. ВРЦ РАРАН “Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения”*. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2004. Т. 2. С. 642–647.

Статья поступила в редакцию 27.11.2012