

УДК 523.36; 531.58

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ПРОНИКАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ МОДУЛЕЙ
С ИМПУЛЬСНЫМ РЕАКТИВНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ В МАЛОПРОЧНЫЕ
ГРУНТОВЫЕ ПРЕГРАДЫ**

*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
bauman@bmstu.ru*

Высокоскоростные проникающие модули для зондирования поверхностного слоя Земли, а в ближайшей перспективе и других небесных тел Солнечной системы с целью изучения их строения и разведки полезных ископаемых [1] имеют прочный металлический корпус, внутри которого могут размещаться датчики и приборы различного назначения. Нагрузки, испытываемые такими модулями 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 для исследовательских проникающих модулей является увеличение глубины их проникания. Возможности решения этой задачи 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. Согласно экспериментальным данным [2] для ударников, изготовленных из высокопрочной стали, максимально допустимые начальные значения скоростей, при которых ударник не претерпевает еще существенных деформаций, лежат на уровне 2000 м/с при проникании в малопрочные грунтовые преграды и на уровне, несколько превышающем 1000 м/с, при взаимодействии с высокопрочными скальными породами.

В качестве возможного пути повышения проникающей способности исследовательских модулей может рассматриваться оснащение их импульсным реактивным двигателем, срабатывающим на определенной стадии проникания в преграду. Как было показано в [3] на частном примере, при определенном выборе параметров импульса реактивной

тяги прирост глубины проникания ударника может составлять десятки процентов. Однако представленные в [3] 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 мидаля, полная масса ударника 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 ударников с импульсным реактивным двигателем. Исследования были первоначально проведены применительно к случаю проникания в малопрочные грунтовые преграды, которого и касаются представляемые в работе результаты.

Динамика движения недеформируемого ударника с реактивным двигателем в грунтовой преграде рассчитывалась в рамках простого инженерного подхода, изложенного в [4, 5]. Однако в отличие от постановки задачи в [4, 5] с предположением о мгновенности действия импульса реактивной тяги в используемой модели учитывалась конечность времени работы импульсного реактивного двигателя. В основе расчетной методики лежит определение нормальных механических напряжений σ_n , действующих на поверхности головной части ударника, контактирующей с преградой (рис.1), с помощью эмпирического закона сопротивления в виде [6]:

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

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 ударника v на нормаль к поверхности его головной части в данной точке. При определении касательных напряжений τ_n на поверхности головной части (рис.1) предполагалось, что на границе контакта реализуется режим не скольжения, а прилипания частиц грунтовой преграды [7], при котором для расчета τ_n можно воспользоваться приближенным соотношением:

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

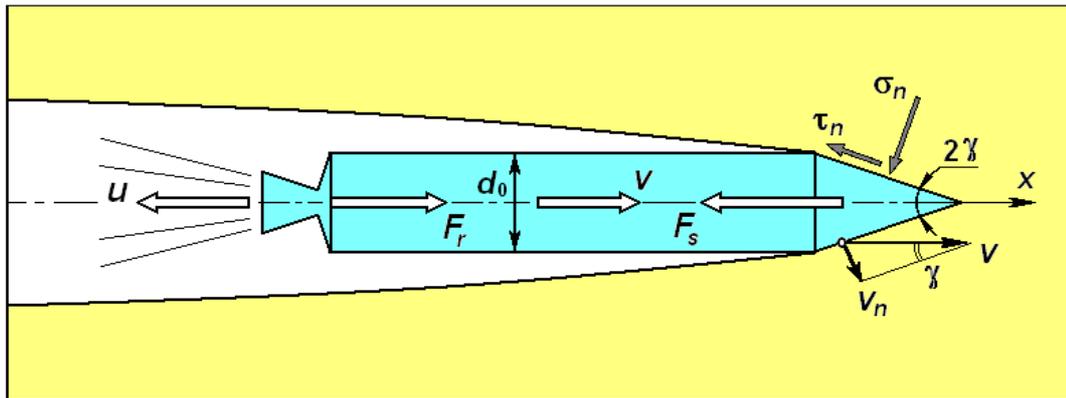


Рис.1. Расчетная схема проникания в грунтовую преграду недеформируемого ударника с реактивным двигателем

Как и в [4, 5], форма головной части ударника предполагалась конической с углом раствора 2γ (рис.1). Интегрирование механических контактных напряжений (1), (2) по поверхности конической головной части с учетом, что в этом случае $v_n = v \sin \gamma$, позволяет получить выражение для силы сопротивления преграды F_s , действующей на ударник при проникании

$$F_s = F_A v^2 + F_C,$$

в котором инерционный F_A и прочностной F_C коэффициенты определяются, как

$$F_A = A S_m \sin^2 \gamma ; \quad F_C = C S_m (1 + 0,5 \operatorname{ctg} \gamma), \quad (3)$$

где $S_m = \pi d_0^2 / 4$ – площадь мишени ударника (d_0 – диаметр ударника).

Во время работы реактивного двигателя динамика проникания ударника, помимо силы сопротивления преграды F_s , определяется также силой реактивной тяги F_r [8], зависящей от скорости истечения газовой струи u и массового расхода газа μ

$$F_r = \mu u. \quad (4)$$

Массовый расход газа μ предполагался постоянным в течение промежутка времени сообщения реактивного импульса τ_r , что, в свою очередь, при постоянной скорости истечения u приводило к неизменности реактивной силы в течение указанного времени τ_r . Количество реактивного топлива в составе ударника характеризовалось числом Циолковского $Z = m_r / m_c$, где m_r – масса реактивного топлива; m_c – масса конструкции ударника (без твердотопливного заряда), включающая, в том числе, полезную нагрузку проникающего модуля. Полная начальная масса ударника (до срабатывания реактивного двигателя)

равна при этом $m_0 = m_c + m_r$, что позволяет с использованием числа Циолковского представить ее составляющие, как

$$m_r = m_0 Z / (1 + Z); \quad m_c = m_0 / (1 + Z). \quad (5)$$

Если обозначить время начала работы реактивного двигателя t_{r0} , а текущую глубину проникания h , то систему соотношений, описывающих движение ударника в преграде (рис.1) в зависимости от времени t , можно записать в виде:

$$\begin{cases} m_0 \frac{dv}{dt} = -F_A v^2 - F_C; & 0 \leq t < t_{r0}, \\ [m_0 - \mu(t - t_{r0})] \frac{dv}{dt} = -F_A v^2 - F_C + F_r; & t_{r0} \leq t < t_{r0} + \tau_r, \\ m_c \frac{dv}{dt} = -F_A v^2 - F_C; & t \geq t_{r0} + \tau_r, \\ \frac{dh}{dt} = v. \end{cases} \quad (6)$$

Представленная система дифференциальных уравнений должна интегрироваться при начальных условиях $t=0$; $v = v_0$ (v_0 – начальная скорость ударника); $h=0$. При этом дополнительно должно обеспечиваться выполнение условия неотрицательности скорости проникания ударника $v \geq 0$. Как следует из (6), процесс проникания ударника с реактивным двигателем распадается на три стадии: $0 \leq t < t_{r0}$ – первая стадия (до момента начала работы двигателя); $t_{r0} \leq t < t_{r0} + \tau_r$ – вторая стадия (стадия действия реактивной силы) и $t \geq t_{r0} + \tau_r$ – третья стадия (после окончания работы двигателя). На первой и третьей стадиях масса ударника остается неизменной, а на второй уменьшается в зависимости от времени по линейному закону (вследствие выгорания реактивного топлива).

Интегрирование системы соотношений (6) приводит к следующим результатам. Изменение скорости и глубины проникания на первой стадии ($0 \leq t < t_{r0}$) дается выражениями

$$v = \sqrt{\frac{F_C}{F_A}} \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{F_A}{F_C}} v_0 \right) - \frac{\sqrt{F_A F_C}}{m_0} t \right]; \quad h = \frac{m_0}{2 F_A} \ln \left[\frac{F_A v_0^2 + F_C}{F_A v^2 + F_C} \right], \quad (7)$$

подставляя в которые $t = t_{r0}$, можно найти скорость v_1 и глубину проникания h_1 в момент начала работы реактивного двигателя. Закон изменения скорости на второй стадии ($t_{r0} \leq t < t_{r0} + \tau_r$) зависит от соотношения прочностного сопротивления преграды F_C и силы реактивной тяги F_r .

$$v = \sqrt{\frac{F_C - F_r}{F_A}} \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{F_A}{F_C - F_r}} v_1 \right) + \frac{\sqrt{F_A(F_C - F_r)}}{\mu} \ln \left(1 - \frac{\mu(t - t_{r0})}{m_0} \right) \right]; \quad F_r < F_C,$$

$$v = \frac{v_1}{1 - \frac{v_1 F_A}{\mu} \ln \left(1 - \frac{\mu(t - t_{r0})}{m_0} \right)}; \quad F_r = F_C, \quad (8)$$

$$v = \frac{\sqrt{\frac{F_r - F_C}{F_A}} \left(v_1 + \sqrt{\frac{F_r - F_C}{F_A}} \right) + \left(v_1 - \sqrt{\frac{F_r - F_C}{F_A}} \right) \left(1 - \frac{\mu(t - t_{r0})}{m_0} \right)^{\frac{2}{\mu} \sqrt{F_A(F_r - F_C)}}}{\left(v_1 + \sqrt{\frac{F_r - F_C}{F_A}} \right) - \left(v_1 - \sqrt{\frac{F_r - F_C}{F_A}} \right) \left(1 - \frac{\mu(t - t_{r0})}{m_0} \right)^{\frac{2}{\mu} \sqrt{F_A(F_r - F_C)}}}; \quad F_r > F_C.$$

Получить аналитическое выражение для закона изменения глубины проникания на второй стадии при этом не удастся – он устанавливается на основании численного интегрирования соотношения $dh/dt = v$ с подстановкой в него для скорости ударника одного из соотношений (8) и использованием начального условия $h = h_1$ при $t = t_{r0}$. Проводя указанное численное интегрирование до момента времени $t = t_{r0} + \tau_r$, получаем глубину проникания ударника h_2 в момент окончания работы реактивного двигателя. Скорость ударника v_2 на этот момент времени получается из (8) при подстановке $t = t_{r0} + \tau_r$.

Наконец, на третьей стадии проникания ($t \geq t_{r0} + \tau_r$), когда масса ударника снова остается неизменной и равной m_c , для определения скорости и глубины проникания имеем соотношения, аналогичные соотношениям (7) для первой стадии

$$v = \sqrt{\frac{F_C}{F_A}} \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{F_A}{F_C}} v_2 \right) - \frac{\sqrt{F_A F_C}}{m_c} [t - (t_{r0} + \tau_r)] \right]; \quad h = h_2 + \frac{m_c}{2 F_A} \ln \left[\frac{F_A v_2^2 + F_C}{F_A v^2 + F_C} \right]. \quad (9)$$

Так как проникание происходит до момента останова ударника ($v = 0$), результирующую глубину проникания h_p ударника с реактивным двигателем на основании второго из соотношений (9) можно определить, как

$$h_p = h_2 + \frac{m_c}{2 F_A} \ln \left[\frac{F_A}{F_C} v_2^2 + 1 \right]. \quad (10)$$

Ясно, что в случае когда сила реактивной тяги меньше прочностного сопротивления преграды ($F_r < F_C$), ударник может прекратить свое проникание ($v = 0$) уже на второй стадии, и тогда его результирующая глубина проникания h_p определится на основании численного интегрирования первого из соотношений (8).

Для оценки эффективности действия импульса реактивной тяги логично сопоставлять результирующую глубину проникания ударника с импульсным реактивным двигателем с глубиной проникания в ту же грунтовую преграду аналогичного «пассивного» ударника (ударника, проникающего в отсутствие действия реактивной силы). Реактивный и эквивалентный ему «пассивный» ударники, очевидно, должны иметь одинаковые форму головной части, диаметр миделя d_0 и начальную скорость v_0 . Масса эквивалентного «пассивного» ударника должна быть равна начальной массе m_0 ударника с реактивным двигателем.

Динамика проникания ударника в отсутствие действия реактивного импульса дается зависимостями (7) для первой стадии движения реактивного ударника, из которых получаются следующие выражения для определения полных времени t_{p0} и глубины проникания h_{p0} «пассивного» ударника:

$$t_{p0} = \frac{m_0}{\sqrt{F_A F_C}} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{F_A}{F_C}} v_0 \right); \quad h_{p0} = \frac{m_0}{2 F_A} \ln \left[\frac{F_A}{F_C} v_0^2 + 1 \right]. \quad (11)$$

Как показал анализ рассматриваемой задачи движения реактивного ударника в сопротивляющейся среде, для обобщения результатов ее решения удобно перейти к безразмерным параметрам, используя в качестве масштабов времени и глубины проникания значения t_{p0} и h_{p0} . При этом система уравнений (6) с учетом соотношений для коэффициентов силы сопротивления F_A , F_C (3), соотношения для реактивной силы F_r (4), соотношений для составляющих массы реактивного ударника m_r , m_c (5) и соотношения $\mu = m_r/\tau_r$ для определения массового расхода газа может быть переписана в следующем безразмерном виде:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{v}}{d\bar{t}} = -\frac{\operatorname{arctg} \sqrt{\alpha}}{\sqrt{\alpha}} (1 + \alpha \bar{v}^2); & 0 \leq \bar{t} < \bar{t}_{r0}, \\ \left[\left(Z + \frac{1}{Z} \right) \bar{\tau}_r - (\bar{t} - \bar{t}_{r0}) \right] \frac{d\bar{v}}{d\bar{t}} = -\bar{u} \left[\frac{1 + \alpha \bar{v}^2}{k_r} - 1 \right]; & \bar{t}_{r0} \leq \bar{t} < \bar{t}_{r0} + \bar{\tau}_r, \\ \frac{d\bar{v}}{d\bar{t}} = -(1 + Z) \frac{\operatorname{arctg} \sqrt{\alpha}}{\sqrt{\alpha}} (1 + \alpha \bar{v}^2); & \bar{t} \geq \bar{t}_{r0} + \bar{\tau}_r, \\ \frac{d\bar{h}}{d\bar{t}} = 2 \frac{\sqrt{\alpha} \operatorname{arctg} \sqrt{\alpha}}{\ln(1 + \alpha)} \bar{v}. \end{cases} \quad (12)$$

В записанной системе (12) безразмерные время \bar{t} , глубина проникания \bar{h} , скорость ударника \bar{v} , время начала действия реактивной силы \bar{t}_{r0} и продолжительность действия $\bar{\tau}_r$ определяются с использованием (11), как

$$\bar{t} = t/t_{p0}; \quad \bar{h} = h/h_{p0}; \quad \bar{v} = v/v_0; \quad \bar{t}_{r0} = t_{r0}/t_{p0}; \quad \bar{\tau}_r = \tau_r/t_{p0},$$

безразмерный параметр

$$\alpha = \frac{Av_0^2 \sin^2 \gamma}{C(1 + 0,5 \operatorname{ctg} \gamma)} \quad (13)$$

характеризует соотношение инерционного и прочностного сопротивления преграды, а безразмерная скорость истечения реактивной струи \bar{u} – соотношение скорости истечения газа и начальной скорости ударника

$$\bar{u} = u/v_0. \quad (14)$$

Наконец, безразмерный коэффициент k_r в системе (12) задает соотношение реактивной силы и прочностного сопротивления грунтовой преграды $k_r = F_r/F_C$ и выражается через другие безразмерные параметры, как

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

Решения (7) – (9) системы (6), описывающие динамику движения ударника с импульсным реактивным двигателем на различных стадиях проникания, при переходе к безразмерным переменным преобразуются к следующему виду:

$$\bar{v} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \operatorname{tg}[(1 - \bar{t}) \operatorname{arctg} \sqrt{\alpha}]; \quad \bar{h} = 1 - \frac{\ln(1 + \alpha \bar{v}^2)}{\ln(1 + \alpha)} \quad (15)$$

на первой стадии проникания при $0 \leq \bar{t} < \bar{t}_{r0}$;

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \sqrt{\frac{1 - k_r}{\alpha}} \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{\alpha}{1 - k_r}} \bar{v}_1 \right) + \frac{\bar{u}}{k_r} \sqrt{\alpha(1 - k_r)} \ln \left(1 - \frac{Z(\bar{t} - \bar{t}_{r0})}{(1 + Z)\bar{\tau}_r} \right) \right]; \quad k_r < 1, \\ \bar{v} &= \frac{\bar{v}_1}{1 - \bar{v}_1 \sqrt{\alpha} \operatorname{arctg} \sqrt{\alpha} \ln \left(1 - \frac{Z(\bar{t} - \bar{t}_{r0})}{(1 + Z)\bar{\tau}_r} \right)}; \quad k_r = 1, \\ \bar{v} &= \sqrt{\frac{k_r - 1}{\alpha}} \frac{\left(\bar{v}_1 + \sqrt{\frac{k_r - 1}{\alpha}} \right) + \left(\bar{v}_1 - \sqrt{\frac{k_r - 1}{\alpha}} \right) \left(1 - \frac{Z(\bar{t} - \bar{t}_{r0})}{(1 + Z)\bar{\tau}_r} \right)^{2 \frac{\bar{u}}{k_r} \sqrt{\alpha(k_r - 1)}}}{\left(\bar{v}_1 + \sqrt{\frac{k_r - 1}{\alpha}} \right) - \left(\bar{v}_1 - \sqrt{\frac{k_r - 1}{\alpha}} \right) \left(1 - \frac{Z(\bar{t} - \bar{t}_{r0})}{(1 + Z)\bar{\tau}_r} \right)^{2 \frac{\bar{u}}{k_r} \sqrt{\alpha(k_r - 1)}}}; \quad k_r > 1 \end{aligned} \quad (16)$$

на второй стадии проникания при $\bar{t}_{r0} \leq \bar{t} < \bar{t}_{r0} + \bar{\tau}_r$ и

$$\bar{v} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg}(\sqrt{\alpha} \bar{v}_2) - (1+Z) \operatorname{arctg} \sqrt{\alpha} (\bar{t} - (\bar{t}_{r0} + \bar{\tau}_r)) \right];$$

$$\bar{h} = \bar{h}_2 + \frac{1}{(1+Z) \ln(1+\alpha)} \ln \left(\frac{1 + \alpha \bar{v}_2^2}{1 + \alpha \bar{v}^2} \right) \quad (17)$$

на третьей стадии проникания при $\bar{t} \geq \bar{t}_{r0} + \bar{\tau}_r$. В зависимостях (16) \bar{v}_1 – безразмерное значение скорости проникания в момент начала действия реактивной силы, определяемое из первого из соотношений (15) при подстановке в него $\bar{t} = \bar{t}_{r0}$. Значения \bar{v}_2 и \bar{h}_2 в зависимостях (17) соответствуют безразмерным скорости и глубине проникания в момент окончания действия реактивной силы. Первое из этих значений (\bar{v}_2) определяется с привлечением одного из соотношений (16) при подстановке в него $\bar{t} = \bar{t}_{r0} + \bar{\tau}_r$, а второе (\bar{h}_2) – путем численного интегрирования последнего уравнения системы (12) в пределах от \bar{t}_{r0} до $\bar{t}_{r0} + \bar{\tau}_r$ с использованием для безразмерной скорости проникания \bar{v} соответствующей зависимости в (16). При этом в качестве начального значения безразмерной глубины проникания для проведения численного интегрирования на второй стадии движения реактивного ударника используется величина \bar{h}_1 , которая рассчитывается с помощью соотношений (15) при $\bar{t} = \bar{t}_{r0}$.

Замыкающее соотношение (10) для определения результирующей глубины проникания ударника с реактивным двигателем в безразмерной форме принимает вид

$$\bar{h}_p = \bar{h}_2 + \frac{\ln(1 + \alpha \bar{v}_2^2)}{(1+Z) \ln(1+\alpha)}. \quad (18)$$

Данное значение \bar{h}_p соответствует останову ударника ($\bar{v} = 0$) на третьей стадии проникания (после окончания работы реактивного двигателя). Однако, как уже отмечалось выше, при условии $F_r < F_C$ ($k_r < 1$) скорость ударника может обнулиться и на стадии работы реактивного двигателя. В этом случае безразмерное значение результирующей глубины проникания \bar{h}_p будет даваться численным интегрированием первого из соотношений (16) до момента обнуления скорости проникания.

Переход к описанию динамики проникания ударника с импульсным реактивным двигателем в безразмерной форме (12) – (18) с использованием в качестве масштабов времени и глубины проникания значений t_{p0} и h_{p0} (11) позволяет избавиться от влияния на результаты решения задачи начальной массы ударника m_0 и диаметра его миделя d_0 . Как видно из исходной системы безразмерных уравнений (12), ее решение зависит от пяти безразмерных параметров α , Z , \bar{u} , \bar{t}_{r0} и $\bar{\tau}_r$ (входящий в эту систему безразмерный коэффициент).
Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038

ээффициент k_r , равный отношению реактивной силы к прочностной составляющей силы сопротивления преграды, выражается через указанные параметры). Ни один из перечисленных параметров не зависит от значений m_0 и d_0 . Отсутствие такой зависимости оказывается очень удобным при обобщении результатов расчетов – они сохраняют справедливость для ударников произвольной начальной массы и размера миделя. При этом значения m_0 и d_0 влияют лишь на масштабы времени и глубины проникания.

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 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 $A = 1700 \text{ кг/м}^3$; $C = 10 \text{ МПа}$. Скорость истечения газа из реактивного двигателя ударника выбиралась на уровне, обеспечиваемом современными ракетными топливами, и составляла $u = 2000 \text{ м/с}$.

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

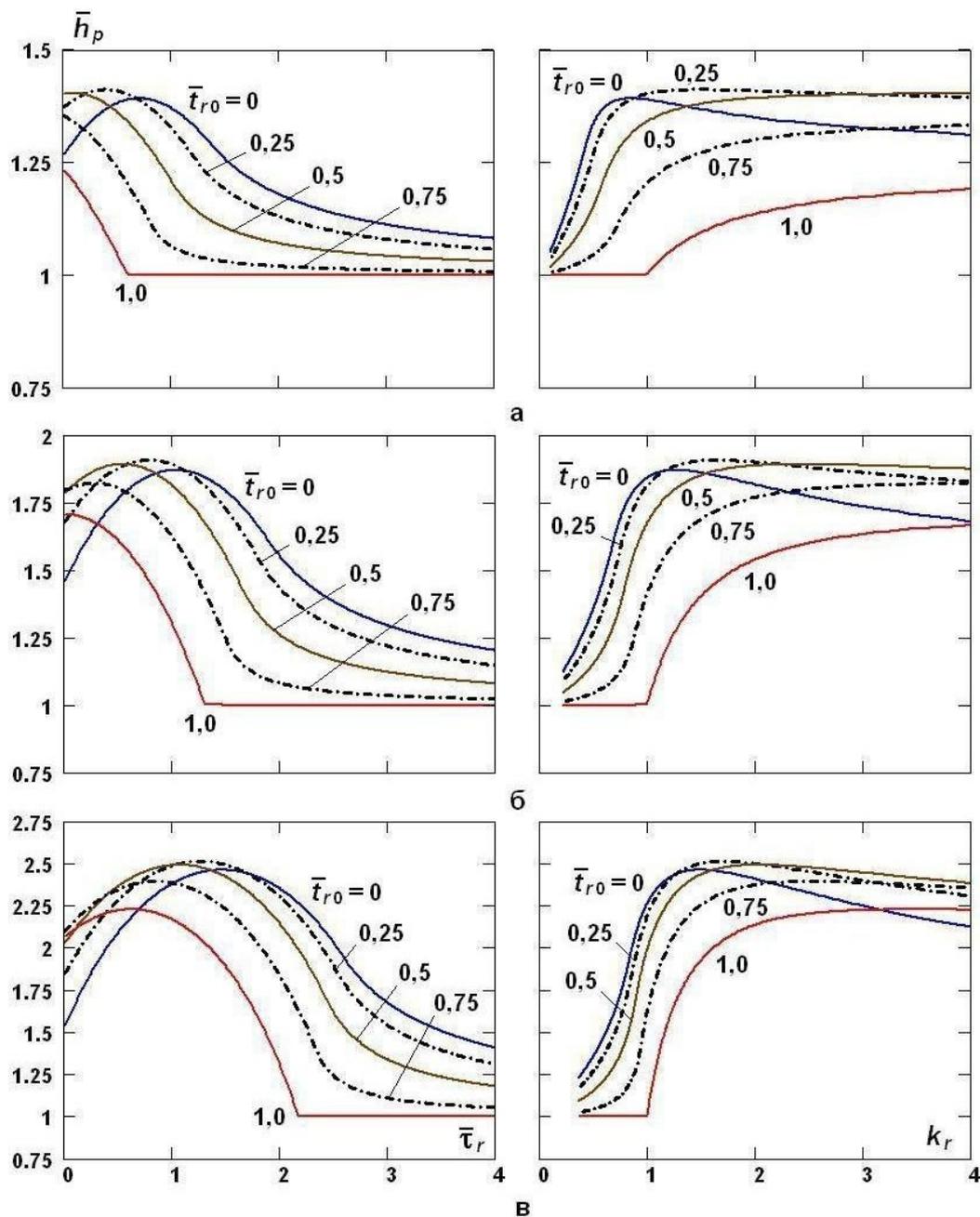


Рис. 2. Влияние на относительную глубину проникания реактивного ударника с начальной скоростью $v_0 = 500$ м/с продолжительности действия силы реактивной тяги и ее соотношения с прочностной составляющей силы сопротивления грунтовой преграды при различных значениях числа Циолковского и временах включения реактивного двигателя: а – $Z = 0,1$; б – $Z = 0,25$; в – $Z = 0,5$

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 ударника 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.2, 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 \bar{t}_{r0} , то для представленных на рис.2 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.2 при $\bar{t}_{r0} = 1$, что соответствует началу действия реактивной силы в момент останова ударника. 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 μ и, соответственно, сила реактивной тяги F_r (4). Когда реактивная сила становится меньше прочностного (статического) сопротивления преграды ($F_r \leq F_C$), проникание уже остановившегося ударника делается невозможным. За влиянием соотношения этих сил, выражаемого коэффициентом k_r , на прирост глубины проникания реактивного ударника можно проследить на основании данных, представленных на том же рис.2. 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 ударника ($\bar{t}_{r0} < 1$), определенный прирост глубины проникания достигается и при $F_r < F_C$. Что касается достижения максимального эффекта, то, как видно из рис.2, оно обеспечивается, когда сила реактивной тяги примерно в 1,5...2,0 раза превышает прочно-

стную составляющую силы сопротивления преграды (при времени начала действия реактивного импульса $\bar{t}_{r0} = 0,25$).

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 ударника за счет работы реактивного двигателя, в результате чего начальная скорость взаимодействия ударника с преградой возрастает, а его масса вследствие выгорания реактивного топлива уменьшается. Как видно из рис.2, такой вариант использования реактивного двигателя по достигаемому приросту глубины проникания существенно уступает режимам, при которых двигатель работает непосредственно на стадии движения ударника в грунтовой преграде.

Существенное влияние на проникание ударника 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.2). Очевидно, за счет дальнейшего увеличения значения Z (то есть, увеличения массы реактивного топлива по отношению к массе ударника) 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.

Представляет интерес проследить динамику проникания реактивного ударника при различных временных характеристиках действия импульса реактивной тяги. На рис.3 для рассматриваемого ударника с начальной скоростью $v_0 = 500$ м/с при значении числа Циолковского $Z = 0,5$ приводятся зависимости от безразмерного времени $\bar{t} = t/t_{p0}$ текущих безразмерных скорости $\bar{v} = v/v_0$ и глубины проникания $\bar{h} = h/h_{p0}$, полученные в расчетах с использованием трех различных продолжительностей работы реактивного двигателя $\bar{\tau}_r$ при временах его «включения» $\bar{t}_{r0} = 0$, $\bar{t}_{r0} = 0,25$ и $\bar{t}_{r0} = 0,75$ (штрихпунктирными линиями на рис.3 иллюстрируется динамика проникания ударника в отсутствие действия ре-

Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038

активного импульса). При этом для каждого значения \bar{t}_{r0} одно из значений $\bar{\tau}_r$ соответствует оптимальной длительности реактивного импульса, а два других выбирались меньшим и большим данного оптимального значения.

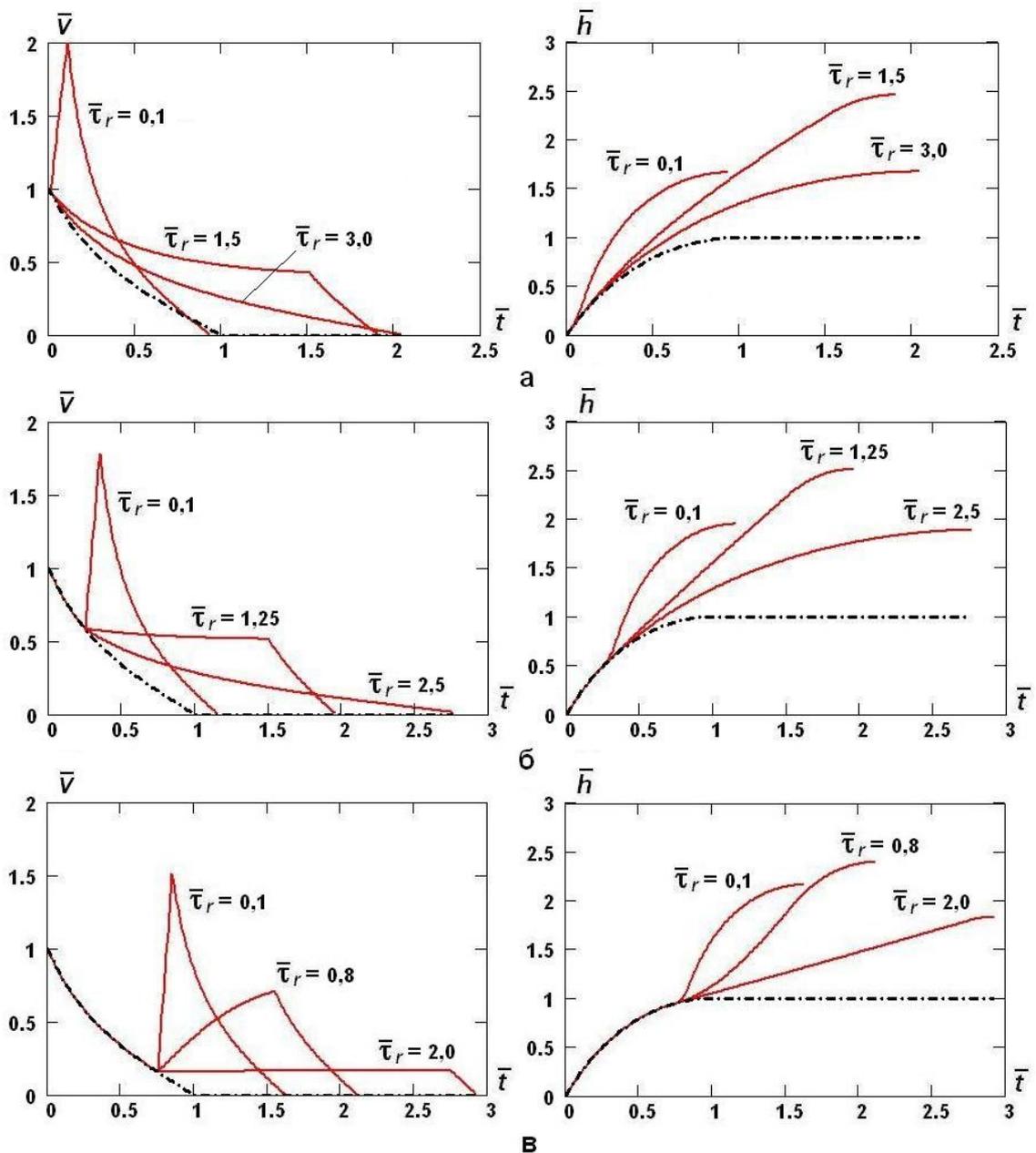


Рис. 3. Временные зависимости скорости и глубины проникания реактивного ударника при различных длительностях импульса реактивной тяги и временах начала его действия:

$$\text{а} - t_{r0}/t_{p0} = 0; \text{б} - t_{r0}/t_{p0} = 0,25; \text{в} - t_{r0}/t_{p0} = 0,75$$

Как видно из рис.3, при чересчур коротких импульсах реактивной тяги происходит резкий набор скорости ударником в процессе его действия (в этих случаях реактивная сила существенно превышает полную силу сопротивления преграды). Однако одновременно резко уменьшается и масса ударника (за счет сгорания топлива). В результате после окон-

чания действия реактивного импульса «облегченный» ударник начинает быстро тормозиться и не достигает той максимальной глубины проникания, которая обеспечивается при оптимальном значении $\bar{\tau}_r$. При слишком затянутых по времени реактивных импульсах, когда реактивная сила становится меньше прочностной составляющей силы сопротивления, достигаемый эффект прироста глубины проникания также снижается. В этом случае может происходить работа реактивного двигателя «вхолостую», когда в результате монотонного снижения скорости ударник останавливается при еще работающем двигателе, но развиваемой им тяги недостаточно для преодоления сопротивления преграды. Из всех рассмотренных на рис.3 вариантов реактивных импульсов наибольший прирост глубины проникания достигался при времени начала его действия $\bar{t}_{r0} = 0,25$ и продолжительности $\bar{\tau}_r = 1.25$ (рис.3, б). Интересно отметить, что в этом случае скорость проникания ударника в течение промежутка времени работы двигателя оставалась практически неизменной.

На рис.4 проиллюстрировано влияние на достигаемый эффект прироста глубины проникания \bar{h}_p начальной скорости реактивного ударника и числа Циолковского при различных продолжительностях действия реактивного импульса $\bar{\tau}_r$ и, соответственно, различных соотношениях $k_r = F_r/F_C$. Что касается безразмерного времени «включения» реактивной тяги \bar{t}_{r0} , то для представленных зависимостей $\bar{h}_p(\bar{\tau}_r)$ 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).

Как видно из рис.4, с увеличением начальной скорости ударника эффективность его реактивного «доразгона» существенно снижается. Так, если при $Z = 0,25$ и $v_0 = 250$ м/с глубину проникания реактивного ударника 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 ударника с реактивным двигателем с ростом его начальной скорости обусловлен сопровождающим этот рост снижением отно-

Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038

сительной доли химической энергии сгорания реактивного топлива по сравнению с начальной кинетической энергией ударника.

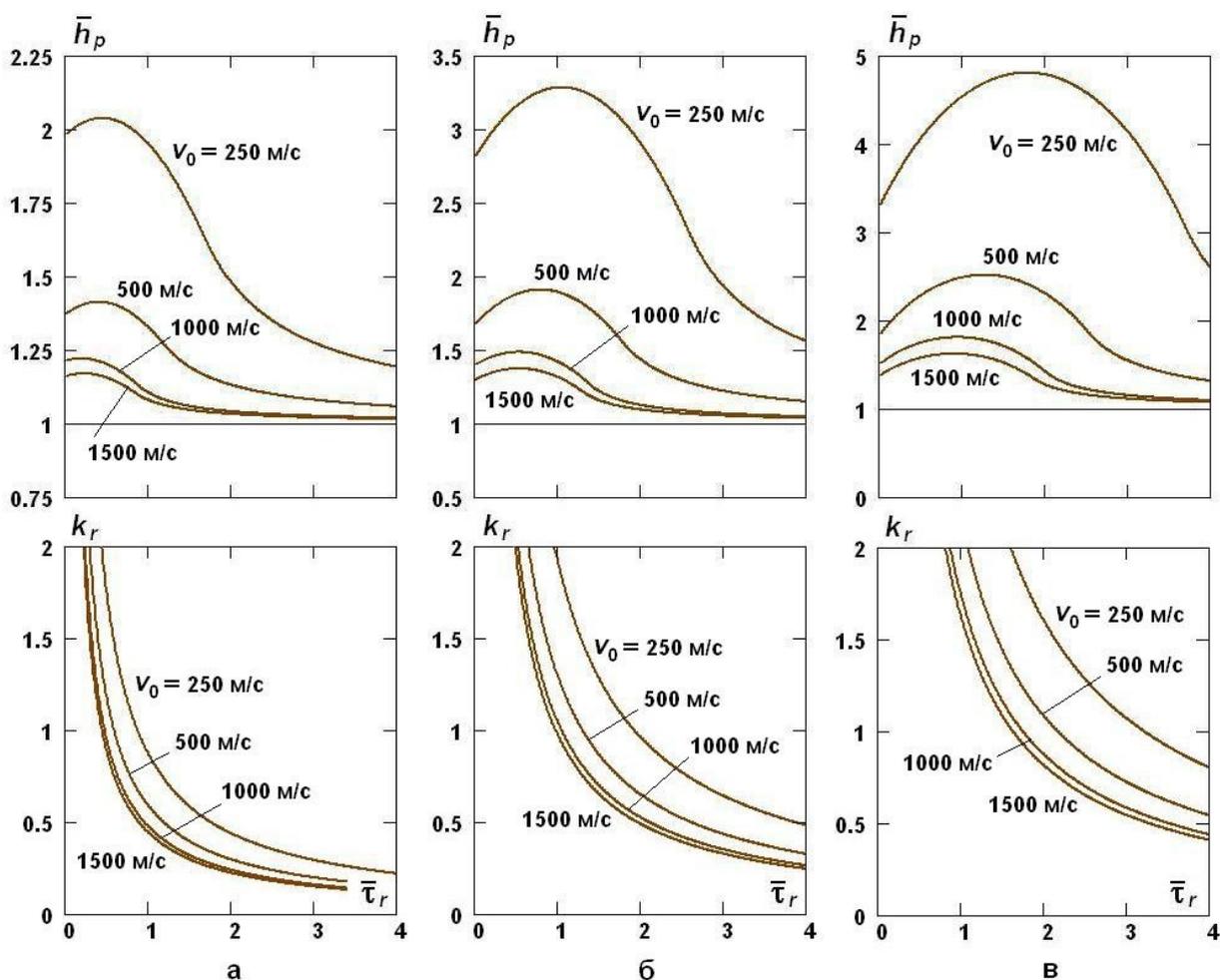


Рис. 4. Влияние на прирост глубины проникания и соотношение реактивной силы с прочностным сопротивлением грунтовой преграды времени работы реактивного двигателя при различных начальных скоростях ударника и числах Циолковского: а – $Z = 0,1$; б – $Z = 0,25$; в – $Z = 0,5$

Внимания заслуживает еще один вывод, который можно сделать на основании анализа данных, представленных на рис.4. С увеличением начальной скорости реактивного ударника 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 $k_r = F_r/F_C$, соответствующего оптимальным режимам реактивного «доразгона», остается практически неизменным и лежит в диапазоне 1,5...2,0.

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 ударника с реактивным двигателем, – действием дополнительной реактивной силы, способствующей увеличению глубины проникания, с одной стороны, и снижением массы ударника 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 ударника 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. Критическая скорость при внедрении ударников с конической носовой формой в грунтовые преграды / М.В. Каминский [и др.] Сборник материалов III научн. конф. Волжского регионального центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». В 2-х томах. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2004. Т. 2. С. 642-647.
3. 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.
4. Федорова Н.А. Зондирование поверхности планет с помощью реактивных проникающих модулей // *Студенческий научный вестник. Сборник статей докладов участников общеуниверситетской научно-технической конференции «Студенческая научная весна-2012»*, посвященной 165-летию Н.Е.Жуковского. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. Том XII. Часть 2. С. 385-391.
5. Федорова Н.А. Проникание ударника в грунтовую преграду с импульсом реактивной тяги // *Сборник трудов пятой Всероссийской конференции молодых ученых и специа-*

- листов «Будущее машиностроения России». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. С. 230-231.
6. Велданов В.А. Закон сопротивления прониканию ударников в грунт // Оборонная техника. 1995, № 4. С. 32-34.
 7. 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.
 8. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. М.: Высшая школа, 1990. 607 с.