

ВЛИЯНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВО-СКАЛЬНОЙ ПРЕГРАДЫ НА ГЛУБИНУ ПРОНИКАНИЯ УДАРНИКОВ ПРИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОМ ДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСА РЕАКТИВНОЙ СИЛЫ

С.В. Федоров

sergfed-64@mail.ru

Н.А. Федорова

n2402f@live.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Расчетным путем проанализировано влияние на возможное увеличение глубины проникания ударников в грунтово-скальные преграды с различными прочностными свойствами дополнительного импульса реактивной тяги, сообщаемого ударнику в процессе его движения в преграде. Рассмотрено проникание в преграды типа плотного грунта горной породы малой и высокой прочности при начальных скоростях взаимодействия в диапазоне от 250 до 1000 м/с. При скорости ударника 500 м/с и массе заряда твердого ракетного топлива, составляющей 20 % массы ударника, дополнительное действие импульса реактивной тяги грунтово-скальных преград для всех рассмотренных типов позволяет увеличить примерно в 2 раза глубину проникания. С увеличением начальной скорости относительный прирост глубины проникания при фиксированной массе твердотопливного заряда уменьшается, что обусловлено уменьшением относительной доли химической энергии сгорания ракетного топлива по сравнению с начальной кинетической энергией ударника

Ключевые слова

Высокоскоростное проникание, недеформируемый ударник, грунтово-скальная преграда, прочностные свойства, глубина проникания, реактивный импульс, число Циолковского

Поступила в редакцию 29.06.2015

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

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

Высокоскоростные проникающие модули, способные за счет имеющегося у них запаса кинетической энергии проникать в грунтово-скальные преграды на значительные расстояния, могут использоваться для решения ряда важных задач. К их числу относится, например, зондирование поверхностного слоя Земли, а в ближайшей перспективе и других космических тел Солнечной системы (планет, астероидов, комет) в целях изучения свойств пород, слагающих верхний слой коры, строения верхнего слоя, а также разведки полезных ископаемых [1]. В этом случае проникающие модули оснащаются датчиками и приборами различного назначения, которые в процессе и после заглубления модуля в породы верхнего слоя коры собирают и передают необходимые данные. При размещении в проникающем

модуле заряда взрывчатого вещества может быть также решена задача по разрушению и дроблению массивов горных пород — эффективность разрушающего действия взрыва при одной и той же массе взрывчатого вещества для заглубленного заряда существенно больше, чем для накладного (расположенного на поверхности разрушаемого массива горной породы) [2].

При взаимодействии с большой скоростью с грунтово-скальной преградой проникающий модуль-ударник подвергается воздействию чрезвычайно высоких перегрузок, которые не должны приводить ни к разрушению ударника, ни к выходу из строя аппаратуры, размещенной внутри его корпуса. Перегрузки, действующие на модуль-ударник при проникании, возрастают с увеличением его начальной скорости, что ограничивает ее предельно допустимые значения. Для обеспечения целостности проникающего модуля и сохранения работоспособности его приборной «начинки» начальная скорость модуля, по данным исследований проникания ударников в грунтово-скальные преграды [3, 4], не должна превышать 1000...1500 м/с. Поэтому возможности увеличения глубины проникания модулей-ударников, что представляет собой весьма актуальную задачу, в силу увеличения их скорости фактически отсутствуют.

В целях повышения проникающей способности в состав модуля-ударника может быть введен лидер, который не несет в себе никакой регистрирующей аппаратуры для определения свойств пенетрируемой породы и единственным назначением которого является формирование в преграде каверны (канала) необходимой протяженности [5]. Скорость лидера может существенно превышать скорость следующего за ним модуля-ударника с приборным оснащением и составлять несколько километров в секунду. При таких скоростях проникание лидера в грунтово-скальную преграду будет происходить в гидродинамическом режиме (с «растеканием» материала проникающего тела по стенкам формирующейся в преграде каверны). Определяющее влияние на глубину проникания тела в гидродинамическом режиме оказывают его длина и плотность [6]. В связи с этим лидер должен иметь форму удлиненного стержня и быть изготовленным из материала (металла) возможно большей плотности. С использованием результатов [7] может быть также учтено влияние на проникание стержня-лидера сжимаемости его материала и материала грунтово-скальной преграды. Определенные преимущества в проникании лидера при реализации гидродинамического режима взаимодействия достигаются за счет его сегментирования [5, 8] и изготовления из пористого материала (например, пористого вольфрама) [9]. Проникание стержня-лидера происходит до момента полного «размазывания» всего его материала (или материала всех элементов сегментированного лидера) по поверхности сформированной в преграде каверны, в результате чего она оказывается «подготовленной» для беспрепятственного движения основного модуля-ударника (рис. 1).

Что касается непосредственно самого модуля-ударника с полезной нагрузкой, то в качестве возможного пути повышения его проникающей способности можно рассматривать использование импульсного реактивного двигателя, сраба-

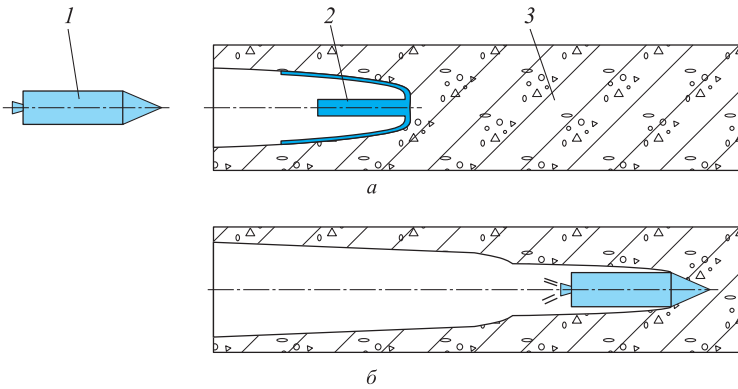


Рис. 1. Схема проникания в грунтово-скальную преграду реактивного модуля-ударника с имеющим более высокую скорость лидером (1 — реактивный модуль-ударник; 2 — лидер; 3 — грунтово-скальная преграда):
 а — стадия проникания лидера в гидродинамическом режиме; б — стадия проникания реактивного модуля-ударника

тывающего на определенной стадии проникания в преграду [10–12]. Данный вариант функционирования модуля-ударника остается пригодным для реализации как в случае отсутствия лидера, так и при его наличии (во втором случае модуль-ударник, прежде чем начать проникание с «включением» реактивной тяги, сначала движется в преграде по сформированной лидером каверне).

Результаты [12, 13] дают основание рассчитывать возможность существенного повышения проникающей способности ударников за счет сообщения им в процессе проникания дополнительного импульса реактивной тяги при взаимодействии с малопрочными грунтовыми преградами. Глубина проникания ударников только за счет имеющегося у них запаса кинетической энергии в высокопрочные скальные породы значительно меньше, чем в грунтовые. Поэтому большой практический интерес представляет ответ на вопрос, какой эффект прироста проникающей способности ударника можно получить, оснащая его импульсным реактивным двигателем, в случае взаимодействия со скальными породами. В связи с этим целью проводимых расчетно-теоретических исследований являлось выяснение влияния на возможное увеличение глубины проникания ударника, обеспечиваемое действием дополнительного импульса реактивной тяги в процессе движения ударника в грунтово-скальной преграде, ее прочностных свойств.

При проведении расчетов предполагали, что нагрузки, действующие на модуль-ударник при проникании, не приводят к большим деформациям, так что в процессе движения он может рассматриваться как абсолютно твердое недеформируемое тело. Силу сопротивления преграды определяли в рамках простого инженерного подхода [14], используя эмпирические зависимости для вычисления механических напряжений, действующих на поверхности контакта головной части ударника с преградой [15, 16]:

$$\sigma_{\Pi} = Av_{\Pi}^2 + C; \quad \tau_{\Pi} \approx 0,5C, \quad (1)$$

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

При задании силы реактивной тяги $F_r = \mu u$ [17] скорость u истечения газовой струи и массовый расход μ газа предполагались неизменными в течение всего промежутка времени работы реактивного двигателя, что обеспечивало неизменность значения F_r на стадии ее действия. При этом время t_{r0} включения реактивного двигателя и продолжительность τ_r его работы являлись варьируемыми параметрами [18] (рис. 2). Соотношение массы m_r твердотопливного заряда с полной начальной массой m_0 реактивного ударника характеризовалось числом Циолковского $Z = m_r / (m_0 - m_r)$ [17].

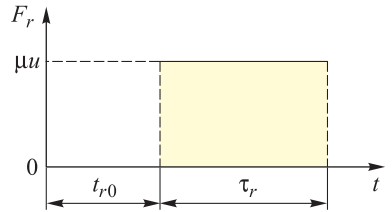


Рис. 2. Закон изменения реактивной силы

При описании динамики проникания ударника начальной стадией взаимодействия, когда глубина проникания еще меньше высоты головной части ударника, пренебрегалось (на этой стадии происходит увеличение площади контакта головной части ударника с преградой от нулевого значения с соответствующим изменением силы сопротивления). Исключение данного обстоятельства из внимания является совершенно оправданным, так как размер головной части ударника, как правило, пренебрежимо мал по сравнению с характерной глубиной его проникания в грунтово-скальные преграды.

Предполагая, что взаимодействие ударника с преградой происходит по нормали к ее поверхности (в этом случае обеспечивается максимальная глубина проникания), и пренебрегая начальной стадией, на которой глубина проникания не превышает высоту головной части ударника, динамику движения проникающего модуля с импульсным реактивным двигателем в грунтово-скальной преграде можно представить в следующем безразмерном виде [13, 19]:

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

В записанной системе (2) безразмерные время \bar{t} , глубина \bar{h} проникания, скорость \bar{v} ударника, время \bar{t}_{r0} начала действия реактивной силы 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 ударника, а в качестве масштабов времени и глубины проникания

$$t_{p0} = \frac{m_0}{S_m \sin \gamma \sqrt{AC(1+0,5\text{ctg}\gamma)}} \arctg \left[\sqrt{\frac{A}{C(1+0,5\text{ctg}\gamma)}} v_0 \sin \gamma \right],$$

$$h_{p0} = \frac{m_0}{2AS_m \sin^2 \gamma} \ln \left[\frac{Av_0^2 \sin^2 \gamma}{C(1+0,5\text{ctg}\gamma)} + 1 \right]$$
(3)

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

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

характеризует соотношение инерционного и прочностного сопротивления преграды (1), а безразмерная скорость истечения реактивной струи $\bar{u} = u/v_0$. Наконец, безразмерный коэффициент k_r в системе (2) задает соотношение реактивной силы и прочностного сопротивления грунтовой преграды и выражается через другие безразмерные параметры как

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

Приведенная система дифференциальных уравнений (2) должна интегрироваться при начальных условиях $t = 0$; $v = v_0$; $h = 0$. При этом дополнительно должно обеспечиваться выполнение условия неотрицательности скорости проникания ударника $v \geq 0$. Как следует из (2), процесс проникания ударника с реактивным двигателем распадается на три стадии: $0 \leq \bar{t} < \bar{t}_{r0}$ — первая стадия (до момента начала работы двигателя); $\bar{t}_{r0} \leq \bar{t} < \bar{t}_{r0} + \bar{\tau}_r$ — вторая стадия (стадия действия реактивной силы) и $\bar{t} \geq \bar{t}_{r0} + \bar{\tau}_r$ — третья стадия (после окончания работы двигателя). На первой и третьей стадиях масса ударника остается неизменной, а на второй — масса уменьшается в зависимости от времени по линейному закону (вследствие выгорания реактивного топлива). Очевидно, что в случае «запуска» реактивного двигателя сразу же с момента начала проникания ($\bar{t}_{r0} = 0$) первая из указанных стадий будет отсутствовать. Возможен также режим проникания реактивного ударника без третьей стадии — он реализуется, когда проникание прекращается ($v = 0$) при работающем реактивном двигателе вследствие того, что сила реактивной тяги меньше прочностного сопротивления грунтово-скальной

преграды. В случае превышения реактивной силой прочностного сопротивления преграды проникание реактивного ударника всегда будет происходить с наличием третьей стадии.

Описание динамики проникания реактивного ударника в безразмерной форме (2) с использованием в качестве масштабов времени и глубины проникания значений t_{p0} и h_{p0} (3) позволяет избавиться от влияния на результаты решения задачи начальной массы m_0 ударника и диаметра d_0 его миделя. Отсутствие такой зависимости удобно для обобщения результатов расчетов, они справедливы для ударников произвольных начальной массы и размера миделя. При этом значения m_0 и d_0 влияют лишь на масштабы времени и глубины проникания.

В проведенных расчетах было рассмотрено проникание ударников с импульсным реактивным двигателем в грунтово-скальные преграды трех разновидностей, контрастные по прочностным свойствам — типа плотного грунта, горной породы малой прочности и высокопрочной горной породы. Задаваемые для данных преград коэффициенты A и C в законе сопротивления (1), экспериментальное определение которых может быть осуществлено посредством пьезоакселерометрии проникания [20, 21], приведены в таблице. В дальнейшем для обозначения рассматриваемых грунтово-скальных преград примем аббревиатуры ГСП1 (плотный грунт), ГСП2 (малопрочная горная порода) и ГСП3 (высокопрочная горная порода). Начальная скорость ударников варьировалась в диапазоне 250...1000 м/с, а масса ракетного топлива составляла 10...30 % общей массы ударника. Скорость истечения газа из реактивного двигателя ударника выбиралась на уровне, обеспечиваемом современными ракетными топливами, и составляла $u = 2000$ м/с [22]. Коническая головная часть ударника имела угол раствора $2\gamma = 45^\circ$. Система (2) интегрировалась численно.

Коэффициенты в законе сопротивления для различных типов грунтово-скальных преград

Тип преграды	Условное обозначение	A , кг/м ³	C , МПа
Плотный грунт	ГСП1	1900	4
Горная порода малой прочности	ГСП2	2200	20
Высокопрочная горная порода	ГСП3	2400	100

На рис. 3–5 приведены результаты расчетов относительной глубины $\bar{h}_p = h_p/h_{p0}$ проникания ударников с реактивным двигателем (h_p — полная глубина проникания реактивного ударника; h_{p0} — полная глубина проникания эквивалентного ударника без реактивного двигателя (3)) в грунтово-скальные преграды различных типов при значениях числа Циолковского $Z = 0,1$; $Z = 0,25$ и $Z = 0,5$

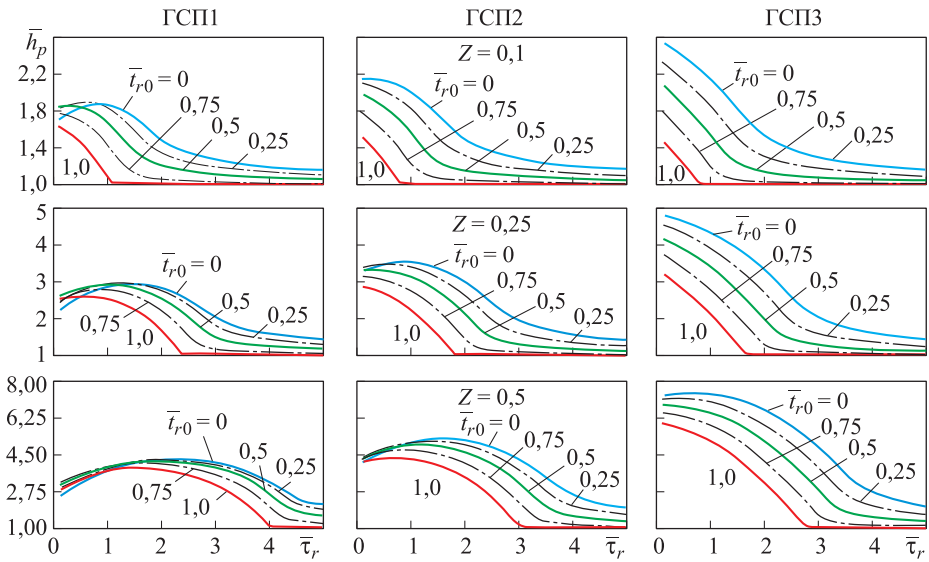


Рис. 3. Влияние временных характеристик реактивного импульса на относительную глубину проникания ударника в грунтово-скальные преграды с различными прочностными свойствами при начальной скорости 250 м/с

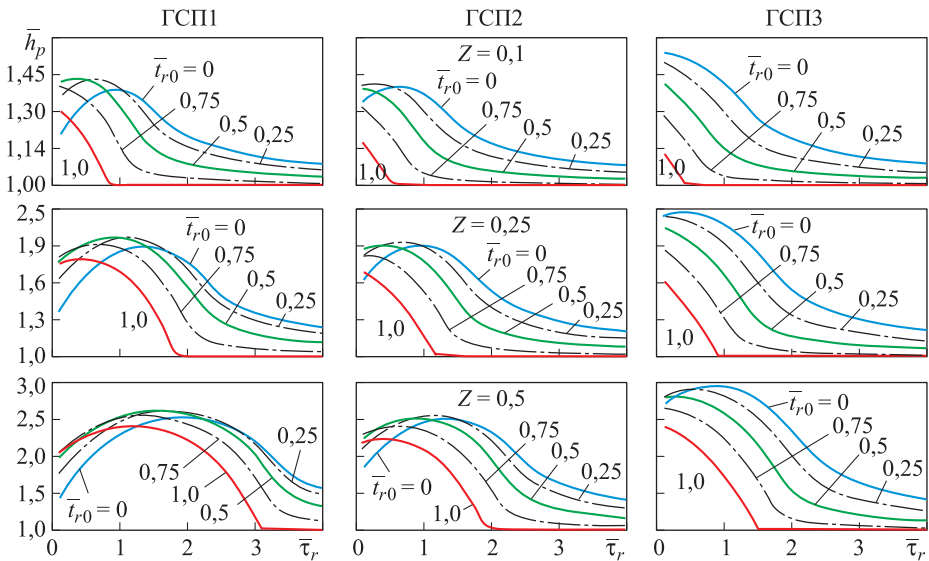


Рис. 4. Влияние временных характеристик реактивного импульса на относительную глубину проникания ударника в грунтово-скальные преграды с различными прочностными свойствами при начальной скорости 500 м/с

и начальных скоростях ударников $v_0 = 250$ м/с (см. рис. 3), $v_0 = 500$ м/с (см. рис. 4) и $v_0 = 1000$ м/с (см. рис. 5). В расчетах был рассмотрен весь возможный диапазон изменения значений \bar{t}_{r0} (относительного времени начала действия реактивной силы) — от запуска реактивного двигателя сразу же в момент начала проникания

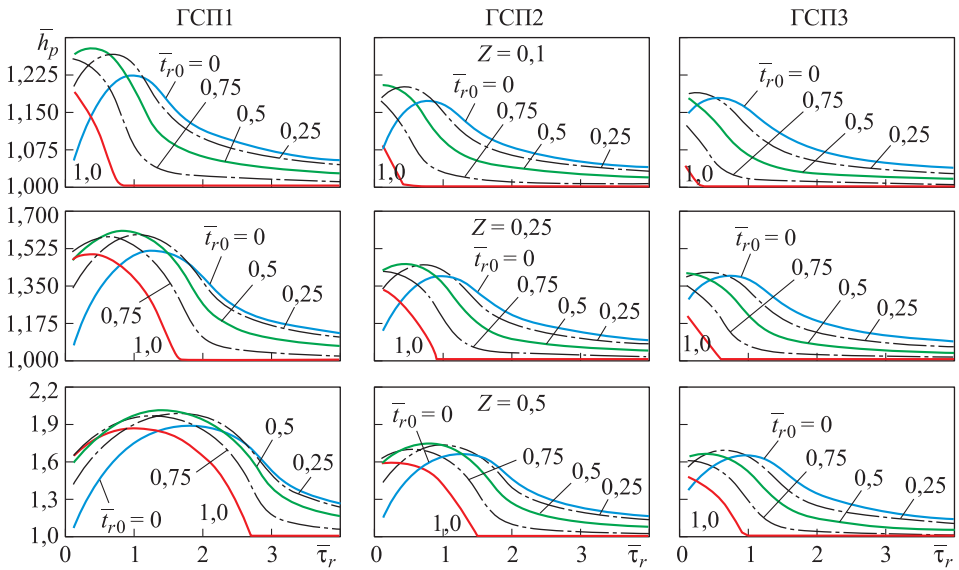


Рис. 5. Влияние временных характеристик реактивного импульса на относительную глубину проникания ударника в грунтово-скальные преграды с различными прочностными свойствами при начальной скорости 1000 м/с

($\bar{t}_{r0} = 0$) до его включения в момент полного останова ударника в преграде в результате торможения ($\bar{t}_{r0} = 1$).

Как следует из приведенных данных, при различных временах \bar{t}_{r0} включения реактивной тяги существует оптимальное время ее действия $\bar{\tau}_r$, при котором обеспечивается максимальное увеличение глубины проникания. Отметим, что изменение времени $\bar{\tau}_r$ при фиксированном значении числа Циолковского Z (фиксированной массе ракетного топлива m_r) приводит к соответствующему изменению силы F_r реактивной тяги, пропорциональной массовому расходу $\mu = m_r / \tau_r$: к увеличению при уменьшении $\bar{\tau}_r$ и уменьшению в противоположном случае.

При начальной скорости ударника $v_0 = 250$ м/с (см. рис. 3) максимально достижимое относительное увеличение глубины проникания при изменении Z от 0,1 до 0,5 составляет 1,85–4,3 для ГСП1; 2,15–5,25 для ГСП2 и 2,55–7,3 для ГСП3. При этом практически во всех рассмотренных случаях при $v_0 = 250$ м/с для достижения максимального эффекта необходимо запускать реактивный двигатель сразу же в момент начала проникания ($\bar{t}_{r0} = 0$). Лишь для грунтовой преграды ГСП1 максимум на кривой изменения \bar{h}_p при $\bar{t}_{r0} = 0,25$ включения реактивной тяги на несколько процентов больше, чем при $\bar{t}_{r0} = 0$. Если говорить об оптимальном времени $\bar{\tau}_r$ работы реактивного двигателя, обеспечивающем наибольшее увеличение глубины проникания при $v_0 = 250$ м/с (см. рис. 3), то с увеличением числа Циолковского Z от 0,1 до 0,5 оно возрастает примерно от 0,6 до

2,2 для ГСП1 и от 0,1 до 1,75 для ГСП2. При проникании с начальной скоростью $v_0 = 250$ м/с в высокопрочную горную породу (ГСП3) время действия реактивной силы должно быть минимально возможным (в идеале $\bar{\tau}_r = 0$) при $Z = 0,1$ и $Z = 0,25$ и должно составлять 0,6 при $Z = 0,5$.

Отметим, что режим реактивного «доразгона» при $\bar{t}_{r0} = 0$ (включение реактивного двигателя в момент начала проникания) и $\bar{\tau}_r \rightarrow 0$ (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 увеличивается, а его масса вследствие выгорания ракетного топлива уменьшается. Таким образом, при $\bar{t}_{r0} = 0$ и $\bar{\tau}_r = 0$ проникание реактивного ударника, имеющего начальную скорость v_0 и массу m_0 , фактически эквивалентно прониканию инертного ударника (без действия реактивного импульса в процессе взаимодействия с преградой), у которого значения начальной скорости и массы составляют $v_0 + u \ln(1 + Z)$ и $m_0/(1 + Z)$ [23].

Как видно на рис. 3, режим предварительного реактивного «доразгона» ($\bar{t}_{r0} = 0$, $\bar{\tau}_r = 0$) при относительно невысокой скорости ударника ($v_0 = 250$ м/с) дает максимальный эффект по увеличению глубины проникания для достаточно прочных грунтово-скальных преград (ГСП2 и ГСП3) при небольших значениях числа Циолковского. С увеличением значения Z и в случае преград с большим прочностным сопротивлением для получения максимального прироста \bar{h}_p при $v_0 = 250$ м/с необходимо переходить к режимам, при которых двигатель работает непосредственно на стадии движения ударника в преграде.

При начальной скорости ударника $v_0 = 500$ м/с (см. рис. 4) режим работы реактивного двигателя с $\bar{t}_{r0} = 0$ и $\bar{\tau}_r = 0$ выгоден только при проникании в высокопрочную горную породу (ГСП3) при небольшой относительной массе ракетного топлива ($Z = 0,1$). Во всех остальных случаях оптимальное относительное время действия реактивной силы $\bar{\tau}_r$ отлично от нуля и возрастает с увеличением числа Циолковского.

Анализ полученных результатов при еще большей скорости ударника ($v_0 = 1000$ м/с, см. рис. 5) свидетельствует о том, что при малых значениях числа Циолковского ($Z = 0,1$) для грунтово-скальных преград с достаточно высокой прочностью (ГСП2 и ГСП3) наибольшее повышение эффективности проникания происходит в случае предельно коротких импульсов реактивной силы ($\bar{\tau}_r \approx 0$), но сообщаемых не в режиме предварительного «доразгона» ($\bar{t}_{r0} = 0$), как это было при малой скорости ударника ($v_0 = 250$ м/с, см. рис. 3), а уже в процессе его движения в преграде ($\bar{t}_{r0} \approx 0,5$ для ГСП2 и $\bar{t}_{r0} \approx 0,25$ для ГСП3). Из рис. 5 следует, что при проникании в преграды ГСП2 и ГСП3 со скоростью 1000 м/с при $Z = 0,1$ возможен выбор режимов реактивной силы с относительным временем действия $\bar{\tau}_r \approx 0,5$, незначительно уступающих по увеличению глубины проникания абсолютным максимумам при $\bar{\tau}_r \approx 0$. С увеличением относительной

массы ракетного топлива до $Z = 0,25$ достигаемый эффект увеличения глубины проникания при $v_0 = 1000$ м/с проявляется в наибольшей степени, если $\bar{t}_{r0} \approx 0,5$, $\bar{\tau}_r \approx 0,4$ для ГСП2 и $\bar{t}_{r0} \approx 0,25$, $\bar{\tau}_r \approx 0,4$ для ГСП3. При $Z = 0,5$ оптимальная продолжительность реактивного импульса для обеих преград с достаточно высоким прочностным сопротивлением (ГСП2 и ГСП3) увеличивается примерно до $0,7 \dots 0,8$ (см. рис. 5).

Что касается малопрочной грунтовой преграды ГСП1, то при скорости ударника 1000 м/с для получения наибольшего прироста глубины проникания выгодно включать реактивную тягу через время $\bar{t}_{r0} = 0,5$ от начала взаимодействия и задавать время $\bar{\tau}_r$ ее действия, равным 0,3 при $Z = 0,1$; 0,8 при $Z = 0,25$ и 1,4 при $Z = 0,5$ (см. рис. 5).

Интересно проследить за ходом кривых $\bar{h}_p(\bar{\tau}_r)$, приведенных на рис. 3–5 при $\bar{t}_{r0} = 1$, что соответствует началу действия реактивной силы в момент останова ударника в преграде. В этом случае, начиная с некоторого значения $\bar{\tau}_r$, глубина проникания вообще не увеличивается. Объясняется данный факт тем, что с увеличением времени действия реактивного импульса при фиксированной массе ракетного топлива (фиксированном значении числа Z) уменьшаются массовый расход газа μ и реактивная сила F_r . Когда реактивная сила становится меньше прочностного (статического) сопротивления преграды, проникание уже остановившегося ударника делается невозможным. Важно также отметить, что в тех случаях, когда импульс реактивной тяги начинает действовать еще в процессе движения ударника ($\bar{t}_{r0} < 1$), определенное увеличение глубины проникания достигается и при значениях F_r , меньших прочностного сопротивления преграды.

При анализе данных по относительной глубине \bar{h}_p проникания реактивных ударников (см. рис. 3–5) обращает на себя внимание изменение соотношения между максимальным приростом \bar{h}_p в различных преградах с увеличением начальной скорости ударника. Так, если при $v_0 = 250$ м/с эффект увеличения глубины проникания за счет реактивного «доразгона» ударника проявлялся в наибольшей степени для самой прочной из рассмотренных преград (ГСП3) и в наименьшей степени для малопрочной грунтовой преграды (ГСП1), то при возрастании v_0 до 1000 м/с картина меняется на противоположную — при одном и том же значении числа Циолковского Z максимально достижимый прирост \bar{h}_p оказывается наименьшим для ГСП3 и наибольшим для ГСП1. Например, при $Z = 0,25$ значения максимумов \bar{h}_p для ГСП1, ГСП2 и ГСП3 составляют соответственно 3,0; 3,5 и 4,8 при $v_0 = 250$ м/с, 2,0; 1,9 и 2,2 при $v_0 = 500$ м/с и 1,6; 1,45 и 1,4 при $v_0 = 1000$ м/с (см. рис. 3–5).

Существенное влияние на проникание ударника с реактивным двигателем оказывает значение числа Циолковского. С увеличением Z прирост глубины проникания \bar{h}_p возрастает. При начальной скорости ударника $v_0 = 500$ м/с и оптимальных временных параметрах реактивного импульса значение \bar{h}_p воз-

растет при $Z = 0,1$ примерно на 45 % для малопрочной грунтовой преграды (ГСП1) и на 50 % для высокопрочной горной породы (ГСП3), при $Z = 0,25$ — в 2 раза для ГСП1 и в 2,2 раза для ГСП3, при $Z = 0,5$ — в 2,6 раза для ГСП1 и в 3 раза для ГСП3 (см. рис. 4). Очевидно, за счет дальнейшего увеличения значения Z (т. е. увеличения массы ракетного топлива по отношению к массе ударника) можно получить еще большее увеличение 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.

На рис. 6 показано влияние на достигаемый эффект увеличения глубины проникания \bar{h}_p начальной скорости реактивного ударника и числа Циолковского при различных продолжительностях действия реактивного импульса $\bar{\tau}_r$ и соответ-

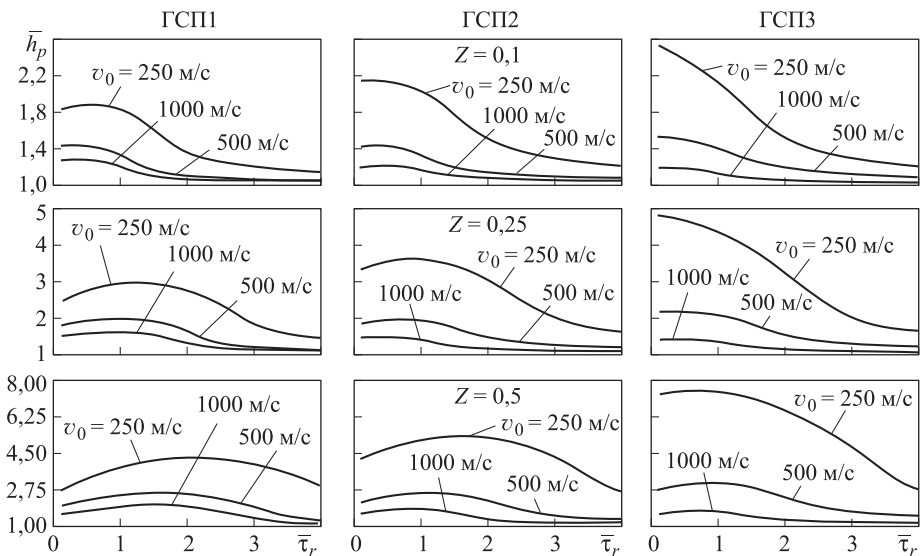


Рис. 6. Влияние начальной скорости реактивного ударника и числа Циолковского на относительную глубину проникания в грунтово-скальные преграды с различными прочностными свойствами

ственно разных соотношениях k_r реактивной силы и прочностного сопротивления преграды. Что касается безразмерного времени включения реактивного двигателя \bar{t}_{r0} , то оно составляло от 0 до 0,5 (в зависимости от начальной скорости ударника и типа грунтово-скальной преграды) и выбиралось из условия достижения максимального увеличения глубины проникания. Как оказалось, с увеличением началь-

ной скорости некоторую выгоду дает сдвиг момента запуска реактивного двигателя на более позднее время \bar{t}_{r0} (см. рис. 3–5). 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 на рис. 6, с увеличением начальной скорости ударника эффективность его реактивного «доразгона» существенно снижается для всех рассмотренных грунтово-скальных преград. Так, если при $Z = 0,25$ и $v_0 = 250$ м/с глубину проникания реактивного ударника при надлежащем выборе параметра $\bar{\tau}_r$ можно увеличить в 3 раза для ГСП1, в 3,5 раза для ГСП2 и почти в 5 раз для ГСП3, то при начальной скорости 1000 м/с и том же количестве ракетного топлива (том же значении Z) максимально возможное увеличение \bar{h}_p для данных преград составляет соответственно 60, 45 и 40 %. Очевидно, зафиксированный эффект уменьшения относительного прироста глубины проникания ударника с реактивным двигателем с увеличением его начальной скорости обусловлен сопровождающим это увеличение снижением относительной доли химической энергии сгорания ракетного топлива по сравнению с начальной кинетической энергией ударника.

В целом проведенные исследования свидетельствуют, что действие импульса реактивной силы позволяет существенно увеличить глубину проникания ударников в грунтово-скальные преграды с различными прочностными свойствами. Важно также отметить, что максимальное увеличение глубины проникания во многих случаях достигается не при предварительном (до начала взаимодействия с преградой) срабатывании реактивного двигателя, а при его работе уже в процессе проникания ударника в преграду.

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. *Физика взрыва* / под ред. Л.П. Орленко. В 2 т. Т. 1. М.: Физматлит, 2004. 832 с.
3. *Критическая скорость при внедрении ударников с конической носовой формой в грунтовые преграды* / М.В. Каминский, Г.Ф. Копытов, Ю.Г. Киселев, Ю.В. Кочнев, В.А. Могилев, Ю.А. Фатеев // Сб. материалов III науч. конф. Волжского регионального центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». В 2 т. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2004. Т. 2. С. 642–647.
4. Forrester M.J., Lee L.M., Jenrette B.D. Laboratory-scale penetration experiments into geological targets to impact velocities of 2.1 km/s // *J. Appl. Mech.* 1986. Vol. 53. No. 2. P. 317–320.
5. Федоров С.В., Велданов В.А. Применение сегментированных ударников для формирования каверны в грунтово-скальных преградах // *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*. 2012. № 1(71). С. 43–50.
6. Сагомоян А.Я. Проникание. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 1974. 300 с.
7. Федоров С.В., Баянова Я.М. Особенности гидродинамического режима проникания удлиненных ударников с учетом сжимаемости материалов // *ЖТФ*. 2011. Т. 81. № 9. С. 45–51.

8. Федоров С.В., Велданов В.А. Численное моделирование формирования каверны в грунте при воздействии потока высокоскоростных металлических ударников // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 7. С. 134–137.
9. Федоров С.В. К определению глубины проникания пористых ударников при гипер-скоростном взаимодействии // ЖТФ. 2007. Т. 77. № 10. С. 131–134.
10. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Optimization of penetration into geological and concrete shields by impactor with jet thruster // Journal of Mechanics of Materials and Structures. 2008. Vol. 3. No. 4. P. 707–727.
11. Велданов В.А. Численная оценка проникания модулей космических аппаратов в астероиды // Тр. Междунар. науч. конф. «Космическая защита Земли». Снежинск: РФЯЦ–ВНИИТФ, 1997. С. 173–178.
12. Федорова Н.А., Велданов В.А., Даурских А.Ю., Федоров С.В. Влияние реактивной тяги на проникание пенетраторов при изучении строения поверхностного слоя космических объектов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 2. DOI: 10.7463/0214.0699035 URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/699035.html>
13. Федорова Н.А. Определение глубины проникания высокоскоростных исследовательских модулей с импульсным реактивным двигателем в малопрочные грунтовые преграды // Электрон. журн. Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 12. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/638157.html>
14. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Engineering models of high speed penetration into geological shields // Central European Journal of Engineering. 2014. No. 4(1). P. 1–19.
15. Велданов В.А. Закон сопротивления прониканию ударников в грунт // Оборонная техника. 1995. № 4. С. 32–34.
16. 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.
17. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. М.: Высш. шк., 1990. 607 с.
18. Велданов В.А., Наумов А.Н. Влияние времени включения и времени работы газодинамического разгонного устройства // Тр. Междунар. конф. «V Харитоновские тематические научные чтения». Саров: ВНИИЭФ, 2003. С. 499–501.
19. Федоров С.В., Федорова Н.А., Велданов В.А. Использование импульса реактивной тяги для увеличения глубины проникания исследовательских модулей в малопрочные грунтовые преграды // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2014. № 4(84). С. 53–63.
20. Расчет проникания недеформируемых ударников в малопрочные преграды с использованием данных пьезоакселерометрии / В.А. Велданов, В.А. Марков, В.И. Пусев, А.М. Ручко, М.Ю. Сотский, С.В. Федоров // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 7. С. 94–104.
21. Исследование динамических механических свойств алюминиевых сплавов методом акселерометрии / В.А. Велданов, В.А. Марков, В.И. Пусев, А.М. Ручко, М.Ю. Сотский, Ю.М. Сотский, С.В. Федоров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. № 2. С. 37–46.
22. Внутренняя баллистика РДТТ / под ред. А.М. Липанова и Ю.М. Милехина. М.: Машиностроение, 2007. 504 с.
23. Федоров С.В., Федорова Н.А. Влияние импульса реактивной тяги на глубину проникания исследовательского зонда в грунт планеты // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 1(13). URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/airborne/571.html>

Федоров Сергей Владимирович — старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Федорова Наталия Александровна — студентка 5-го курса кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Федоров С.В., Федорова Н.А. Влияние прочностных свойств грунтово-скальной преграды на глубину проникания ударников при дополнительном действии импульса реактивной силы // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 4. С. 40–56.

DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4-40-56

INFLUENCE OF THE SOIL AND ROCKY TARGET STRENGTH PROPERTIES ON PROJECTILES PENETRATION DEPTH WITH ADDITIONAL ACTION OF THE JET THRUST IMPULSE

S.V. Fedorov

sergfed-64@mail.ru

N.A. Fedorova

n2402f@live.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The purpose of this work was to analyze the influence of additional jet thrust impulse enclosed to the projectile in the course of its movement in a target on a possible increment of penetration depth into soil and rocky targets with various strength properties. The analysis was performed by the calculation method. We defined the dynamics of projectile penetration within the model of a non-deformable body of variable weight moving under the target resistance force and jet force (in operating time of the jet engine). We calculated soil and rocky target resistance force using the empirical resistance law which establishes the dependence of mechanical tension on a contact surface of the projectile head part for the target on the projectile velocity. We considered penetration into such targets as dense soil, low-strength rock and high-strength rock at initial interaction velocities in the range from 250 to 1000 m/s. Consequently, for soil and rocky targets with various strength properties we defined the beginning time and duration of the jet impulse action considering the most possible increment of penetration depth. In many cases the greatest increase in penetration depth is reached not at preliminary (prior to interaction with a target) operation of the jet engine, but during its work already in the course of the projectile movement in a target. For projectile velocity of 500 m/s and mass of solid rocket propellant charge making 20 % of the projectile mass, additional action of the jet thrust impulse allows for the increase in penetration depth appro-

Keywords

High-velocity penetration, non-deformable projectile, soil and rocky target, strength properties, penetration depth, jet impulse, Tsiolkovsky number

ximately twice for all considered types of soil and rocky targets. With the increase in initial velocity, the relative increment of penetration depth decreases at the fixed mass of a solid propellant charge. It is caused by the decrease in a relative share of chemical energy of rocket propellant combustion in comparison with initial kinetic energy of the projectile. For projectile velocity of 1000 m/s and a reserve of rocket propellant in 20 % of projectile weight, the penetration depth increment reaches 60 % for dense soil, 45 % for low-strength rock and 40 % for high-strength rock at a rational choice of jet impulse parameters

REFERENCES

- [1] Veldanov V.A., Smirnov V.E., Khavroshkin O.B. Lunar penetrator: reducing overloading and penetration control. *Solar System Research*, 1999, vol. 33, no. 5, pp. 432–436.
- [2] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva. V 2 t. T. 1* [Physics of explosion. In 2 vol. Vol. 1]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 832 p.
- [3] Kaminskiy M.V., Kopytov G.F., Kiselev Yu.G., Kochnev Yu.V., Mogilev V.A., Fateev Yu.A. Critical velocity at introduction of projectiles with a conic nose form into soil targets. *Sb. mat. III nauch. konf. Volzhskogo regionalnogo centra RARAN "Sovremennyye metody proektirovaniya i otrabotki raketno-artilleriyskogo vooruzheniya". V 2 t.* [Collection of papers of the III-rd sci. conf. of the RAMAS Volga regional center "Advanced methods of design and development of missile and artillery weapons". In 2 vol.]. Sarov, RFYaC–VNIIEF Publ., 2004, vol. 2, pp. 642–647 (in Russ.).
- [4] Forrestal M.J., Lee L.M., Jenrette B.D. Laboratory-scale penetration experiments into geological targets to impact velocities of 2.1 km/s. *J. Appl. Mech.*, 1986, vol. 53, no. 2, pp. 317–320.
- [5] Fedorov S.V., Veldanov V.A. Application of segmented projectiles for cavity formation in soil and rocky targets. *Izv. Ross. Akad. raketnykh i artilleriyskikh nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences], 2012, no. 1(71), pp. 43–50 (in Russ.).
- [6] Sagomonyan A.Ya. Pronikanie [Penetration]. Moscow, Mos. Gos. Univ. Publ., 1974, 300 p.
- [7] Fedorov S.V., Bayanova Ya.M. Penetration of long strikers under hydrodynamic conditions with allowance for the material compressibility. *Technical Physics. Russ. J. Appl. Phys.*, 2011, vol. 56, no. 9, pp. 1266–1271.
- [8] Fedorov S.V., Veldanov V.A. Numerical simulation of cavity formation in soil by a flux of high-speed metallic penetrators. *Technical Physics. Russ. J. Appl. Phys.*, 2006, vol. 51, no. 7, pp. 952–955.
- [9] Fedorov S.V. On the penetration depth of a porous striker moving with a hypersonic velocity. *Technical Physics. Russ. J. Appl. Phys.*, 2007, vol. 52, no. 10, pp. 1379–1382.
- [10] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Optimization of penetration into geological and concrete shields by impactor with jet thruster. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2008, vol. 3, no. 4, pp. 707–727.
- [11] Veldanov V.A. Numerical estimate of spacecrafts modules penetration into asteroids. *Tr. Mezhdunar. nauch. konf. "Kosmicheskaya zashchita Zemli"* [Proc. of Int. sci. conf. "Space Protection of Earth"]. Snezhinsk, RFYaC–VNIITF Publ., 1997, pp. 173–178 (in Russ.).

- [12] Fedorova N.A., Veldanov V.A., Daurskikh A.Yu., Fedorov S.V. Influence of jet thrust on penetrator penetration when studying the structure of space object blanket. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science & Education of Bauman MSTU. Electronic Journal], 2014, no. 2. DOI: 10.7463/0214.0699035
Available at: <http://technomag.bmstu.ru/en/doc/699035.html>
- [13] Fedorova N.A. Determination of penetration depth of high-velocity research modules with the pulse jet engine into low-strength soil targets. *Jelektr. zhur. "Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik"*. MGTU im. Baumana [El. J. "Youth Sci. & Tech. Herald" of Bauman MSTU], 2013, no. 12. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/638157.html>
- [14] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Engineering models of high speed penetration into geological shields. *Central European Journal of Engineering*, 2014, no. 4(1), pp. 1–19.
- [15] Veldanov V.A. The law of resistance to penetration of impactor into the soil. *Oboronnaya tekhnika* [Defense technology], 1995, no. 4, pp. 32–34 (in Russ.).
- [16] Veldanov V.A., Fedorov S.V. Soil behavior at the interface with a rigid projectile during penetration. *J. of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2005, vol. 46, no. 6. pp. 867–875.
- [17] Nikitin N.N. Kurs teoreticheskoy mekhaniki [Course of theoretical mechanics]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1990, 607 p.
- [18] Veldanov V.A., Naumov A.N. Effect of on time and operation time of gasdynamic over-clocking device]. *Tr. Mezhdunar. konf. "V Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya"* [Proc. of the Int. conf. "V-th Khariton's Thematic Scientific Readings"]. Sarov, VNIIEF Publ., 2003, pp. 499–501 (in Russ.).
- [19] Fedorov S.V., Fedorova N.A., Veldanov V.A. Jet thrust impulse using for increase in research modules penetration depth into low-strength soil targets. *Izv. Ross. akad. raketnykh i artilleriyskikh nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences], 2014, no. 4(84), pp. 53–63 (in Russ.).
- [20] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy M.Yu., Fedorov S.V. Computation of nondeformable striker penetration into low-strength obstacles using piezoelectric accelerometry data. *Technical Physics. Russ. J. Appl. Phys.*, 2011, vol. 56, no. 7, pp. 992–1002.
- [21] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy M.Yu., Sotskiy Yu.M., Fedorov S.V. Research of dynamic mechanical properties of aluminum alloys by an accelerometry method. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2010, no. 2, pp. 37–46 (in Russ.).
- [22] Lipanov A.M., Milekhin Yu.M. *Vnutrennyaya ballistika RDTT* [Interior ballistics of solid propellant rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007, 504 p.
- [23] Fedorov S.V., Fedorova N.A. Influence of the jet thrust impulse on depth of the research probe penetration into planet soil. *Jelektr. nauchno-tekh. izd. "Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii"* [El. Sc.-Tech. Publ. "Eng. J.: Science and Innovation"], 2013, no. 1(13). Available at: <http://engjournal.ru/eng/catalog/machin/airborne/571.html>

Fedorov S.V. — Senior Lecturer of High-Precision Flying Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Fedorova N.A. — student of High-Precision Flying Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Fedorov S.V., Fedorova N.A. Influence of the Soil and Rocky Target Strength Properties on Projectiles Penetration Depth with Additional Action of the Jet Thrust Impulse. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 4, pp. 40–56. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4-40-56