

## О ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПРОНИКАНИЯ В ГРУНТОВО-СКАЛЬНЫЕ ПРЕГРАДЫ СОСТАВНЫХ УДАРНИКОВ С ОТСТРЕЛИВАЕМОЙ В ПРОЦЕССЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ХВОСТОВОЙ ЧАСТЬЮ

С.В. Федоров<sup>1</sup>

sergfed-64@mail.ru

В.А. Велданов<sup>1</sup>

vevladi@mail.ru

Н.А. Федорова<sup>2</sup>

n2402f@live.ru

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрена возможность увеличения глубины проникания в грунтово-скальные преграды составных ударников с отстреливаемой в процессе взаимодействия хвостовой частью. Отстреливаемая хвостовая балластная масса имеет трубчатую часть, выполняющую роль баллистического ствола, в котором размещен проникающий модуль. При отстреле балластной массы в направлении, противоположном направлению проникания, проникающий модуль получает дополнительный импульс в направлении его движения, что может привести к увеличению глубины проникания модуля. Исследования проведены на основе расчетной модели, в которой проникающий модуль и балластная масса рассмотрены как осесимметричные недеформируемые тела, движущиеся под действием сил сопротивления преграды и давления пороховых газов, прикладываемых к ним в момент начала отстрела. Дополнительно использовано допущение о постоянстве давления пороховых газов в процессе отстрела. По результатам расчетов для преград типа плотного грунта и скальной породы выявлено влияние на прирост глубины проникания соотношения масс отстреливаемой и проникающей частей ударника, момента отстрела балластной массы, давления отстрела и длины трубчатой части балластной массы, определяющей время действия давления пороховых газов

### Ключевые слова

Высокоскоростное проникание, грунтово-скальная преграда, ударник, проникающий модуль, отстрел балластной массы, реактивный импульс

Поступила 01.03.2018

© Автор(ы), 2019

---

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ  
(грант № 15-08-08319-а)*

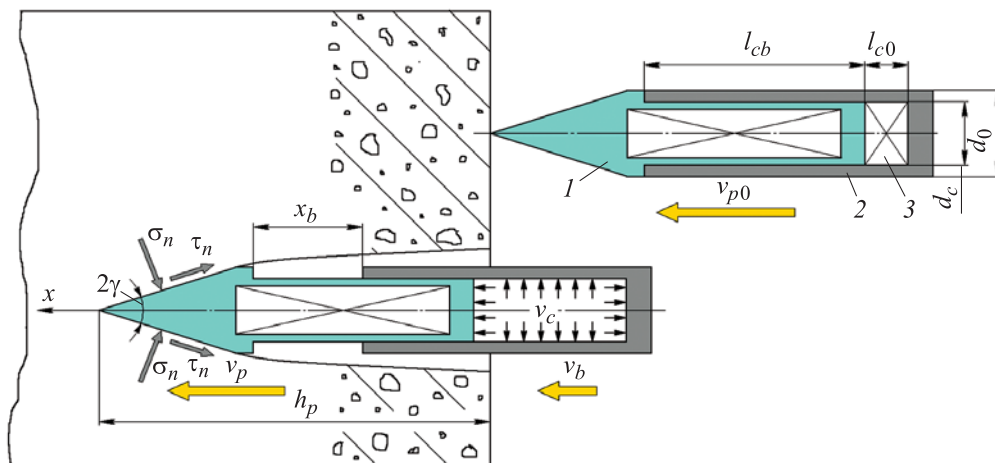
Высокоскоростные проникающие модули (ударники), оснащенные датчиками и приборами различного назначения, могут применяться в целях зондирования поверхностного слоя Земли, а в ближайшей перспективе и других небесных тел Солнечной системы [1] для изучения строения массивов скальных пород и разведки полезных ископаемых. С помощью таких модулей при их использовании в системах оружия и оснащении боевой части с разрывным зарядом могут решаться также задачи по разрушению сильно укрепленных заглубленных объектов [2]. В обоих случаях актуальной является задача увеличения глубины проникания ударников в различные типы грунтово-скальных преград.

Проникание ударников происходит за счет сообщения им высокой скорости, обычно с использованием пороховых баллистических установок. Нагрузки, испытываемые подобными ударниками в процессе проникания, не должны приводить к их значительным деформациям и разрушению, что ограничивает максимально допустимую скорость их взаимодействия с грунтово-скальными преградами [3, 4]. Поэтому, а также с учетом реальных возможностей баллистических установок начальная скорость ударников, применяемых для решения указанных задач, как правило, не превышает 1000 м/с и в подавляющем большинстве случаев лежит в диапазоне 500...800 м/с.

Отметим, что резервы увеличения глубины проникания в грунтово-скальные преграды за счет повышения начальной скорости ударников фактически отсутствуют. В качестве возможного пути решения данной задачи можно рассмотреть вариант проникания с использованием лидера для предварительного формирования каверны в грунтово-скальной преграде с последующим движением по ней модуля с полезной нагрузкой [5]. Лидер должен иметь более высокую скорость, обеспечивающую гидродинамический режим его проникания (с растеканием материала лидера по стенкам формируемой в преграде каверны). Поскольку одним из основных факторов, определяющих глубину проникания в гидродинамическом режиме, является длина проникающего тела [6], лидер должен иметь удлиненную форму (форму стержня). Для повышения проникающей способности лидер необходимо изготавливать из материала с высокой плотностью [7, 8], некоторые преимущества достигаются также при его сегментировании [9, 10]. Грунтово-скальные преграды в сравнении с металлическими имеют относительно невысокую прочность, поэтому формируемая в них проникающим в гидродинамическом режиме лидером каверна имеет существенные поперечные размеры [11], что должно обеспечить беспрепятственное движение по ней следующего за лидером мо-

дуля с полезной нагрузкой. Еще один вариант предварительного создания каверны в грунтово-скальной преграде может быть связан с размещением перед проникающим модулем кумулятивного заряда, формирующего при взрыве высокоскоростную металлическую струю [2, 12] с высоким пробивным действием.

Для увеличения глубины проникания непосредственно самого проникающего модуля (после преодоления им сформированной в преграде лидером или кумулятивным зарядом каверны) в настоящей работе рассматривается возможность использования отстрела в процессе проникания в обратном ему направлении задней части модуля (балластной массы). Конструкция ударника, реализующего подобный режим проникания, состоит непосредственно из проникающего модуля, балластной массы и разгоняющего ее порохового заряда (рис. 1). При отстреле балластной массы в направлении, противоположном направлению проникания, проникающий модуль получает дополнительный импульс в направлении его движения, что может привести к увеличению глубины проникания модуля. С точки зрения реализуемых физических принципов данный режим проникания родственен прониканию ударников с реактивным двигателем [5, 13, 14].



**Рис. 1.** Расчетная схема проникания в грунтово-скальную преграду ударника с отстрелом балластной массы:

1 — проникающий модуль; 2 — балластная масса; 3 — пороховой заряд

Проникающий модуль и балластная масса — это осесимметричные недеформируемые тела, движущиеся под действием двух сил, направленных вдоль их осей: силы сопротивления грунтово-скальной преграды и силы давления пороховых газов, прикладываемой к телам в момент начала от-

стрела балластной массы. Силу сопротивления преграды, действующую на головную часть проникающего модуля, рассчитывали с использованием простой эмпирической зависимости из двух слагаемых для определения нормальных механических напряжений  $\sigma_n$  на поверхности контакта; первое слагаемое пропорционально квадрату  $v_{pn}$  — скорости проникающего модуля (инерционное сопротивление преграды), второе — постоянное слагаемое (прочностное сопротивление преграды) [15, 16]:

$$\sigma_n = A v_{pn}^2 + C,$$

где  $v_{pn}$  — нормальная к поверхности контакта составляющая скорости ударника  $v_p$ ;  $A, C$  — эмпирические коэффициенты, зависящие от свойств грунтово-скальной преграды. Касательные напряжения  $\tau_n$  на поверхности контакта головной части проникающего модуля с преградой определяли в предположении отсутствия проскальзывания контактирующего слоя преграды  $\tau_n = 0,5 C$  [17].

Расчеты проводились для ударников с конической головной частью и углом раствора  $2\gamma$  (см. рис. 1). Выражение для силы сопротивления преграды  $F_s$  в этом случае имеет вид [14]

$$F_s = F_A v_p^2 + F_C, \quad (1)$$

где  $F_A = A S_m \sin^2 \gamma$ ;  $F_C = C S_m (1 + 0,5 \operatorname{ctg} \gamma)$ ,  $S_m = \pi d_0^2 / 4$  — площадь миделя ударника ( $d_0$  — диаметр миделя). Отметим, что при определении силы сопротивления в соответствии с (1) пренебрегали 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 используемого значения (1). Однако исключение данного обстоятельства из внимания допустимо, так как размер головной части ударника, как правило, невелик по сравнению с характерной глубиной его проникания в грунтово-скальные преграды.

При задании давления пороховых газов  $p_c$ , под действием которых происходил отстрел балластной массы, предполагали, что закон горения порохового заряда обеспечивает его неизменность в течение всего процесса. Использование данного упрощающего допущения с отказом от детального внутрибаллистического расчета процесса отстрела представляется достаточно обоснованным в рамках начального этапа исследований, основной целью которого являлось продемонстрировать принципиальную возможность достижения положительного эффекта при увеличении

глубины проникания ударников. При этом продолжительность отстрела определялась длиной трубчатой части балластной массы  $l_{cb}$  (см. рис. 1), играющей роль баллистического ствола. Толщину стенок трубчатой части балластной массы выбирали из условия обеспечения ее прочности под действием задаваемого внутреннего давления  $p_c$ . При использовании для трубчатой части модели цилиндрической жесткопластической оболочки [18] с пределом текучести  $\sigma_{Yb}$  условие отсутствия ее расширения под действием давления  $p_c$  приводит к следующему значению максимально допустимого внутреннего диаметра:

$$d_c = d_0 \exp\left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{p_c}{\sigma_{Yb}}\right). \quad (2)$$

Расчеты проводили с варьированием момента начала отстрела  $t_{r0}$  балластной массы в процессе проникания ударника (время  $t_{r0}$  отсчитывали от начала проникания). Полная масса ударника  $m_0$  складывалась из трех составляющих — массы проникающего модуля  $m_p$ , массы балластной части  $m_b$  и массы порохового заряда  $m_e$  (см. рис. 1). В общем случае весь процесс проникания ударника с отстреливаемой хвостовой частью включал три стадии — проникание до начала отстрела, непосредственно при отстреле и после окончания отстрела. На всех стадиях изменение глубины проникания  $h_p$  описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dh_p}{dt} = v_p, \quad (3)$$

в котором скорость проникания  $v_p$  меняется при переходе от одной стадии к другой.

На первой стадии (до начала отстрела  $t \leq t_{r0}$ ) движение составного ударника общей массой  $m_0$  происходит как движение единого целого только под действием силы сопротивления преграды  $F_s$ . При этом изменение скорости проникания  $v_p$  описывается дифференциальным уравнением

$$m_0 \frac{dv_p}{dt} = -F_s.$$

Интегрирование данного уравнения и уравнения (3) при начальных условиях  $t = 0$ ,  $h_p = 0$ ,  $v_p = v_{p0}$  ( $v_{p0}$  — начальная скорость ударника) приводит к следующим соотношениям для определения скорости и глубины проникания на первой стадии:

$$v_p = \sqrt{\frac{F_C}{F_A}} \operatorname{tg} \left[ \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{F_A}{F_C}} v_{p0} \right) - \frac{\sqrt{F_A F_C}}{m_0} t \right];$$

$$h_p = \frac{m_0}{2F_A} \ln \left[ \frac{F_A v_{p0}^2 + F_C}{F_A v_p^2 + F_C} \right]. \quad (4)$$

С момента времени  $t_{r0}$ , который соответствует началу действия давления пороховых газов  $p_c$ , начинается вторая стадия проникания с раздельным движением проникающего модуля и отстреливаемой хвостовой частью, обеспечиваемым силой давления  $p_c S_c$ , где  $S_c = \pi d_c^2 / 4$  — площадь внутреннего сечения трубчатой части балластной массы (см. рис. 1). Изменение скоростей проникающего модуля  $v_p$  и отстреливаемой балластной массы  $v_b$  происходит на второй стадии согласно дифференциальным уравнениям

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = -F_s + p_c S_c; \quad m_b \frac{dv_b}{dt} = -p_c S_c.$$

Результат интегрирования уравнения для скорости проникающего модуля зависит от соотношения силы давления пороховых газов  $p_c S_c$  и прочностной составляющей  $F_C$  силы сопротивления преграды  $F_s$  (1):

$$v_p = \sqrt{\frac{F_C - p_c S_c}{F_A}} \operatorname{tg} \left[ \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{F_A}{F_C - p_c S_c}} v_{p1} \right) - \frac{\sqrt{F_A (F_C - p_c S_c)}}{m_p} (t - t_{r0}) \right];$$

$$p_c S_c < F_C;$$

$$v_p = \frac{1}{\frac{1}{v_{p1}} + \frac{F_A}{m_p} (t - t_{r0})}; \quad p_c S_c = F_C;$$

$$v_p = \sqrt{\frac{p_c S_c - F_C}{F_A}} \times$$

$$\times \frac{\left[ \sqrt{\frac{p_c S_c - F_C}{F_A}} + v_{p1} \right] \exp \left[ \frac{2\sqrt{F_A (p_c S_c - F_C)}}{m_p} (t - t_{r0}) \right] + v_{p1} - \sqrt{\frac{p_c S_c - F_C}{F_A}}}{\left[ \sqrt{\frac{p_c S_c - F_C}{F_A}} + v_{p1} \right] \exp \left[ \frac{2\sqrt{F_A (p_c S_c - F_C)}}{m_p} (t - t_{r0}) \right] + \sqrt{\frac{p_c S_c - F_C}{F_A}} - v_{p1}};$$

$$p_c S_c > F_C,$$

где  $v_{p1}$  — скорость проникания в момент начала отстрела, определяемая первым из соотношений (4) при подстановке в него  $t = t_{r0}$ .

Интегрирование уравнения для скорости отстреливаемой балластной массы дает линейный в зависимости от времени закон ее изменения:

$$v_b = v_{p1} - \frac{p_c S_c}{m_b} (t - t_{r0}).$$

Интегрируя (3), изменение глубины проникания на второй стадии получаем в виде

$$h_p = h_{p1} + \frac{m_p}{2F_A} \ln \left[ \frac{F_A v_{p1}^2 + F_C - p_c S_c}{F_A v_p^2 + F_C - p_c S_c} \right], \quad (6)$$

где  $h_{p1}$  — глубина проникания в момент начала отстрела, определяемая вторым соотношением из (4) при подстановке в него  $v_p = v_{p1}$ .

Для определения момента окончания отстрела (момента прекращения действия давления пороховых газов) необходимо знать относительное смещение  $x_b$  балластной массы и проникающего модуля (см. рис. 1). Его изменение в процессе отстрела описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dx_b}{dt} = v_p - v_b,$$

интегрирование которого при дополнительном условии  $t = t_{r0}; x_b = 0$  приводит к следующему соотношению для расчета  $x_b$ :

$$x_b = \frac{m_p}{2F_A} \ln \left[ \frac{F_A v_{p1}^2 + F_C - p_c S_c}{F_A v_p^2 + F_C - p_c S_c} \right] - v_{p1} (t - t_{r0}) + \frac{p_b S_c}{2m_b} (t - t_{r0})^2. \quad (7)$$

Действие давления пороховых газов прекращается при разделении проникающего модуля и балластной массы, чему соответствует выполнение условия  $x_b = l_{cb}$  (см. рис. 1). При подстановке в данное соотношение выражения для  $x_b$  (7) с учетом закона изменения на второй стадии скорости проникания  $v_p$  (5), получаем трансцендентное уравнение для определения времени  $t_{re}$ , соответствующего моменту окончания отстрела (и, соответственно, моменту окончания второй стадии проникания).

На заключительной третьей стадии проникания ( $t > t_{re}$ ) проникающий модуль массой  $m_p$  продолжает движение только при действии силы сопротивления преграды  $F_s$  (1), изменение его скорости  $v_p$  описывается дифференциальным уравнением

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = -F_s.$$

Интегрирование данного уравнения дает выражение для скорости проникания на третьей стадии:

$$v_p = \sqrt{\frac{F_C}{F_A}} \operatorname{tg} \left[ \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{F_A}{F_C}} v_{p2} \right) - \frac{\sqrt{F_A F_C}}{m_p} (t - t_{re}) \right],$$

где  $v_{p2}$  — скорость проникания в момент окончания отстрела, определяемая соответствующим соотношением из (5) при подстановке в него  $t = t_{re}$ .

Интегрируя (3), изменение глубины проникания на третьей стадии получаем в виде

$$h_p = h_{p2} + \frac{m_p}{2F_A} \ln \left[ \frac{F_A v_{p2}^2 + F_C}{F_A v_p^2 + F_C} \right], \quad (8)$$

где  $h_{p2}$  — глубина проникания в момент окончания отстрела, рассчитываемая по зависимости (6) при подстановке в нее  $v_p = v_{p2}$ .

Результирующая глубина проникания ударника с отстреливаемой в процессе взаимодействия хвостовой частью  $h_{pe}$  определяется из соотношения (8) при подстановке в него  $v_p = 0$ :

$$h_{pe} = h_{p2} + \frac{m_p}{2F_A} \ln \left[ \frac{F_A}{F_C} v_{p2}^2 + 1 \right].$$

В случае  $p_c S_c < F_C$  возможен режим проникания, когда прекращение движения проникающего модуля в преграде происходит уже на второй стадии (в процессе отстрела балластной массы). Данный режим реализуется, если скорость проникания на второй стадии, определяемая первым соотношением из (5), становится равной нулю еще при  $x_b < l_{cb}$  (см. рис. 1). Результирующая глубина проникания в этом случае будет определяться зависимостью (6) при  $v_p = 0$

$$h_{pe} = h_{p1} + \frac{m_p}{2F_A} \ln \left[ \frac{F_A}{F_C - p_c S_c} v_{p1}^2 + 1 \right].$$

При задании давления пороховых газов  $p_c$  учитывали, что для обеспечения отстрела хвостовой части с ее отделением от проникающего модуля давление должно превышать определенный уровень, диктуемый необходимостью выполнения следующего условия — осевое ускорение хвостовой части ударника массой  $m_b$ , сообщаемое ей силой давления газа  $p_c S_c$ , по абсолютному значению должно превышать ускорение всего



ударника в целом (массой  $m_0$ ) под действием силы сопротивления преграды  $F_s$ . Из данного условия следует, что отстрел задней части ударника с сообщением дополнительного импульса проникающему модулю может начаться только в том случае, если

$$p_c > \frac{m_b F_s}{m_0 S_c}.$$

Поскольку сила сопротивления преграды  $F_s$  (1) зависит от текущей скорости ударника и уменьшается в процессе его проникания, то и минимальное значение давления пороховых газов  $p_c$ , обеспечивающее разделение ударника на части, будет снижаться с увеличением момента времени  $t_{r0}$  от начала проникания, в который производится отстрел балластной массы.

Влиянием на динамику движения проникающего модуля и отстреливаемой балластной массы поступательного движения самих пороховых газов пренебрегали в силу предполагаемой малости их массы (совпадающей с массой порохового заряда  $m_e$  в ударнике). Массу порохового заряда можно оценить по формуле

$$m_e = \frac{k + l_{c0}/l_{cb}}{k - 1} \frac{p_c S_c l_{cb}}{e_0}, \quad (9)$$

где  $k$  — показатель адиабаты пороховых газов;  $e_0$  — удельная теплота сгорания пороха;  $l_{c0}$  — длина зарядной камеры [19] (см. рис. 1). Приведенная зависимость основывается на простом энергетическом подходе, согласно которому энергия, выделяющаяся при сгорании порохового заряда, полагается равной сумме работы пороховых газов в процессе изобарного расширения при давлении  $p_c$  и их внутренней энергии в момент окончания отстрела (при  $x_b = l_{cb}$ ).

Расчеты проведены применительно к ударнику диаметром  $d_0 = 150$  мм и общей массой  $m_0 = 50$  кг, проникающий модуль которого имел головную часть конической формы с углом раствора  $2\gamma = 45^\circ$ . Начальная скорость взаимодействия  $v_{p0}$  варьировалась в диапазоне от 400 до 800 м/с. Параметры, определяющие силу сопротивления грунтово-скальной преграды и устанавливаемые на основании результатов пьезоакселерометрии проникания [20], задавали с ориентировкой на два типа преград — плотного грунта ( $A = 2000$  кг/м<sup>3</sup>,  $C = 10$  МПа) и скальной породы ( $A = 2400$  кг/м<sup>3</sup>,  $C = 100$  МПа).

По результатам расчетов определено влияние на прирост глубины проникания момента отстрела балластной массы  $t_{r0}$ , соотношения масс

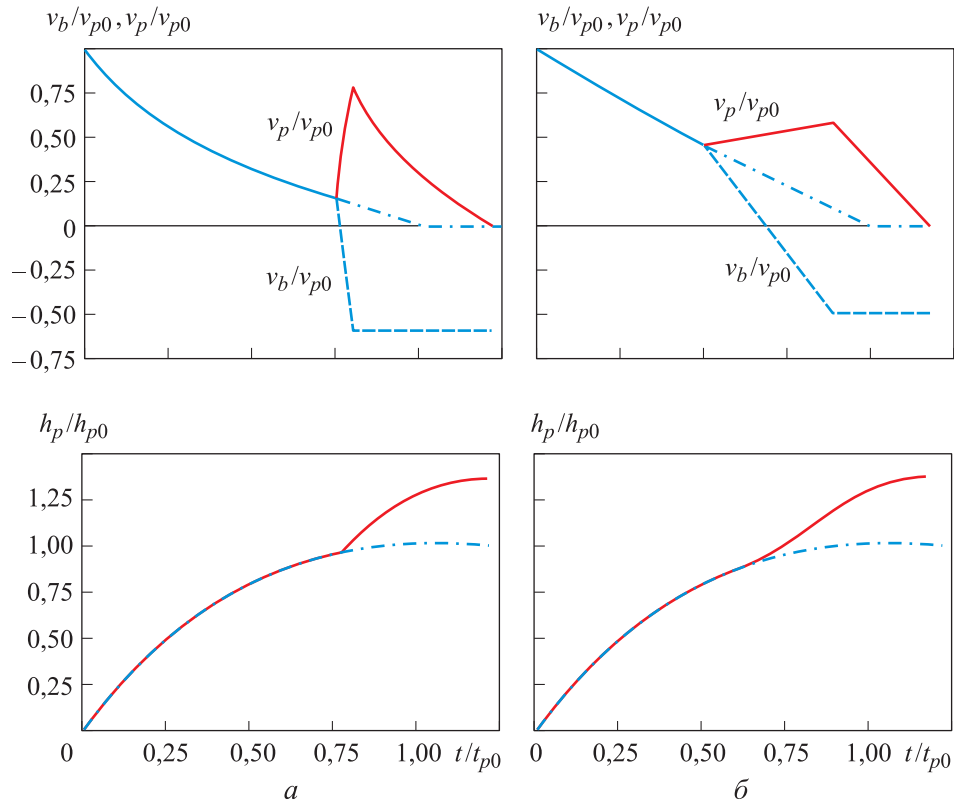
отстреливаемой и проникающей частей ударника  $m_b/m_p$ , давления отстрела  $p_c$  и длины трубчатой части балластной массы  $l_{cb}$ , определяющей время действия давления пороховых газов. При этом параметры проникания ударника с отстреливаемой частью сопоставляли с параметрами проникания эквивалентного инертного ударника, имеющего те же начальную скорость  $v_{p0}$ , полную массу  $m_0$  и диаметр миделя  $d_0$ . Полные время  $t_{p0}$  и глубину  $h_{p0}$  проникания эквивалентного инертного ударника определяли по соотношениям

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

следующими из (4) при  $v_p = 0$ . Данные значения использовали в качестве масштабов времени и глубины проникания.

Сумма масс проникающего модуля и отстреливаемой балластной массы при заданных условиях отстрела (значениях  $p_c$  и  $l_{cb}$ ) составляла  $m_p + m_b = m_0 - m_e$ . При этом масса порохового заряда в составе ударника  $m_e$ , рассчитываемая в соответствии с (9), при рассмотренных значениях  $p_c$  и  $l_{cb}$  не превышала 10 % полной массы ударника  $m_0$ . Предел текучести материала трубчатой части балластной массы, с использованием которого на основании (2) рассчитывали ее внутреннее сечение, определяющее силу давления пороховых газов, составил  $\sigma_{yb} = 1500$  МПа.

На рис. 2 показана динамика проникания инертного ударника (штрихпунктирные линии) и ударника с отстрелом балластной массы (сплошные линии — скорость и глубина проникания модуля с полезной нагрузкой, штриховые линии — скорость балластной части) при начальной скорости  $v_{p0} = 500$  м/с и параметрах отстрела  $p_c = 500$  МПа;  $l_{cb} = 4d_0$ ;  $m_b/m_p = 1$ . Отчетливо прослеживаются три стадии процесса проникания разделяющегося ударника. На первой стадии (до момента начала горения порохового заряда) он так же, как и инертный ударник, тормозится как единое целое тело массой  $m_0$  под действием силы сопротивления преграды. В момент времени  $t_{r0}$  начинается горение порохового заряда и происходит переход ко второй стадии проникания. За счет того, что сила давления пороховых газов больше силы сопротивления преграды, скорость проникания модуля с полезной нагрузкой на второй стадии увеличивается. Скорость балластной массы при этом резко уменьшается и после перехода через нулевое значение становится отрицательной, что соответствует движению этой части ударника в направлении, противоположном первоначальному.

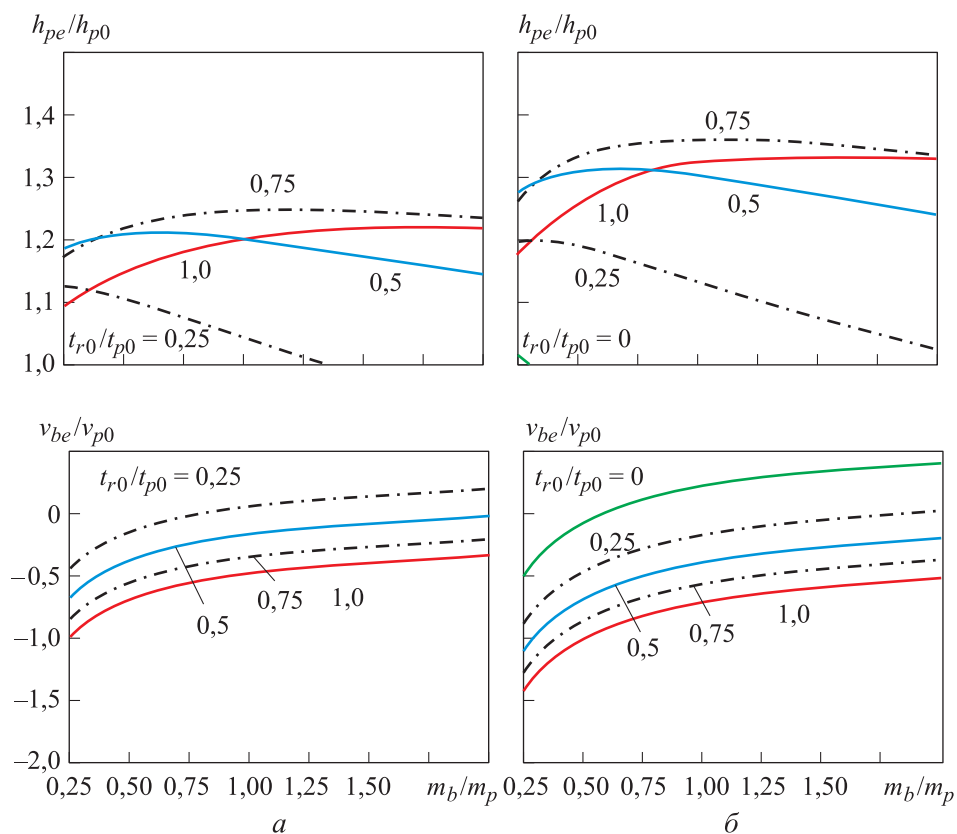


**Рис. 2.** Сравнительный анализ динамики проникания инертного ударника и ударника с отстрелом балластной массы:

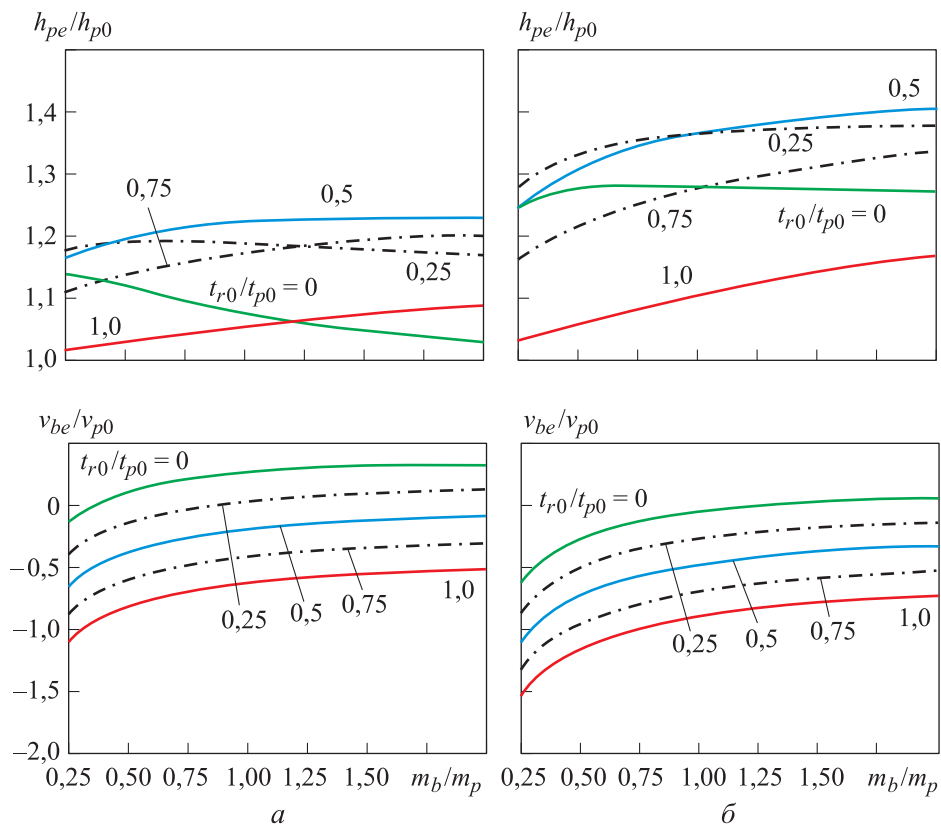
*a* — в плотный грунт ( $t_{r0}/t_{p0} = 0,75$ ); *б* — в скальную породу ( $t_{r0}/t_{p0} = 0,5$ )

В момент времени  $t_{re}$  (7) давление газа  $p_c$  сбрасывается, и начинается заключительная третья стадия проникания, на которой так же, как и на первой, динамика проникания определяется лишь силой сопротивления преграды. Однако темп снижения скорости проникания при этом заметно выше, чем на первой стадии, что связано, очевидно, с уменьшением проникающей массы ударника ( $m_p$  вместо  $m_0$ ). Балластная часть ударника на третьей стадии становится свободной от действия каких-либо сил, поэтому продолжает свое движение с постоянной скоростью в обратном направлении. Из рис. 2 следует, что результирующая глубина проникания разделяющегося ударника, несмотря на увеличение темпа торможения его проникающего модуля на третьей стадии как в случае малопрочной преграды (плотный грунт), так и в случае высокопрочной (скальная порода), превысила примерно на 35 % при рассмотренных условиях отстрела балластной массы глубину проникания эквивалентного инертного ударника.

Проиллюстрированная возможность увеличения глубины проникания ударника за счет отстрела в процессе движения в преграде некоторой его части стимулировала проведение дальнейшего анализа зависимости степени проявления данного эффекта от параметров процесса отстрела. На рис. 3 и 4 соответственно для случаев проникания в плотный грунт и в скальную породу показано влияние на результирующую относительную глубину проникания разделяющегося ударника  $h_{pe}/h_{p0}$  и конечную относительную скорость его отстреливаемой части  $v_{be}/v_{p0}$  соотношения масс частей ударника  $m_b/m_p$  и относительного времени начала горения порохового заряда (начала отстрела)  $t_{r0}/t_{p0}$  при длинах разгона балластной массы  $l_{cb} = 2d_0$  и  $l_{cb} = 4d_0$  (начальная скорость ударника  $v_{p0} = 500$  м/с, давление отстрела  $p_c = 500$  МПа). Видно, что в случае малопрочной



**Рис. 3.** Зависимость глубины проникания в плотный грунт и конечной скорости отстреливаемой части ударника от соотношения ее массы с массой проникающей части при различных временах начала горения порохового заряда:  
 а —  $l_{cb} = 2d_0$ ; б —  $l_{cb} = 4d_0$



**Рис. 4.** Зависимость глубины проникания в скальную породу и конечной скорости отстреливаемой части ударника от соотношения ее массы с массой проникающей части при различных временах начала горения порохового заряда:

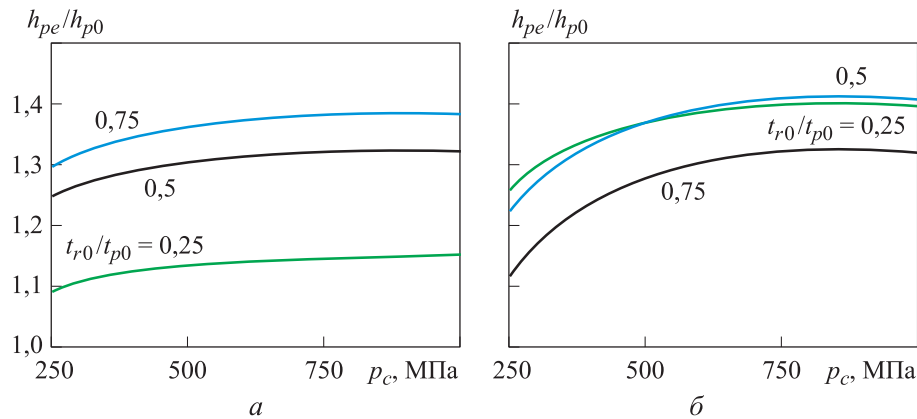
$$a - l_{cb} = 2d_0; \quad б - l_{cb} = 4d_0$$

преграды (см. рис. 3) наибольший прирост глубины проникания достигается при примерном равенстве масс балластной и проникающей частей ударника ( $m_b/m_p \approx 1,0$ ) и времени начала отстрела, составляющем 75 % полного времени проникания эквивалентного инертного ударника ( $t_{r0}/t_{p0} = 0,75$ ). Для высокопрочной преграды (см. рис. 4) достижение максимального эффекта реализуется при более раннем, чем в случае менее прочной преграды, относительном времени начала отстрела балластной массы ( $t_{r0}/t_{p0} \approx 0,25 \dots 0,5$ ). При временах начала отстрела, обеспечивающих максимальный прирост глубины проникания в преграду типа скальной породы, во всем рассмотренном диапазоне изменения соотношения масс частей ударника  $0,25 \leq m_b/m_p \leq 2$  наблюдается незначительное монотонное увеличение значения  $h_{pe}/h_{p0}$  с ростом отноше-

ния  $m_b/m_p$ . Что касается конечной скорости, приобретаемой отстреливаемой частью ударника, то для обоих типов преград она сохраняет свое первоначальное направление только при очень раннем начале отстрела ( $t_{r0}/t_{p0} < 0,25$ ) и больших значениях соотношения  $m_b/m_p$  (см. рис. 3 и 4). При временах начала отстрела  $t_{r0}/t_{p0} > 0,5$  во всем рассмотренном диапазоне изменения соотношения  $m_b/m_p$  конечная скорость балластной массы направлена противоположно направлению движения ударника и возрастает с увеличением значения  $t_{r0}/t_{p0}$  и уменьшением значения  $m_b/m_p$ . При  $m_b/m_p \approx 1$  и относительных временах начала отстрела, обеспечивающих максимальный прирост глубины проникания, конечная скорость отстреливаемой массы отрицательна и при длине ее разгона  $l_{cb} = 4d_0$  составляет по абсолютному значению  $\sim 0,5 v_{p0}$ .

Очевидно, на практике соотношение масс проникающего модуля и отстреливаемой части разделяющегося ударника будет определяться не только и не столько условием обеспечения максимально возможного прироста глубины проникания, сколько необходимостью заглубления в грунтово-скальную преграду полезной нагрузки возможно большей массы. С этой точки зрения основной интерес при выборе соотношения масс частей разделяющегося ударника представляет область, где значение  $m_p$  в несколько раз превышает значение  $m_b$ . Из рис. 3 и 4 следует, что в указанной области соотношений  $m_b/m_p$  достигаемый прирост глубины проникания снижается не очень значительно по отношению к максимально возможному. Так, при  $m_b/m_p = 0,25$  для обеих рассматриваемых преград значение  $h_{pe}/h_{p0}$  при рациональном выборе времени начала горения порохового заряда составляет  $\sim 1,18$  в случае  $l_{cb} = 2d_0$  и  $\sim 1,28$  в случае  $l_{cb} = 4d_0$ . Максимально же достижимые значения  $h_{pe}/h_{p0}$  (при  $m_b/m_p \approx 1,0$ ) для рассматриваемых длин разгона балластной массы  $l_{cb}$  не превышают 1,24 и 1,37.

На рис. 5 показано влияние на прирост глубины проникания разделяющегося ударника давления пороховых газов при разных относительных временах начала отстрела балластной массы (начальная скорость ударника  $v_{p0} = 500$  м/с; длина разгона балластной массы  $l_{cb} = 4d_0$ ; соотношение масс частей ударника  $m_b/m_p = 1$ ). Анализ приведенных данных свидетельствует о том, что при повышении до определенного уровня давления отстрела происходит увеличение относительной глубины проникания. Дальнейшее же повышение давления сверх данного уровня ска-

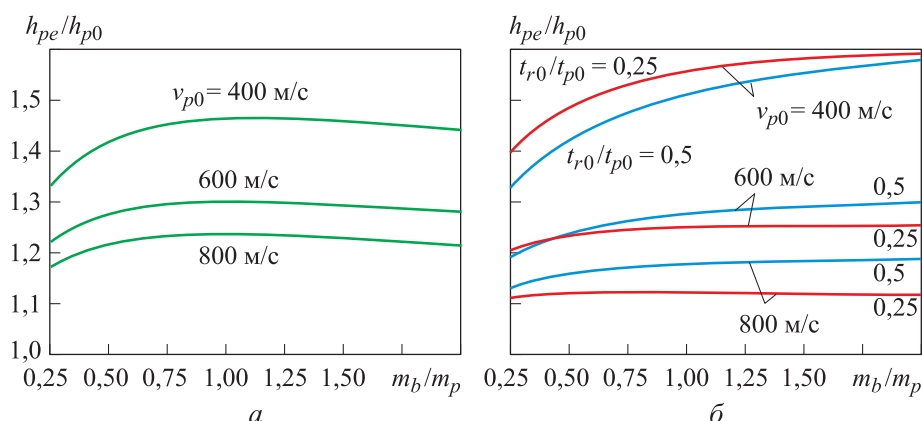


**Рис. 5.** Влияние на прирост глубины проникания ударника с отстрелом балластной массы давления пороховых газов:  
 а — для плотного грунта; б — для скальной породы

зывается на приросте значения  $h_{pe}/h_{p0}$  слабо. Предельное значение, до которого имеет смысл увеличивать давление отстрела, как в случае малопрочной, так и высокопрочной преград составляет  $\sim 500$  МПа.

Отмеченный характер влияния давления пороховых газов на прирост глубины проникания обусловлен тем, что повышение значения  $p_c$  должно сопровождаться увеличением толщины стенок трубчатой части балластной массы (для обеспечения ее прочности). При этом уменьшается площадь ее внутреннего сечения, определяющая наряду со значением  $p_c$  силу давления газа, «толкающую» проникающий модуль вперед на второй стадии проникания. При чрезмерном увеличении давления отстрела фактор уменьшения площади внутреннего сечения трубчатой части становится преобладающим и ограничивает прирост силы давления газа на проникающий модуль.

Как показали расчеты, существенное влияние на достигаемый относительный прирост глубины проникания ударника с отстрелом балластной массы оказывает начальная скорость ударника. На рис. 6 приведены кривые изменения  $h_{pe}/h_{p0}$  в зависимости от соотношения масс частей разделяющегося ударника  $m_b/m_p$  при различных его начальных скоростях (давление отстрела  $p_c = 500$  МПа; длина разгона балластной массы  $l_{cb} = 4d_0$ ). Приведенные кривые соответствуют относительным временам начала отстрела, обеспечивающим максимальный прирост глубины проникания —  $t_{r0}/t_{p0} = 0,75$  в случае преграды типа плотного грунта (рис. 6, а);  $t_{r0}/t_{p0} = 0,25$  и  $t_{r0}/t_{p0} = 0,5$  в случае преграды типа скальной породы (рис. 6, б). Видно, что в случае малопрочной преграды увеличе-



**Рис. 6.** Влияние на прирост глубины проникания соотношения масс проникающей и балластной частей ударника при различных начальных скоростях:  
 а — для плотного грунта; б — для скальной породы

ние начальной скорости ударника от 400 до 800 м/с приводит к снижению максимально достижимого относительного прироста глубины проникания примерно от 47 до 23 %. При том же изменении значений  $v_{p0}$  в случае высокопрочной преграды потенциально возможная прибавка к глубине проникания снижается от 55 до 18 %, причем для ее обеспечения относительное время начала отстрела балластной массы при проникании в скальную породу должно быть увеличено от  $t_{r0}/t_{p0} = 0,25$  при  $v_{p0} = 400$  м/с до  $t_{r0}/t_{p0} = 0,5$  при  $v_{p0} = 800$  м/с. Объясняется снижение относительного прироста глубины проникания разделяющегося ударника с увеличением его начальной скорости, очевидно, тем, что рост значения  $v_{p0}$  приводит к уменьшению доли энергии, выделяющейся при сгорании порохового заряда, по отношению к начальной кинетической энергии ударника.

При определении влияния на относительный прирост глубины проникания ударника с отстрелом балластной массы длины ее разгонной части установлено, что с увеличением  $l_{cb}$  (см. рис. 1) происходит примерно линейный рост  $h_{pe}/h_{p0}$ . Например, при проникании в скальную породу разделяющегося ударника с начальной скоростью  $v_{p0} = 500$  м/с и параметрами отстрела  $p_c = 500$  МПа;  $t_{r0}/t_{p0} = 0,5$ ;  $m_b/m_p = 1,0$  относительная глубина проникания  $h_{pe}/h_{p0}$  возрастает примерно от 1,12 при  $l_{cb} = d_0$  до 1,42 при  $l_{cb} = 5d_0$ .

**Заключение.** Как свидетельствуют проведенные исследования, применение отстрела балластной массы в процессе проникания ударника в грунтово-скальную преграду при начальных скоростях взаимодействия



несколько сотен метров в секунду может дать весьма существенный относительный прирост глубины проникания — более 50 %. При этом необходимые для достижения такого увеличения глубины проникания коэффициенты наполнения, характеризующие отношение массы порохового заряда  $m_e$  в составе ударника к полной массе ударника  $m_0$ , оцениваются значениями в пределах 0,1.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Родченко В.В., Садретдинова Э.Р., Гусев Е.В. Выбор параметров пенетратора для исследования лунного грунта. *Вестник МАИ*, 2010, т. 17, № 3, с. 83–90.
- [2] Селиванов В.В., ред. Средства поражения и боеприпасы. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
- [3] Каминский М.В., Копытов Г.Ф., Киселев Ю.Г. и др. Критическая скорость при внедрении ударников с конической носовой формой в грунтовые преграды. *Сб. мат. III науч. конф. Волжского регион. центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения»*. Т. 2. Саров, РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2004, с. 642–647.
- [4] Foppetal 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. DOI: 10.1115/1.3171758
- [5] Федоров С.В., Федорова Н.А. Влияние прочностных свойств грунтово-скальной преграды на глубину проникания ударников при дополнительном действии импульса реактивной тяги. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2016, № 4, с. 40–56. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4-40-56
- [6] Tate A. A theory for the deceleration of long rods after impact. *J. Mech. Phys. Solids*, 1967, vol. 15, no. 6, pp. 387–399. DOI: 10.1016/0022-5096(67)90010-5
- [7] Rosenberg Z., Dekel E. On the role of material properties in the terminal ballistics of long rods. *Int. J. Impact Eng.*, 2004, vol. 30, no. 7, pp. 835–851. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2004.03.007
- [8] Федоров С.В., Велданов В.А., Смирнов В.Е. Численный анализ влияния скорости и прочности удлиненных ударников из высокоплотного сплава на глубину их проникания в стальную преграду. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 1, с. 65–83. DOI: 10.18698/0236-3941-2015-1-65-83
- [9] Weihrauch G., Wollmann E. Segmented penetrators. *PEP*, 1993, vol. 18, no. 5, pp. 270–274. DOI: 10.1002/prep.19930180507
- [10] Федоров С.В., Велданов В.А. Применение сегментированных ударников для формирования каверны в грунтово-скальных преградах. *Известия РАН*, 2012, № 1, с. 43–50.
- [11] Федоров С.В., Велданов В.А. К определению размеров кавитационной полости в воде за движущимся с высокой скоростью цилиндрическим телом. *ЖТФ*, 2013, т. 83, № 2, с. 15–20.

[12] Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М. и др. Влияние сжимаемости и прочности материала кумулятивных струй на особенности их инерционного растяжения в свободном полете. *Прикладная механика и техническая физика*, 1997, т. 38, № 2, с. 10–18.

[13] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Optimization of penetration into geological and concrete shields by impactor with jet thruster. *J. Mech. Mater. Struct.*, 2008, vol. 3, no. 4, pp. 707–727.

[14] Федоров С.В., Федорова Н.А., Велданов В.А. Использование импульса реактивной тяги для увеличения глубины проникания исследовательских модулей в малопрочные грунтовые преграды. *Известия РАН*, 2014, № 4, с. 53–63.

[15] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Engineering models of high speed penetration into geological shields. *Centr. Eur. J. Eng.*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 1–19.

DOI: 10.2478/s13531-013-0135-4

[16] Сагомоян А.Я. Проникание. М., Изд-во МГУ, 1974.

[17] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Localized interaction models with non-constant friction for rigid penetrating impactors. *Int. J. Solids Struct.*, 2007, vol. 44, no. 7-8, pp. 2593–2607. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.08.009

[18] Орленко Л.П., ред. Физика взрыва. Т. 2. М., Физматлит, 2004.

[19] Королев А.А., Комочков В.А., ред. Баллистика ракетного и ствольного оружия. Волгоград, Изд-во уч.-науч. лит., 2010.

[20] Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И. и др. Исследование динамических механических свойств алюминиевых сплавов методом акселерометрии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2010, № 2, с. 37–46.

**Федоров Сергей Владимирович** — старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Велданов Владислав Антонович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Федорова Наталия Александровна** — инженер-конструктор Всероссийского научно-исследовательского института автоматики им. Н.Л. Духова (Российская Федерация, 127055, Москва, Сущёвская ул., д. 22).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Федоров С.В., Велданов В.А., Федорова Н.А. О возможности увеличения глубины проникания в грунтово-скальные преграды составных ударников с отстреливаемой в процессе взаимодействия хвостовой частью. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 1, с. 30–50.

DOI: 10.18698/0236-3941-2019-1-30-50

---

**ON THE POSSIBILITY OF INCREASING ROCKY TARGET  
PENETRATION DEPTH FOR COMPOUND PENETRATORS  
FEATURING A TAIL ASSEMBLY JETTISONED AT IMPACT**

S.V. Fedorov<sup>1</sup>

sergfed-64@mail.ru

V.A. Veldanov<sup>1</sup>

vevladi@mail.ru

N.A. Fedorova<sup>2</sup>

n2402f@live.ru

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Dukhov All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russian Federation

---

**Abstract**

The paper considers the possibility of increasing rocky target penetration depth for compound penetrators equipped with a tail assembly that is jettisoned at impact. The jettisoned ballast mass of the tail assembly featured a tubular part assuming the role of a launch tube housing a penetrating unit. When the ballast mass is jettisoned in the direction opposite to the penetration direction, this additional impulse pushes the penetrating unit in the direction of its motion, which may result in increasing the penetration depth of the unit. We conducted our research using a computational model that presents the penetrating unit and the ballast mass as axisymmetric non-deformable bodies moving due to the forces generated by the resistance of the target and by the propellant gas pressure, said forces acting upon the bodies under consideration at the moment of jettisoning. We also assumed that the propellant gas pressure is constant for the jettisoning duration. Our computations detected that, for targets similar to dense ground and rock, the following factors affect the increase in penetration depth: mass ratio of the jettisoned and penetrating parts of the penetrator; the moment when the ballast mass is jettisoned; the jettisoning pressure; the length of the tubular part, which determines how long the propellant gases will be able to push the penetrating unit

**Keywords**

*High-speed penetration,  
rocky ground target, penetrator,  
penetrating unit, ballast mass  
jettisoning, recoil impulse*

Received 01.03.2018

© Author(s), 2019

---

*The study was partially supported by RFBR (grant no. 15-08-08319-a)*

**REFERENCES**

- [1] Rodchenko V.V., Sadretdinova E.R., Gusev E.V. Choice of parameters of penetrator for research of a lunar ground. *Vestnik MAI [Aerospace MAI Journal]*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 83–90 (in Russ.).

- [2] Selivanov V.V., ed. *Sredstva porazheniya i boeprisy* [Weapons and ammunition]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008.
- [3] Kaminskiy M.V., Kopytov G.F., Kiselev Yu.G., et al. [Critical velocity at introduction of projectiles with a conic nose form into soil targets]. *Sb. mat. III nauch. konf. Volzhskogo region. tsentra RARAN "Sovremennye metody proektirovaniya i otrabotki raketno-artilleriyskogo vooruzheniya". T. 2* [Proc. III sci. conf. of the RAMAS Volga regional center "Advanced methods of design and development of missile and artillery weapons". Vol. 2]. Sarov, RFYaTs-VNIIEF Publ., 2004, pp. 642–647 (in Russ.).
- [4] Foppetal 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. DOI: 10.1115/1.3171758
- [5] 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., Mechan. Eng.], 2016, no. 4, pp. 40–56 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4-40-56
- [6] Tate A. A theory for the deceleration of long rods after impact. *J. Mech. Phys. Solids*, 1967, vol. 15, no. 6, pp. 387–399. DOI: 10.1016/0022-5096(67)90010-5
- [7] Rosenberg Z., Dekel E. On the role of material properties in the terminal ballistics of long rods. *Int. J. Impact Eng.*, 2004, vol. 30, no. 7, pp. 835–851. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2004.03.007
- [8] Fedorov S.V., Veldanov V.A., Smirnov V.E. Numerical analysis of high density alloys and elongated projectiles' velocity and strength effect on their penetration into a steel target. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2015, no. 1, pp. 65–83 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2015-1-65-83
- [9] Weihrauch G., Wollmann E. Segmented penetrators. *PEP*, 1993, vol. 18, no. 5, pp. 270–274. DOI: 10.1002/rep.19930180507
- [10] Fedorov S.V., Veldanov V.A. Application of segmented strikers for cavern formation in soil and rocky obstacles. *Izvestiya RARAN*, 2012, no. 1, pp. 43–50 (in Russ.).
- [11] Fedorov S.V., Veldanov V.A. Determination of the dimension of a cavity in water behind a fast-moving cylindrical body. *Tech. Phys.*, 2013, vol. 58, no. 2, pp. 165–169. DOI: 10.1134/S1063784213020072
- [12] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., et al. Effect of shaped-charge jet compressibility and strength on the characteristics of their inertial stretching in free flight. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1997, vol. 38, no. 2, pp. 177–184. DOI: 10.1007/BF02467898
- [13] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Optimization of penetration into geological and concrete shields by impactor with jet thruster. *J. Mech. Mater. Struct.*, 2008, vol. 3, no. 4, pp. 707–727.

- [14] Fedorov S.V., Fedorova N.A., Veldanov V.A. Jet thrust impulse using for increase in depth of research modules penetration into low-strength soil targets. *Izvestiya RARAN*, 2014, no. 4, pp. 53–63 (in Russ.).
- [15] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Engineering models of high speed penetration into geological shields. *Centr. Eur. J. Eng.*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 1–19. DOI: 10.2478/s13531-013-0135-4
- [16] Sagomonyan A.Ya. Pronikanie [Penetration]. Moscow, MSU Publ., 1974.
- [17] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Localized interaction models with non-constant friction for rigid penetrating impactors. *Int. J. Solids Struct.*, 2007, vol. 44, no. 7-8, pp. 2593–2607. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.08.009
- [18] Orlenko L.P., ed. Fizika vzryva. T. 2 [Explosion physics. Vol. 2]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004.
- [19] Korolev A.A., Komochkov V.A., ed. Ballistika raketnogo i stvol'nogo oruzhiya [Ballistics of missile and barrel weapon]. Volgograd, Izd-vo uch.-nauch. Lit. Publ., 2010.
- [20] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., et al. Study of dynamical mechanical properties of aluminum alloys by method of accelerometry. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2010, no. 2, pp. 37–46 (in Russ.).

**Fedorov S.V.** — Assist. Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Veldanov V.A.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Fedorova N.A.** — Designer Engineer, Dukhov All-Russia Research Institute of Automatics (Sushchevskaya ul. 22, Moscow, 127055 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Fedorov S.V., Veldanov V.A., Fedorova N.A. On the Possibility of Increasing Rocky Target Penetration Depth for Compound Penetrators Featuring a Tail Assembly Jettisoned at Impact. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 1, pp. 30–50 (in Russ.).

DOI: 10.18698/0236-3941-2019-1-30-50