

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПРОНИКАНИЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПРЕГРАДЫ УДАРНИКОВ С ЭНЕРГОВЫДЕЛЯЮЩИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

С.В. Федоров

sergfed-64@mail.ru

Н.А. Федорова

n2402f@live.ru

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

---

### Аннотация

На основе разработанной расчетной модели проанализирована возможность увеличения глубины проникания ударников в металлические преграды при скоростях взаимодействия  $\sim 1000$  м/с за счет размещения внутри ударника наполнителя из реакционного материала. Предполагалось, что на определенной стадии проникания происходит химическое превращение реакционного материала с энергосвободением и образованием сильно сжатых газообразных продуктов реакции. В результате задняя часть ударника отбрасывалась в направлении, противоположном направлению его движения, а передняя часть ударника получала импульс отдачи в направлении проникания. Силу сопротивления металлической преграды рассчитывали с использованием эмпирической зависимости для механических напряжений на поверхности контакта головной части ударника и преграды. Принято также допущение о том, что химическое превращение реакционного материала происходит мгновенно, а продукты реакции являются совершенным газом с показателем адиабаты  $k = 3$ . Показано, что на прирост глубины проникания можно рассчитывать, если предотвратить значительное радиальное расширение стенок камеры с продуктами реакции. Для этого необходимо, чтобы энергосвободение происходило после заглужения камеры с реакционным наполнителем в формирующуюся в преграде каверну ниже уровня лицевой поверхности

### Ключевые слова

Ударник, металлическая преграда, глубина проникания, реакционный материал, энергосвободение, зарядная камера

Поступила в редакцию 12.01.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

---

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

**Введение.** В настоящее время специалистами в области разработки импульсных устройств различного назначения активно прорабатывается вопрос о возможности повышения эффективности их действия вследствие использования так называемых реакционных материалов, способных выделять при динамическом нагружении значительную энергию, обусловленную протеканием химических реакций.

По сложившейся зарубежной терминологии реакционные материалы — это композиции двух или более твердых веществ, не являющиеся взрывчатыми (в обычном понимании), в которых при высокоинтенсивной деформации или ударно-волновом воздействии может быть инициирована экзотермическая механохимическая реакция [1, 2]. К числу подобных материалов относятся, например, металлофторопластовые композиции, в которых высокоэффективными окислителями по отношению к металлам выступают фторорганические полимеры [3, 4]. В качестве одного из возможных применений реакционных материалов может рассматриваться их включение в состав высокоскоростных ударников для повышения эффективности пробития различных преград.

При взаимодействии металлических ударников с металлическими преградами со скоростями свыше 1000...1200 м/с, как правило, реализуется гидродинамический режим проникания [5–7] (с растеканием материала ударника по поверхности формируемого в преграде кратера). В этом случае использование в составе ударников реакционных материалов проблематично, а в качестве возможных путей повышения эффективности пробивного действия может выступать применение сегментированных и телескопических ударников [8–13], а также ударников из пористого материала [14, 15].

В настоящей работе рассматривается простая расчетная методика, позволяющая учесть влияние энерговыделения реакционного наполнителя, входящего в состав ударника, на глубину его проникания в металлическую преграду при скоростях взаимодействия на уровне 600...800 м/с. На потенциальную возможность такого влияния указывает сопоставление характерного значения энергии  $Q$ , которая может выделиться при реагировании наполнителя, с начальной кинетической энергией ударника  $E_{к0}$ :

$$\frac{Q}{E_{к0}} = \frac{2\alpha e_0}{v_0^2},$$

где  $\alpha = m_e / m_0$  — коэффициент наполнения, характеризующий отношение массы реакционного наполнителя  $m_e$  в составе ударника к его полной массе  $m_0$ ;  $e_0$  — удельное энерговыделение наполнителя;  $v_0$  — начальная скорость ударника. Если принять удельное энерговыделение реакционного наполнителя на уровне, соответствующем удельной теплоте взрыва химических взрывчатых веществ  $e_0 \approx 4$  МДж/кг [16], то при коэффициенте наполнения  $\alpha = 0,1$  и скорости ударника  $v_0 = 800$  м/с получим, что энергия химического превращения наполнителя  $Q$  на 25 % превышает кинетическую энергию ударника. Данный результат свидетельствует о том, что в случае «грамотного» использования ударника энерговыделение наполнителя может ощутимо повлиять на глубину проникания ударника.

**Расчетная модель.** Используемая расчетная модель базируется на следующих основных допущениях (рис. 1):

– взаимодействие ударника с преградой происходит по нормали к ее поверхности;

- при рассматриваемых скоростях взаимодействия деформации головной части ударника малы и ими можно пренебречь;
- сопротивление металлической преграды прониканию ударника подчиняется двучленному закону [17, 18]:

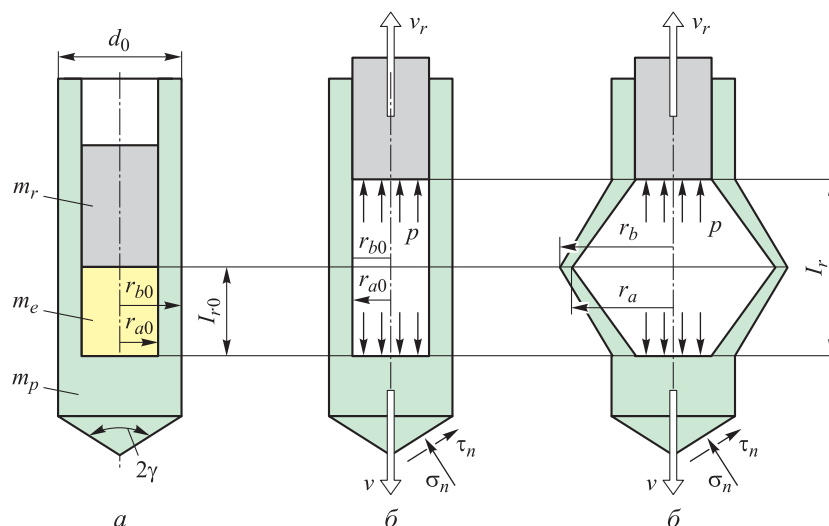
$$\sigma_n = A v_n^2 + C, \quad (1)$$

где  $\sigma_n$  — нормальные напряжения на поверхности контакта головной части с преградой;  $A, C$  — эмпирические константы;  $v_n$  — проекция скорости ударника  $v$  на нормаль к поверхности головной части в данной точке;

- касательные напряжения на контактной поверхности принимаются равными  $\tau_n \approx 0,5C$ , что соответствует отсутствию проскальзывания материалов ударника и преграды [18];

– энерговыделение в реакционном наполнителе происходит мгновенно в заданный момент времени  $t_{r0}$ ;

- продуктом химической реакции является газ с показателем адиабаты  $k = 3$  [16].



**Рис. 1.** Расчетная схема проникания в преграду ударника с реакционным наполнителем: *a* — исходное состояние до начала энерговыделения; *б, в* — без учета и с учетом радиального расширения корпуса зарядной камеры в процессе энерговыделения

В конструктивном отношении ударник предполагался состоящим из двух частей (рис. 1, *a*) — передней (проникающей) массой  $m_p$  и задней (отбрасываемой назад газообразными продуктами химической реакции наполнителя) массой  $m_r$ . При этом передняя часть ударника с тыльной стороны имела участок трубчатой формы, в полости которого размещался реакционный материал массой  $m_e$  и отбрасываемая при его срабатывании задняя часть ударника. До момента энерговыделения наполнителя  $t_{r0}$  ударник рассматривался как единое це-

лое тело общей массой  $m_0 = m_p + m_r + m_e$ , закон движения которого определяется только одной силой сопротивления преграды  $F_s$ , вычисляемой путем интегрирования нормальных  $\sigma_n$  (1) и касательных  $\tau_n$  напряжений по поверхности контакта головной части ударника с преградой. При принятом законе сопротивления (1) выражение для силы сопротивления преграды представляется в виде

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

Входящие в данное выражение коэффициенты инерционного  $F_A$  и прочностного  $F_C$  сопротивления преграды зависят от формы головной части ударника. Расчеты были проведены для ударника с конической головной частью с углом раствора  $2\gamma$  (см. рис. 1, а). В этом случае [19]

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

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

Изменение скорости  $v$  и глубины проникания  $h$  ударника на первой стадии (в промежутки времени  $0 < t < t_{r0}$ , предшествующий энерговыделению наполнителя) описывается уравнениями:

$$m_0 \frac{dv}{dt} = -F_s; \quad \frac{dh}{dt} = v,$$

интегрирование которых при начальном условии  $t = 0; v = v_0; h = 0$  дает следующие выражения для определения  $v$  и  $h$ :

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

После «срабатывания» наполнителя ( $t > t_{r0}$ ) начиналась вторая стадия проникания, на которой движение передней (проникающей) и задней (балластной) частей ударника рассчитывалось отдельно — передняя часть двигалась под действием силы сопротивления преграды и силы давления газообразных продуктов реакции, а задняя часть тормозилась только силой давления газа. Изменение скорости  $v$  передней части ударника и глубины проникания  $h$  на второй стадии описывалось уравнениями

$$m_p \frac{dv}{dt} = -F_s + p S_{r0}; \quad \frac{dh}{dt} = v, \quad (3)$$

где  $p$  — давление газа;  $S_{r0} = \pi r_{a0}^2$  — площадь исходного внутреннего сечения (радиусом  $r_{a0}$ ) трубчатой части ударника (см. рис. 1, а), определяющая осевое действие давления газа на его переднюю и заднюю составляющие. Скорость  $v_r$  задней части ударника и ее смещение  $l_r$  относительно передней после превращения реакционного наполнителя в газ определялись из дифференциальных соотношений:

$$m_r \frac{dv_r}{dt} = -p S_{r0}; \quad \frac{dl_r}{dt} = v - v_r. \quad (4)$$

Интегрирование уравнений (3), (4) должно проводиться при начальном условии  $t = t_{r0}$ ;  $v = v_r = v_1$ ;  $h = h_1$ ;  $l_r = l_{r0}$ , где  $l_{r0}$  — начальный осевой размер зарядной камеры, содержащей реакционный наполнитель (см. рис.1, а),  $v_1$  и  $h_1$  — скорость и глубина проникания ударника в момент срабатывания реакционного наполнителя, вычисляемые на основании соотношений (2) при подстановке в них времени  $t = t_{r0}$ .

Давление продуктов реакции, действующее на переднюю и заднюю части ударника, в зависимости от занимаемого газом объема  $V$  определялось в адиабатическом приближении [16]:

$$p = p_0 (V_0/V)^k, \quad (5)$$

где  $V_0 = l_{r0} S_{r0}$  — начальный объем зарядной камеры;  $p_0$  — начальное давление продуктов реакции наполнителя. При этом рассматривалось два варианта — без учета радиального расширения стенок трубчатой части (рис. 1, б) и с его учетом (рис. 1, в). В первом случае текущее значение объема газообразных продуктов реакции вычислялось как  $V = l_r S_{r0}$ . Во втором случае для определения динамики изменения радиуса камеры с продуктами реакции использовалась модель расширения цилиндрической оболочки из несжимаемого жесткопластического материала под действием внутреннего давления [20]. В соответствии с данной моделью текущие значения скорости внутренней поверхности оболочки  $v_a$  и ее радиуса  $r_a$  (см. рис. 1, в) могут быть рассчитаны на основании интегрирования уравнений

$$\frac{dv_a}{dt} = \frac{1}{\rho_p r_a} \left[ \frac{p}{\ln(r_b/r_a)} - \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{yp} \right] + \frac{v_a^2}{r_a} \left[ \frac{1}{2 \ln(r_b/r_a)} \left( 1 - \frac{r_a^2}{r_b^2} \right) - 1 \right]; \quad \frac{dr_a}{dt} = v_a, \quad (6)$$

где  $\rho_p$  и  $\sigma_{yp}$  — плотность и предел текучести материала оболочки (соответствующие характеристикам материала трубчатого участка передней части ударника);  $r_b$  — текущее значение наружного радиуса оболочки (см. рис. 1, в), определяемое с использованием его начального значения  $r_{b0}$  из условия несжимаемости материала оболочки  $r_b^2 - r_a^2 = r_{b0}^2 - r_{a0}^2$ . При учете радиального расширения стенок зарядной камеры предполагали, что ее форма в процессе расширения представляется двумя усеченными конусами с общим основанием радиусом  $r_a$  (см. рис. 1, в). В рамках данного предположения текущее значение объема продуктов реакции наполнителя, определяющее, согласно (5), изменение их давления  $p$ , а через него в соответствии с (3), (4), (6) и динамику движения составных частей ударника, рассчитывалось как  $V = \pi (r_{a0}^2 + r_{a0} r_a + r_a^2) l_r / 3$ .

Влиянием на динамику движения проникающей и балластной частей ударника поступательного движения самих продуктов реакции пренебрегалось

в силу предполагаемой малости их массы (совпадающей с массой реакционного наполнителя в ударнике). Величина последней характеризовалась в расчетах коэффициентами наполнения  $\alpha = 0,025-0,15$ . К числу параметров, используемых в расчетной методике для характеристики работоспособности наполнителя, относились также его удельное энерговыделение  $e_0$  и начальное давление  $p_0$  газообразных продуктов реакции. При заданных значениях коэффициента наполнения  $\alpha$ , удельного энерговыделения  $e_0$  наполнителя и начального давления  $p_0$  газа начальный осевой размер зарядной камеры рассчитывался по формуле

$$l_{r0} = \frac{\alpha m_0 e_0 (k-1)}{p_0 S_{r0}}.$$

При задании начального давления продуктов реакции  $p_0$  учитывалось, что для обеспечения раздельного движения передней и задней частей ударника (а только в этом случае энерговыделение наполнителя может повлиять на глубину проникания) оно должно превышать определенный уровень, диктуемый необходимостью выполнения следующего условия — осевое ускорение балластной части ударника массой  $m_r$ , сообщаемое ей силой давления газа  $p_0 S_{r0}$ , по абсолютному значению должно превышать ускорение всего ударника в целом (массой  $m_0$ ) под действием силы  $F_s$  сопротивления преграды. Из данного условия следует, что «отстрел» задней части ударника с сообщением дополнительного реактивного импульса его передней части может начаться только в том случае, если

$$p_0 > \frac{m_r F_s}{m_0 S_{r0}}. \quad (7)$$

Поскольку сила сопротивления преграды зависит от текущей скорости ударника и уменьшается в процессе его проникания, то и минимальное значение начального давления газа  $p_0$ , обеспечивающее разделение ударника на части, будет снижаться с увеличением момента времени  $t_{r0}$ , в который происходит реагирование наполнителя с его превращением в газ.

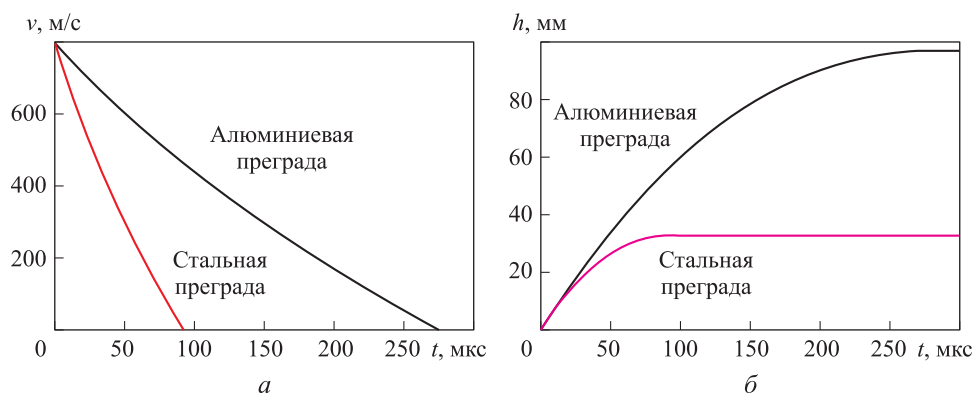
**Исходные данные для расчетов.** Как следует из представленной расчетной модели, основной фактор, который может привести к повышению пробивного действия ударника с реакционным наполнителем, заключается в сообщении силой давления газообразных продуктов реакции наполнителя дополнительного импульса передней (проникающей) части ударника [19, 21]. Положительное влияние данного фактора с неизбежностью будет ослабляться в той или иной степени проявлением отрицательных последствий срабатывания наполнителя, а именно снижением массы проникающей части ударника — невозможно сообщить ударнику дополнительный импульс в направлении проникания без отстрела какой-то его части в противоположном направлении [22]. Результирующий эффект влияния энерговыделения наполнителя на глубину проникания ударника, очевидно, будет определяться конкуренцией указанных факторов. Сформулированная упрощенная расчетная модель позволяет получить некоторые опорные пред-

ставления о зависимости пробивного действия ударника от определяющих параметров процесса таких, как коэффициент наполнения  $\alpha$ , момент энерговыделения наполнителя  $t_{r0}$ , соотношение масс  $m_p$  и  $m_r$  передней и задней частей ударника, начальное давление продуктов реакции наполнителя  $p_0$ . Важным является также получение ответа на вопрос, насколько существенно влияет на достигаемый эффект радиальное расширение стенок зарядной камеры под действием давления прореагировавшего наполнителя.

Расчеты были проведены для ударника диаметром  $d_0 = 30$  мм и массой  $m_0 = 0,4$  кг, выполненного из высокопрочной стали, имеющего головную часть в форме низкого конуса с углом раствора  $2\gamma = 120^\circ$ , при начальной скорости взаимодействия  $v_0 = 800$  м/с с полубесконечными стальной и алюминиевой преградами. Коэффициенты в законе сопротивления (1) для данных преград принимались равными  $A = 7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $C = 3$  ГПа (для стальной преграды),  $A = 2700$  кг/м<sup>3</sup>,  $C = 1$  ГПа (для алюминиевой преграды) [23, 24]. Пробивное действие ударников с реакционным наполнителем сопоставлялось с пробитием эквивалентного по площади миделя, массе и скорости инертного ударника. Полные глубина  $h_{p0}$  и время  $t_{p0}$  проникания эквивалентного инертного ударника определяются с использованием соотношений (2) зависимостями

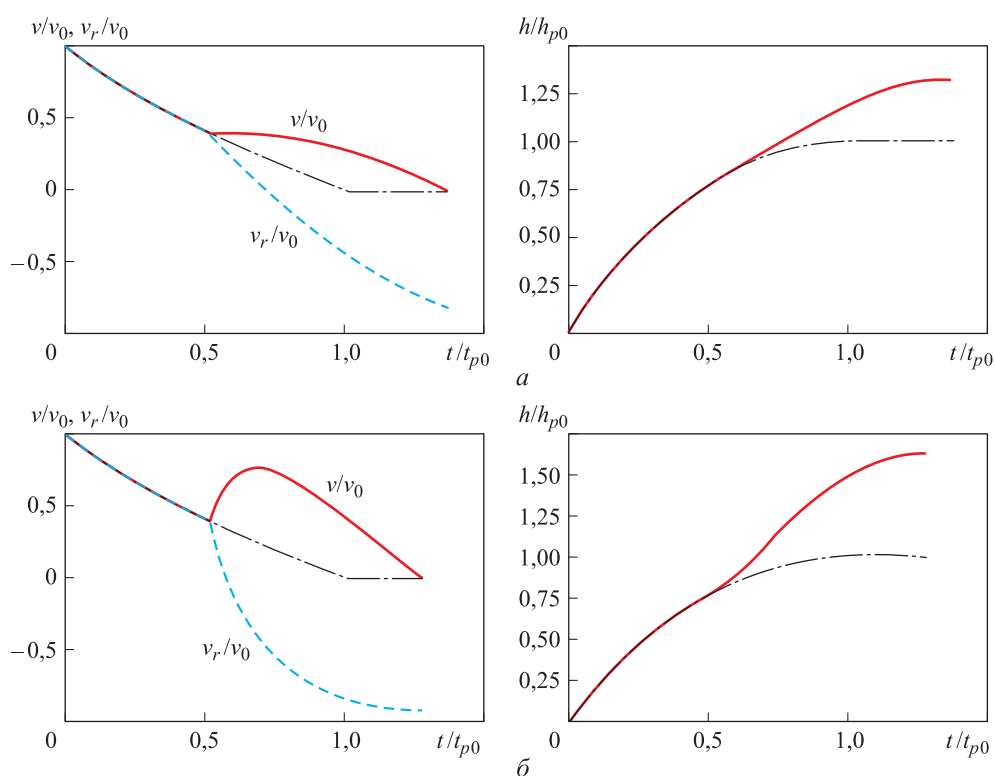
$$h_{p0} = \frac{m_0}{2F_A} \ln \left[ \frac{F_A}{F_C} v_0^2 + 1 \right]; \quad t_{p0} = \frac{m_0}{\sqrt{F_A F_C}} \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{F_A}{F_C}} v_0 \right). \quad (8)$$

Данные значения использовались в качестве масштабов глубины и времени проникания при анализе результатов расчетов для ударников с энерговыделением наполнителя. В количественном выражении при принятых параметрах ударника и характеристиках преград они составляли  $h_{p0} = 33$  мм,  $t_{p0} = 96$  мкс в случае стальной преграды и  $h_{p0} = 97$  мм,  $t_{p0} = 273$  мкс в случае алюминиевой (рис. 2).



**Рис. 2.** Динамика проникания инертного ударника в стальную и алюминиевую преграды:  
*a* — изменение скорости ударника; *б* — изменение глубины проникания

**Схема без учета радиального расширения корпуса зарядной камеры.** Для ударников с реакционным наполнителем толщина стенки зарядной камеры (трубчатого участка передней части ударника) принималась равной 5 мм ( $r_{a0} = 10$  мм, см. рис. 1, а), удельное энерговыделение наполнителя составляло  $e_0 = 4$  МДж/кг. Сначала была рассмотрена схема без учета радиального расширения корпуса зарядной камеры под действием давления продуктов реакции наполнителя (см. рис. 1, б). На рис. 3 проводится сопоставление зависимостей от относительного времени  $t/t_{p0}$  текущей относительной глубины проникания  $h/h_{p0}$  и относительных скоростей передней  $v/v_0$  и задней  $v_r/v_0$  частей ударника с энерговыделением наполнителя с параметрами проникания эквивалентного инертного ударника (сплошные линии соответствуют движению передней части ударника с реакционным наполнителем, штрихпунктирные — движению инертного ударника, штриховые — скорости задней части ударника с наполнителем). Приведенные результаты получены при начальном давлении газа  $p_0 = 10$  ГПа, коэффициенте наполнения  $\alpha = 0,1$  и равных массах передней  $m_p$  и задней  $m_r$  частей ударника. В проиллюстрированных на рис. 3 случаях срабаты-



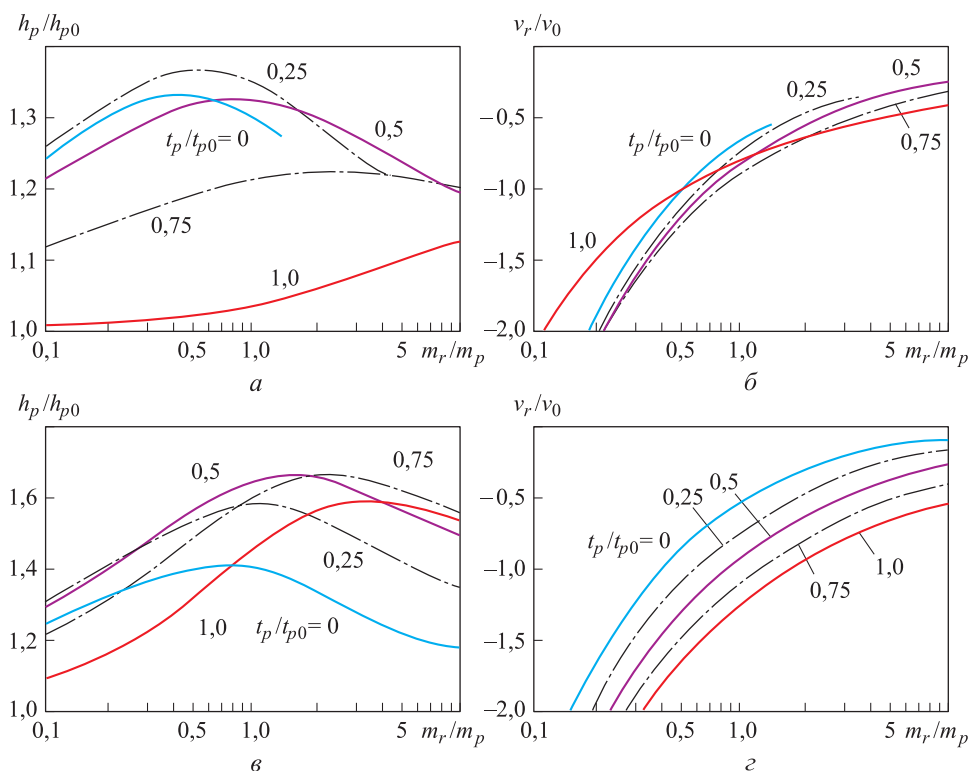
**Рис. 3.** Сравнительный анализ динамики проникания ударника с энерговыделением наполнителя (без учета радиального расширения стенок камеры) и эквивалентного инертного ударника ( $\alpha = 0,1$ ;  $p_0 = 10$  ГПа;  $t_{r0} / t_{p0} = 0,5$ ;  $m_r / m_p = 1$ ):

а — стальная преграда; б — алюминиевая преграда



вание реакционного наполнителя происходит в момент, соответствующий половине полного времени проникания инертного ударника ( $t_{r0}/t_{p0} = 0,5$ ), когда текущая глубина проникания как в стальную, так и в алюминиевую преграды составляет  $\sim 75\%$  значения  $h_{p0}$ , а текущая скорость —  $\sim 40\%$  начального значения  $v_0$ . Видно, что после этого момента темп торможения передней (проникающей) части ударника со сработавшим наполнителем в стальной преграде существенно снижается, а в имеющей меньшее сопротивление алюминиевой в течение небольшого промежутка времени наблюдается даже прирост скорости проникающей части. Задняя (балластная) часть ударника с прореагировавшим наполнителем приобретает в результате скорость противоположного первоначальному направления со значением, близким к начальной скорости ударника  $v_0$ . Прирост глубины проникания по сравнению с инертным ударником составляет при этом  $\sim 30\%$  в стальной преграде (рис. 3, а) и  $\sim 60\%$  в алюминиевой (рис. 3, б). Зафиксированный эффект весьма заметного повышения пробивного действия обусловлен, очевидно, тем, что при отсутствии радиального расширения стенок зарядной камеры продукты реакции наполнителя, внутренняя энергия которых, как отмечалось, превышает начальную кинетическую энергию ударника, сообщают передней (проникающей) части ударника значительный дополнительный импульс.

На рис. 4 для рассматриваемой схемы с зафиксированными стенками зарядной камеры (см. рис. 1, б) проиллюстрировано изменение полной глубины проникания ударников с реакционным наполнителем  $h_p$ , отнесенной к значению  $h_{p0}$  (8), в зависимости от соотношения масс задней и передней частей ударника при энерговыделении на различных стадиях проникания, характеризующихся отношением времени срабатывания наполнителя  $t_{r0}$  к полному времени проникания инертного ударника  $t_{p0}$  (8) (расчеты проведены при  $\alpha = 0,1$  и  $p_0 = 10$  ГПа). Здесь же приводятся и зависимости от указанных параметров конечной относительной скорости отстрела  $v_r/v_0$  задней части ударника. Видно, что существуют оптимальные значения  $m_r/m_p$  и  $t_{r0}/t_{p0}$ , при которых достигается весьма заметный прирост пробивного действия. Как уже отмечалось, наличие оптимумов связано с конкуренцией при проникании ударника с энерговыделением наполнителя двух факторов, действующих в противоположных направлениях — фактора уменьшения проникающей массы, что отрицательно влияет на проникание, и фактора действия на переднюю проникающую часть ударника дополнительной силы, способствующей ее более глубокому прониканию. В случае взаимодействия со стальной преградой оптимальное время задержки энерговыделения наполнителя  $t_{r0}$  составляет  $\sim 0,25 t_{p0}$  (рис. 4, а). При проникании в существенно более мягкую алюминиевую преграду выгоднее, чтобы срабатывание реакционного наполнителя происходило в более поздние моменты —  $(0,5 \dots 0,75) t_{p0}$  (рис. 4, в). Изменяется и оптимальное соотношение масс составных частей ударника при взаимодействии с преградами, оказывающими различное сопротивление прониканию. В случае стальной преграды при оптимальной задержке энерговыделения наполнителя максимальный прирост глубины проникания достигается для



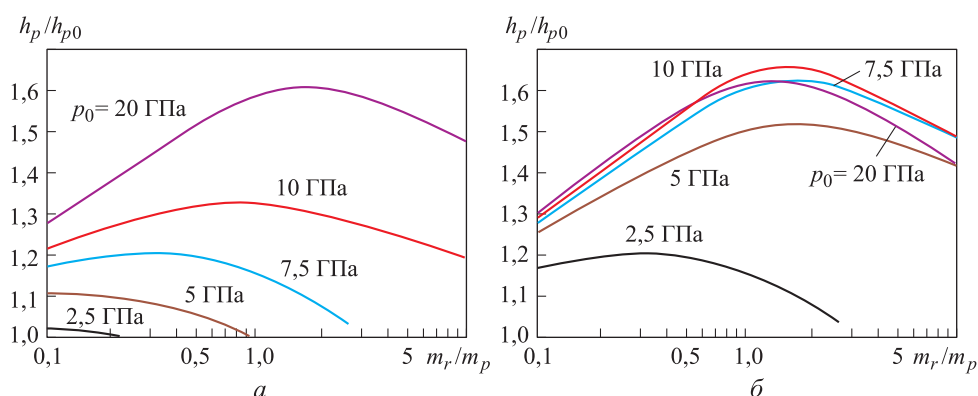
**Рис. 4.** Влияние на глубину проникания ударника (а, в) и скорость отстрела (б, г) его задней части соотношения масс частей ударника и момента энерговыведения наполнителя для схемы без учета радиального расширения стенок камеры ( $\alpha = 0,1$ ;  $p_0 = 10$  ГПа):

а, б — стальная преграда; в, г — алюминиевая преграда

ударника, у которого передняя проникающая часть тяжелее задней балластной ( $m_r/m_p \approx 0,6$ ). Достижение же максимального эффекта от энерговыведения наполнителя при взаимодействии с алюминиевой преградой реализуется, напротив, когда проникающая часть ударника заметно легче балластной ( $m_r/m_p \approx 1,5-2,0$ ).

Если анализировать изменение конечной скорости движения задней (отстреливаемой) части ударника с реакционным наполнителем (см. рис. 4), то во всех рассмотренных случаях она имеет направление, противоположное направлению движения ударника, и возрастает по абсолютному значению с увеличением относительного времени задержки энерговыведения  $t_{r0}/t_{p0}$  и уменьшением соотношения масс задней и передней частей ударника  $m_r/m_p$ . При этом в случае проникания в алюминиевую преграду значение  $t_{r0}/t_{p0}$  влияет на конечную скорость отстрела балластной массы заметно сильнее (см. рис. 4, г), чем при проникании в стальную (см. рис. 4, б). При значениях  $t_{r0}/t_{p0}$  и  $m_r/m_p$ , обеспечивающих максимальный прирост глубины проникания, и принятой начальной скорости взаимодействия ( $v_0 = 800$  м/с) конечная скорость балластной части ударника  $v_r$  близка (по абсолютному значению) к  $v_0$  в случае проникания в стальную преграду и составляет  $\sim 0,7 v_0$  при проникании в алюминиевую.

Анализ влияния начального давления  $p_0$  продуктов реакции наполнителя на пробивное действие ударника, проведенный для схемы без учета их радиального расширения при коэффициенте наполнения  $\alpha = 0,1$  и относительной задержке энергоснабжения  $t_{r0} / t_{p0} = 0,5$ , показал, что его характер различен при проникании в стальную и алюминиевую преграды (рис. 5). В случае стальной



**Рис. 5.** Влияние на глубину проникания ударника начального давления продуктов реакции наполнителя для схемы без учета радиального расширения стенок камеры ( $\alpha = 0,1$ ;  $t_{r0} / t_{p0} = 0,5$ ):

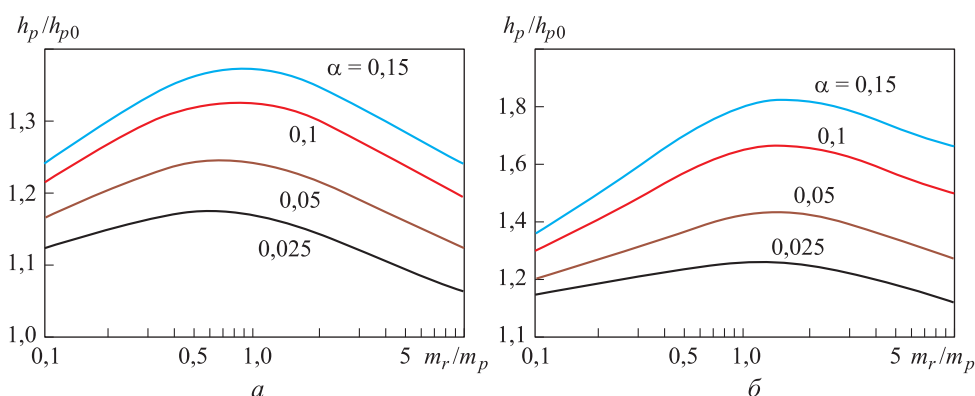
*a* — стальная преграда; *б* — алюминиевая преграда

преграды при изменении значения  $p_0$  от 2,5 до 20 ГПа наблюдается монотонное увеличение относительной глубины проникания  $h_p / h_{p0}$  (рис. 5, *a*). При этом для достижения максимального эффекта с повышением начального давления газа необходимо утяжелять заднюю часть ударника и облегчать переднюю (с ростом  $p_0$  оптимальное значение соотношения масс  $m_r / m_p$  возрастает). Например, прирост глубины проникания в стальную преграду при  $p_0 = 7,5$  ГПа может достигать 20 %, если  $m_r / m_p$  принимает значение 0,3–0,4, и возрастает примерно до 60 % при  $p_0 = 20$  ГПа, если  $m_r / m_p = 1,5$ –2. В случае алюминиевой преграды увеличение начального давления продуктов реакции наполнителя приводит к повышению пробивного действия ударника только до определенного предела, достигаемого приблизительно при  $p_0 = 10$  ГПа (рис. 5, *б*). При дальнейшем увеличении  $p_0$  до 20 ГПа наблюдается уже некоторое снижение  $h_p / h_{p0}$ , так что прирост глубины проникания в алюминиевую преграду при  $p_0 = 20$  ГПа и  $p_0 = 7,5$  ГПа оказывается примерно одинаковым и максимален (чуть больше 60 %) при одном и том же соотношении масс частей ударника  $m_r / m_p = 1,5$ –2.

При анализе рис. 5 следует дополнительно обратить внимание, что при достаточно низких начальных давлениях газа условие (7) раздельного движения частей ударника выполнялось не во всем рассматриваемом диапазоне изменения соотношения их масс. Поэтому кривые для  $p_0 = 7,5$  ГПа в случае стальной

преграды (см. рис. 5, а) и  $p_0 = 2,5$  ГПа в случае алюминиевой (см. рис. 5, б) «об-  
рываются» при некоторых значениях  $m_r / m_p$ . Это означает, что дальнейшее уве-  
личение массы балластной части ударника (а соответственно и увеличение со-  
отношения  $m_r / m_p$ ) не позволяет произвести ее отстрел при заданном началь-  
ном давлении газа  $p_0$  и выбранном времени задержки энерговыделения напол-  
нителя  $t_{r0}$ .

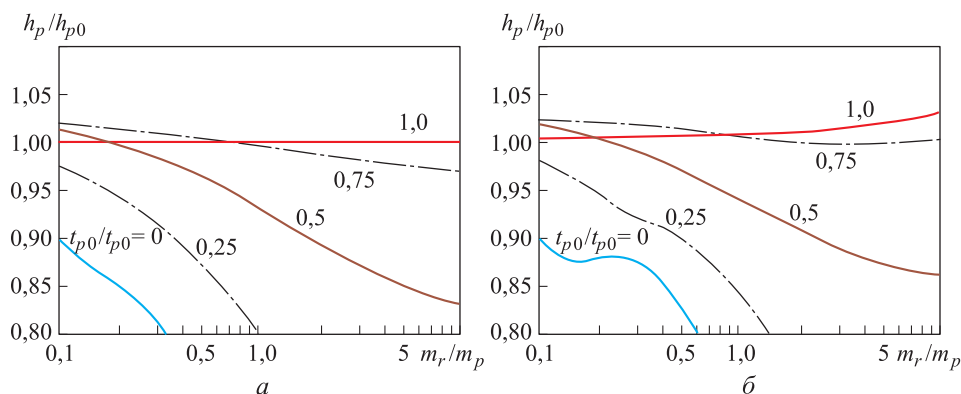
При исследовании влияния на пробивное действие ударника с реакцион-  
ным наполнителем коэффициента заполнения  $\alpha$  (расчеты проводились при  
 $p_0 = 10$  ГПа и  $t_{r0} / t_{p0} = 0,5$ ) было установлено, что при отсутствии радиального  
расширения стенок зарядной камеры (см. рис. 1, б) увеличение значения  $\alpha$  от  
0,025 до 0,15 приводит к возрастанию максимально достижимого прироста глу-  
бины проникания (при оптимальном соотношении масс задней и передней ча-  
стей ударника) примерно от 17 до 37 % в случае стальной преграды (рис. 6, а) и  
примерно от 25 до 80 % в случае алюминиевой (рис. 6, б). При этом для обеих  
преград оптимальные значения  $m_r / m_p$  остаются практически неизменными при  
различных значениях  $\alpha$ .



**Рис. 6.** Влияние на глубину проникания ударника коэффициента заполнения для схемы без учета радиального расширения стенок камеры ( $p_0 = 10$  ГПа;  $t_{r0} / t_{p0} = 0,5$ ):

а — стальная преграда; б — алюминиевая преграда

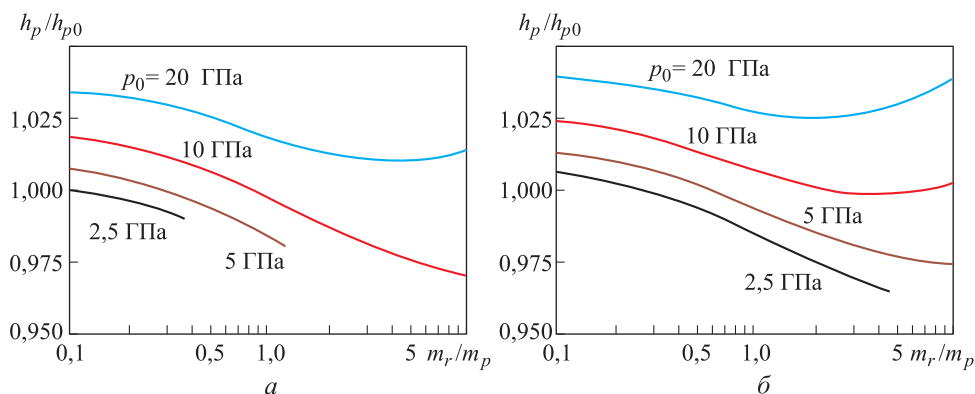
**Схема с учетом радиального расширения корпуса зарядной камеры.** Обна-  
деживающие результаты по увеличению глубины проникания в металлические  
преграды ударников с энерговыделением реакционного наполнителя, получен-  
ные для расчетной схемы без учета радиального расширения корпуса зарядной  
камеры (см. рис. 1, б), сменились фактически на безнадёжные при переходе к схе-  
ме, учитывающей данный фактор (см. рис. 1, в). На рис. 7 для схемы с радиальным  
разлетом продуктов реакции наполнителя показано изменение относительной  
глубины проникания ударника  $h_p / h_{p0}$  в стальную и алюминиевую преграды в за-  
висимости от соотношения масс его частей  $m_r / m_p$  при различных относительных  
временах задержки энерговыделения  $t_{r0} / t_{p0}$  (расчеты проведены при  $\alpha = 0,1$  и



**Рис. 7.** Влияние на глубину проникания ударника соотношения масс его задней и передней частей и момента энерговыделения наполнителя для схемы с учетом радиального расширения стенок камеры ( $\alpha = 0,1$ ;  $p_0 = 10$  ГПа):  
 а — стальная преграда; б — алюминиевая преграда

$p_0 = 10$  ГПа). Видно, что практически во всей области изменения параметров  $m_r / m_p$  и  $t_{r0} / t_{p0}$  энерговыделение наполнителя приводит не к увеличению, а, напротив, к снижению глубины проникания ударника с реакционным наполнителем по отношению к глубине проникания эквивалентного инертного ударника. Слабый положительный эффект (с приростом глубины проникания в пределах нескольких процентов) как для стальной (рис. 7, а), так и для алюминиевой (рис. 7, б) преград наблюдается только в узкой области очень малых масс отстреливаемой балластной части ( $m_r / m_p \approx 0,1$ ) при срабатывании наполнителя с относительной задержкой  $t_{r0} / t_{p0} = 0,5-0,75$ . В случае относительно мягкой алюминиевой преграды (см. рис. 7, б) примерно такой же небольшой прирост пробивного действия достигается, напротив, при очень легкой передней части ударника и тяжелой задней ( $m_r / m_p \approx 10$ ), если энерговыделение наполнителя происходит уже в момент прекращения проникания ударника ( $t_{r0} / t_{p0} = 1$ ). Фактическое отсутствие положительного эффекта по увеличению глубины проникания ударников с реакционным наполнителем, зафиксированное для схемы с учетом радиального расширения стенок зарядной камеры, связано, очевидно, с происходящим вследствие этого расширения резким падением давления продуктов реакции. В результате передняя часть ударника получает очень маленький дополнительный импульс в направлении проникания, не способный компенсировать снижение ее проникающей способности, обусловленное уменьшающейся массой.

На рис. 8 для схемы с радиальным расширением газа приведены результаты расчетов по влиянию на пробивное действие его начального давления  $p_0$  (при коэффициенте наполнения  $\alpha = 0,1$  и относительной задержке энерговыделения  $t_{r0} / t_{p0} = 0,75$ ). Видно, что, хотя с повышением  $p_0$  как в случае стальной (рис. 8, а), так и алюминиевой (рис. 8, б) преград наблюдается увеличение относительной глубины проникания  $h_p / h_{p0}$ , ее максимально достижимое значение не превышает

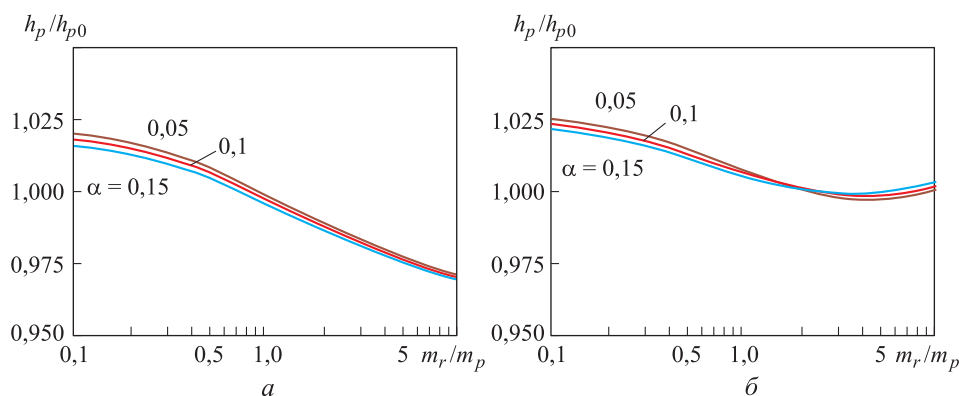


**Рис. 8.** Влияние на глубину проникания ударника начального давления продуктов реакции наполнителя для схемы с учетом радиального расширения стенок камеры ( $\alpha = 0,1; t_{r0} / t_{p0} = 0,75$ ):

*a* — стальная преграда; *б* — алюминиевая преграда

1,03–1,04 даже при предельно высоком начальном давлении продуктов реакции наполнителя  $p_0 = 20$  ГПа (для ясности еще раз укажем, что причиной обрыва некоторых кривых на рис. 8, соответствующих низким значениям  $p_0$ , является невыполнение условия (7) отделения задней части ударника в диапазоне больших значений  $m_r / m_p$ ).

Интересно отметить, что при исследовании влияния на величину  $h_p / h_{p0}$  в схеме с учетом радиального расширения корпуса зарядной камеры (см. рис. 1, *в*) коэффициента наполнения  $\alpha$  (расчеты проводились при  $p_0 = 10$  ГПа и  $t_{r0} / t_{p0} = 0,75$ ) было зафиксировано даже небольшое уменьшение относительной глубины проникания ударника с реакционным наполнителем с увеличением значения  $\alpha$  от 0,05 до 0,15, наблюдавшееся как для стальной (рис. 9, *а*), так и для алюминиевой (рис. 9, *б*) преград. Впрочем это снижение было крайне незначи-



**Рис. 9.** Влияние на глубину проникания ударника коэффициента наполнения для схемы с учетом радиального расширения стенок камеры ( $p_0 = 10$  ГПа;  $t_{r0} / t_{p0} = 0,75$ ):

*a* — стальная преграда; *б* — алюминиевая преграда

тельным (доли процента), и на практике можно считать, что в рассмотренном диапазоне своего изменения 0,05–0,15 коэффициент наполнения  $\alpha$  не влияет на пробивное действие ударника, допускающего радиальное расширение продуктов реакции наполнителя.

**Заключение.** Таким образом, один из основных выводов, к которому приводят результаты расчетов, заключается в том, что рассчитывать на значимый прирост глубины проникания ударников в металлические преграды за счет энерговыделения реакционного наполнителя можно лишь при минимизации потерь, обусловленных радиальным расширением стенок зарядной камеры. Отрицательное влияние данного эффекта может быть уменьшено, если срабатывание реакционного наполнителя происходит после заглупления камеры, в которой он находится, ниже уровня лицевой поверхности преграды. В этом случае радиальному расширению стенок камеры будет препятствовать боковая поверхность каверны в преграде, формирующейся при проникании ударника. Конструкция ударника и свойства используемого реакционного материала в первую очередь должны обеспечивать удовлетворение данного требования. Продукты реакции наполнителя при этом должны быть газообразными (для совершения значительной работы при своем расширении и придания дополнительного импульса передней проникающей части ударника) и иметь давление не менее 2...5 ГПа для эффективного действия ударников по алюминиевым преградам и не менее 7...10 ГПа при их действии по стальным преградам. Соотношение масс передней (проникающей) и задней (отстреливаемой) частей ударника с реакционным наполнителем, по возможности, необходимо выбирать близким к оптимальному значению, обеспечивающему максимальный прирост глубины проникания. Применительно к случаю взаимодействия со стальными преградами максимально возможные значения коэффициента наполнения, которые можно реализовать на практике, как представляется, ограничиваются уровнем 0,02–0,05. При этом потенциально достигаемый прирост глубины проникания ударника в стальную преграду за счет энерговыделения реакционного наполнителя будет лежать в пределах 10 %. Для случая взаимодействия с алюминиевыми преградами коэффициент наполнения может быть повышен до 0,1, что дает основания рассчитывать на возможность получения прироста глубины проникания ударников с реакционным наполнителем в алюминиевую преграду на уровне нескольких десятков процентов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ames R.G. A standardized evaluation technique for reactive warhead fragments // Proc. of the 23rd Int. Symp. on Ballistics. Tarragona, Spain. 2007. Vol. 1. P. 49–58.
2. Об исследованиях по разработке за рубежом новых высокоплотных реактивных материалов («High-Density Reactive Materials») и их применению в боеприпасах повышенного могущества действия / Н.А. Имховик, В.В. Селиванов, А.К. Симонов, А.И. Сергеева, Б.В. Яшин // Вооружение и экономика. 2014. № 1 (26). С. 53–63.  
URL: <http://www.viek.ru/26/53-63.pdf>

3. Яшин В.Б., Алексеев В.В., Ходырев С.П. Параметры взрыва зарядов тротила, содержащих блоки из высокоплотных металлофторопластовых композиций // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 1 (13). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-1-566  
URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/566.html>
4. Селиванов В.В., Имховик Н.А., Лашков В.Н., Селезнев А.А. Исследование процесса физико-химической деструкции ПТФЭ и композиций ПТФЭ–металл при термических и ударно-волновых воздействиях // Химическая физика. 2001. Т. 20. № 8. С. 80–85.
5. Федоров С.В., Баянова Я.М. Особенности гидродинамического режима проникания удлиненных ударников с учетом сжимаемости материалов // Журнал технической физики. 2011. Т. 81. № 9. С. 45–51.
6. Rosenberg Z., Dekel E. On the role of material properties in the terminal ballistics of long rods // International Journal of Impact Engineering. 2004. Vol. 30. No. 7. P. 835–851.  
DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2004.03.007
7. 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
8. Wehrauch G., Wollmann E. Segmented penetrators // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1993. Vol. 18. No. 5. P. 270–274. DOI: 10.1002/prep.19930180507  
URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/prep.19930180507/full>
9. Orphal D.L., Franzen R.R. Penetration mechanics and performance of segmented rods against metal targets // International Journal of Impact Engineering. 1990. Vol. 10. No. 1-4. P. 427–438.  
DOI: 10.1016/0734-743X(90)90077-9  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0734743X90900779>
10. Федоров С.В., Велданов В.А., Гладков Н.А., Смирнов В.Е. Численный анализ проникания в стальную преграду сегментированных и телескопических ударников из высокоплотного сплава // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 3. С. 100–117.  
DOI: 10.18698/0236-3941-2016-3-100-117
11. Федоров С.В., Велданов В.А. Применение сегментированных ударников для формирования каверны в грунтово-скальных преградах // Известия РАН. 2012. № 1 (71). С. 43–50.
12. Penetration mechanics of seg-tel penetrators / C.E. Anderson, R. Subramanian, J.D. Walker, M.J. Normandia, T.R. Sharron // International Journal of Impact Engineering. 1997. Vol. 20. No. 1-5. P. 13–26. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)87477-5  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X97874775>
13. Westerling L., Lundberg P., Holmberg L., Lundberg B. High velocity penetration of homogeneous, segmented and telescopic projectiles into alumina targets // International Journal of Impact Engineering. 1997. Vol. 20. No. 6-10. P. 817–827. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)87467-2  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X97874672>
14. Федоров С.В. К определению глубины проникания пористых ударников при гиперзвуковом взаимодействии // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. № 10. С. 131–134.
15. О высокоскоростном проникании стержней из пористого материала / С.В. Федоров, А.В. Бабкин, В.А. Велданов, Н.А. Гладков, С.В. Ладов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2016. № 5. С. 18–32. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-5-18-32



16. Орленко Л.П., ред. Физика взрыва. В 2 т. Т. 1. М.: Физматлит, 2004. 832 с.
17. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Engineering models of high speed penetration into geological shields // Central European Journal of Engineering. 2014. Vol. 4. No. 1. P. 1–19.  
DOI: 10.2478/s13531-013-0135-4  
URL: <https://link.springer.com/article/10.2478/s13531-013-0135-4>
18. 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.
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 РАН. 2014. № 4 (84). С. 53–63.
20. Орленко Л.П., ред. Физика взрыва. В 2 т. Т. 2. М.: Физматлит, 2004. 656 с.
21. 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.
22. 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: 18698/0236-3941-2016-4-40-56
23. Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И. Исследование динамических механических свойств алюминиевых сплавов методом акселерометрии // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. № 2. С. 37–46.
24. Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И. Расчет проникания недеформируемых ударников в малопрочные преграды с использованием данных пьезоакселерометрии // Журнал технической физики. 2011. Т. 81. № 7. С. 94–104.

**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).

**Федорова Наталия Александровна** — студентка кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

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

Федоров С.В., Федорова Н.А. Анализ возможности увеличения глубины проникания в металлические преграды ударников с энерговыделяющим наполнителем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 1. С. 110–130.  
DOI: 10.18698/0236-3941-2018-1-110-130

## ANALYSIS OF POSSIBILITY OF INCREASE IN PENETRATION DEPTH INTO METAL TARGETS OF PROJECTILES WITH ENERGY RELEASE FILLER

S.V. Fedorov

sergfed-64@mail.ru

N.A. Fedorova

n2402f@live.ru

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

---

### Abstract

The article provides the analysis of the possibility of increase in projectile penetration depth into metal targets at interaction velocities about 1000 m/s due to placement of reactive material filler in the projectile. The analysis is made on the basis of developed calculation model. We suppose that reactive material chemical transformation happens at a certain stage of penetration with energy release and emergence of strongly compressed gaseous products of reaction. As a result, a back part of the projectile is rejected in the direction opposite to the direction of its movement, and a forward part receives a recoil momentum in the direction of penetration. The force of metal target resistance is calculated with the use of empirical dependence for mechanical stresses on the surface of contact of a projectile head part and a target. Moreover, we accept the assumption that chemical transformation of reactive material happens instantly and products of reaction are ideal gas with adiabatic index  $k = 3$ . The article shows that it is possible to hope for the increase in penetration depth in case of prevention of considerable radial expansion of chamber walls with reaction products. For this purpose it is necessary that energy release happened after deepening of chamber with reactive filler in the cavity which is formed in a target lower than the level of a target front surface

### Keywords

*Projectile, metal target, penetration depth, reactive material, energy release, charging chamber*

Received 12.01.2017

© BMSTU, 2018

---

*This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 15-08-08319-a)*

### REFERENCES

- [1] Ames R.G. A standardized evaluation technique for reactive warhead fragments. *Proc. of the 23rd Int. Symp. on Ballistics*. Tarragona, Spain. 2007, vol. 1, pp. 49–58.
- [2] Imkhovik N.A., Selivanov V.V., Simonov A.K., Sergeeva A.I., Yashin B.V. About the abroad development research of new "High-Density Reactive Materials" and its appliance in high-lethality ammunition. *Vooruzhenie i ekonomika* [Armament and Economics], 2014, no. 1 (26), pp. 53–63 (in Russ.). Available at: <http://www.viek.ru/26/53-63.pdf>
- [3] Yashin V.B., Alekseev V.V., Khodyrev S.P. The explosive parameters of the tnt charges containing blocks of high-density metal-ptfe compositions. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 1 (13) (in Russ.). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-1-566 Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/566.html>

- [4] Selivanov V.V., Imkhovik N.A., Lashkov V.N., Selezenev A.A. Research on process of physical-chemical disrupture of PTFE and PTFE-metal composition under chemical and shock-wave exposure. *Khimicheskaya fizika*, 2001, vol. 20, no. 8, pp. 80–85 (in Russ.).
- [5] Fedorov S.V., Bayanova Ya.M. Penetration of long strikers under hydrodynamic conditions with allowance for the material compressibility. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 56, no. 9, pp. 1266-1271. DOI 10.1134/S1063784211090088  
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063784211090088>
- [6] Rosenberg Z., Dekel E. On the role of material properties in the terminal ballistics of long rods. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, vol. 30, no. 7, pp. 835–851.  
DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2004.03.007  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X0400048X>
- [7] Fedorov S.V., Veldanov V.A., Smirnov V.E. Influence numerical analysis of velocity and strength of high density alloy elongated projectiles on their penetration depth into the 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
- [8] Weihrauch G., Wollmann E. Segmented penetrators. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1993, vol. 18, no. 5, pp. 270–274. DOI: 10.1002/prop.19930180507  
Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/prop.19930180507/full>
- [9] Orphal D.L., Franzen R.R. Penetration mechanics and performance of segmented rods against metal targets. *International Journal of Impact Engineering*, 1990, vol. 10, no. 1-4, pp. 427–438.  
DOI: 10.1016/0734-743X(90)90077-9  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0734743X90900779>
- [10] Fedorov S.V., Veldanov V.A., Gladkov N.A., Smirnov V.E. Numerical analysis of penetration of segmented and telescopic projectiles of high density alloy into the steel target. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., *Mechan. Eng.*], 2016, no. 3, pp. 100–117 (in Russ.).  
DOI: 10.18698/0236-3941-2016-3-100-117
- [11] Fedorov S.V., Veldanov V.A. Application of segmented strikers for cavern formation in soil and rocky obstacles. *Izvestiya RARAN*, 2012, no. 1 (71), pp. 43–50 (in Russ.).
- [12] Anderson C.E., Subramanian R., Walker J.D., Normandia M.J., Sharron T.R. Penetration mechanics of seg-tel penetrators. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, vol. 20, no. 1-5, pp. 13–26. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)87477-5  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X97874775>
- [13] Westerling L., Lundberg R., Holmberg L., Lundberg V. High velocity penetration of homogeneous, segmented and telescopic projectiles into alumina targets. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, vol. 20, no. 6-10, pp. 817–827. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)87467-2  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X97874672>
- [14] Fedorov S.V. On the penetration depth of a porous striker moving with a hypersonic velocity. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2007, vol. 52, no. 10, pp. 1379–1382.  
DOI: 10.1134/S1063784207100234  
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063784207100234>

[15] Fedorov S.V., Babkin A.V., Veldanov V.A., Gladkov N.A., Ladov. S.V. High-velocity penetration of porous material rods. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2016, no. 5, pp. 18–32 (in Russ.).

DOI: 10.18698/1812-3368-2016-5-18-32

[16] Orlenko L.P., red. Fizika vzryva. V 2-kh t. T. 1 [Explosion physics. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow, Fizmatlit Publ., 832 p.

[17] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Engineering models of high speed penetration into geological shields. *Central European Journal of Engineering*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 1–19.

DOI: 10.2478/s13531-013-0135-4

Available at: <https://link.springer.com/article/10.2478/s13531-013-0135-4>

[18] Veldanov V.A., Fedorov S.V. Soil behavior at the interface with a rigid projectile during penetration. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2005, vol. 46, no. 6, pp. 867–875.

DOI: 10.1007/s10808-005-0146-x

Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10808-005-0146-x>

[19] 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 (84), pp. 53–63 (in Russ.).

[20] Orlenko L.P. red., Fizika vzryva. V 2kh t. T. 2. [Explosion physics. In 2 vols. Vol. 2]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 656 p.

[21] 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.

[22] 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, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2016, no. 4, pp. 40–56 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2017-5-28-40

[23] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I. Study of dynamical mechanical properties of aluminum alloys by method of accelerometry. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2010, no. 2, pp. 37–46.

[24] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I. Computation of nondeformable striker penetration into low-strength obstacles using piezoelectric accelerometry data. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 56, no. 7, pp. 992–1002 (in Russ.).

DOI: 10.18698/0236-3941-2017-5-28-40

Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063784211070231>

**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).

**Fedorova N.A.** — student, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

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

Fedorov S.V., Fedorova N.A. Analysis of Possibility of Increase in Penetration Depth into Metal Targets of Projectiles with Energy Release Filler. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 1, pp. 110–130 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2018-1-110-130



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышла  
в свет монография автора

**С.А. Бекетова**

**«Теория управляемого движения  
гусеничных машин»**

Изложены основные теории движения гусеничных машин. Представлена математическая модель движения, позволяющая исследовать управляемое движение гусеничных машин. Определены граничные условия и общие закономерности управляемого движения гусеничных машин. Приведены теоретические основы выбора параметров элементов трансмиссии. Для научных и инженерно-технических работников, занимающихся исследованием, проектированием и созданием механических систем гусеничных машин, а также для студентов и аспирантов высших технических учебных заведений машиностроительных специальностей.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
+7 (499) 263-60-45  
press@bmstu.ru  
www.baumanpress.ru

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
press@bmstu.ru www.baumanpress.ru

Подписано в печать 30.01.2018  
Формат 70 × 108/16  
Усл.-печ. л. 11,4

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
baumanprint@gmail.com