

## **ЗАДАЧИ ПРОНИКАНИЯ НЕДЕФОРМИРУЕМОГО УДАРНИКА В ПРЕГРАДУ**

### ***Евгений Владимирович Проскуряков***

Новосибирское высшее военное командное училище, 630117, Россия, г. Новосибирск, ул. Иванова, 49, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры, тел. (383)332-50-45, e-mail: saper67@mail.ru

### ***Михаил Васильевич Сорокин***

Новосибирское высшее военное командное училище, 630117, Россия, г. Новосибирск, ул. Иванова, 49, кандидат технических наук, доцент, преподаватель, тел. (383)332-50-45, e-mail: mv\_sorokin@ngs.ru

### ***Александр Иванович Пошехонов***

Новосибирское высшее военное командное училище, 630117, Россия, г. Новосибирск, ул. Иванова, 49, курсант 4-го курса батальона (войсковой разведки) тел. (999)468-72-42

В данной работе представлены инженерные модели проникания недеформируемых ударников в преграды: дерево, грунт, бетон, сталь, воду. В качестве недеформируемых ударников использованы: пуля винтовки снайперской специальной ВСС, бетонобойный артиллерийский снаряд калибром 152 мм, боевая часть бетонобойного неуправляемого авиационного реактивного снаряда С-8БМ калибром 80 мм, бронебойный снаряд калибром 30 мм, пуля автомата подводного специального АПС калибром 5,66 мм, пуля автомата двухсредного специального АДС калибром 5,45 мм.

Предполагается, что силу сопротивления среды можно представить в виде суммы трех сил: силы динамического сопротивления, пропорциональной квадрату скорости проникания, силы вязкости среды, пропорциональной скорости проникания и силы статического сопротивления среды, которая не зависит от скорости проникания.

Выполнены расчеты проникания типовых ударников, которые удовлетворительно согласуются с эмпирическими формулами. Перечисленные модели необходимы для решения военно-прикладных задач проникания боеприпасов в различные преграды.

**Ключевые слова:** проникание, преграда, пуля, артиллерийский снаряд, реактивный снаряд, бронебойный снаряд, бетонобойный снаряд.

## **PROBLEMS OF PENETRATION OF AN UNDEFORMABLE DRUMMER INTO AN OBSTACLE**

### ***Evgeny V. Proskuryakov***

The Novosibirsk Higher Military Command School, 49, Ivanova St., Novosibirsk, 630117, Russia, Ph. D., Associate Professor, Professor of Department, phone: (383)332-50-45, e-mail: saper67@mail.ru

### ***Mikhail V. Sorokin***

The Novosibirsk Higher Military Command School, 49, Ivanova St., Novosibirsk, 630117, Russia, Ph. D., Associate Professor, Lecturer, phone: (383)332-50-45, e-mail: mv\_sorokin@ngs.ru

### ***Aleksandr I. Poshekhonov***

The Novosibirsk Higher Military Command School, 49, Ivanova St., Novosibirsk, 630117, Russia, Cadet 4 Course Battalion of the Army Intelligence, phone: (999)468-72-42

This paper presents engineering models for the penetration of undeformable drummers into obstacles: wood, concrete, steel and water. As undeformable drummers used: special sniper rifle bullet VSS, concrete artillery shell caliber of 152 mm, the warhead of a concrete-piercing unguided aviation missile S-8BM caliber of 80 mm, armor-piercing shell of 30 mm caliber, bullet of a submarine special APS submachine gun with a caliber of 5,66 mm, bullet of submachine gun special two-mediums ADS with a caliber of 5,45 mm.

It is assumed that the resistance force of medium can be represented as the sum of three forces: dynamic drag forces proportional to the square of penetration rate, the velocity of the medium in proportion to the penetration rate and the strength of the static resistance of the medium, which is independent of the penetration rate.

Penetration calculations of typical drummers were performed that are in satisfactory agreement with empirical formulas. The listed models are necessary for solving military-applied tasks of penetrating ammunition into obstacles.

**Key words:** penetration, obstacle, bullet, artillery shell, aviation missile, armor-piercing shell, concrete projectile.

### *Введение*

При проникании ударника в сплошную среду его движение описывается законом Ньютона:  $m \cdot dV/dt = -F$ , где  $m$  – масса ударника,  $V$  – его скорость,  $t$  – время,  $F$  – сила сопротивления среды. Начальные данные для решения дифференциального уравнения: при  $t = 0$ ,  $x = 0$ ,  $dx/dt = V_0$ .

Здесь  $x$  – перемещение ударника,  $V_0$  – начальная скорость ударника.

Предполагается, что  $F$  можно представить в виде суммы трех сил:

$$F = S \cdot (A \cdot V^2 + B \cdot V + C),$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения ударника,  $F_1 = S \cdot A \cdot V^2$  – сила динамического сопротивления, пропорциональная квадрату скорости проникания  $V$ ;

$F_2 = S \cdot B \cdot V$  – сила вязкости среды, пропорциональная скорости проникания;

$F_3 = S \cdot C$  – сила статического сопротивления среды, которая не зависит от скорости проникания.

Эта зависимость была предложена Покровским [2-3] для описания следующих преград: грунт ( $A = 0$ ,  $C = 0$ ,  $B \neq 0$ ), бетон ( $B = 0$ ,  $A \neq 0$ ,  $C \neq 0$ ), сталь ( $A = 0$ ,  $B = 0$ ,  $C \neq 0$ ), вода и воздух ( $B = 0$ ,  $C = 0$ ,  $A \neq 0$ ) и др. При этом свойства материалов существенно зависят от скорости проникания  $V$ .

### *Методы и материалы*

Рассмотрим следующие задачи [3].

*Задача 1.* Пуля калибром  $d = 9$  мм и массой  $m = 16$  г (винтовка ВСС) подлетает к преграде со скоростью  $V_0 = 110$  м/с [1-3, 7, 9-10, 12, 15, 18, 19-20].

Сила статического сопротивления преграды

$$F = S \cdot \sigma \tag{1.1}$$

где  $S = \pi \cdot d^2/4$ ,  $\sigma = 6 \text{ кг/мм}^2 = 60 \text{ МПа}$  (дерево).  
Найти глубину  $h$  проникания пули в преграду.

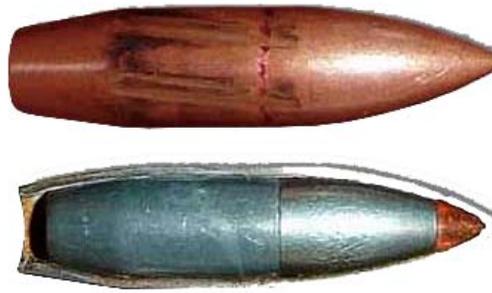


Рис. 1. Пуля винтовки ВСС

*Решение.* Ускорение пули:

$$a = F / m \quad (1.2)$$

$$a = \pi \cdot d^2 \cdot \sigma / (4 \cdot m) \quad (1.3)$$

$a = 250 \cdot 10^3 \text{ м/с}^2$  (25 тыс. g).

Пуля движется в преграде равнозамедленно. Из кинематики равнозамедленного движения:  $h = V_0^2 / (2 \cdot a)$ ;  $h = 24 \text{ мм}$ .

Деревянная доска толщиной 1 дюйм (около 25 мм) используется для оценки действия поражающего элемента (пули) по живой силе (ЖС) в качестве эквивалента.

*Задача 2.* Пуля массой  $m = 16 \text{ г}$  и калибром  $d = 9 \text{ мм}$  вылетает из винтовки ВСС с начальной скоростью  $V_0 = 280 \text{ м/с}$  [1-3, 7, 9-10, 12, 15, 18, 19-20].

Для поражения живой силы (ЖС) противника необходима кинетическая энергия пули  $E = 100 \text{ дж}$ . Плотность воздуха  $\rho_B = 1,2 \text{ кг/м}^3$ , баллистический коэффициент пули  $C_x = 1$ .

Найти предельное расстояние  $l_n$  (интервал) поражения ЖС (убойный интервал пули). Результаты расчета сравнить с тактико-техническими характеристиками (ТТХ) винтовки  $l_n = 400 \text{ м}$ .

*Решение.* Запишем уравнение движения пули и проинтегрируем его:

$$m \cdot \frac{dV}{dt} = -C_x \cdot S \cdot \frac{\rho_B \cdot V^2}{2}; \quad \frac{dV}{V} = -\frac{1}{2 \cdot m} \cdot C_x \cdot \rho_B \cdot S \cdot dx;$$

$$m \cdot \frac{dV}{dx} = -\frac{1}{2} \cdot C_x \cdot S \cdot \rho_B \cdot V; \quad \frac{dV}{V} = -\frac{1}{2 \cdot m} \cdot C_x \cdot \rho_B \cdot S \cdot dx;$$

$$\int_{V_0}^{V_n} \frac{dV}{V} = \frac{1}{2 \cdot m} \cdot S \cdot \rho_B \cdot \int_0^{l_n} dx;$$

$$l_n = \frac{2 \cdot m}{C_x \cdot S \cdot \rho_B} \cdot \ln \frac{V_0}{V_n}, \text{ где } S = \pi \cdot D^2 / 4.$$

Пусть  $C_x = 1$ ;  $\rho_B = 1,2 \text{ кг/м}^3$ ,  $S = 0,71 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ;  $V_0 = 280 \text{ м/с}$ ;  $V_n = 110 \text{ м/с}$ . Тогда  $l_n = 419 \text{ м}$ . Результаты расчетов согласуются с данными ТТХ.

**Задача 3.** Бетонобойный артиллерийский снаряд калибром  $D = 152 \text{ мм}$  имеет массу  $m = 40 \text{ кг}$  и скорость у преграды  $V_0 = 400 \text{ м/с}$  [1-3, 5, 16].

Найти глубину проникания  $h_n$  снаряда дальнобойной формы в грунт (песок). Сила сопротивления преграды:  $F = D^2 \cdot V_0 / k$ . Для песка  $k_n = 5,9 \cdot 10^{-6}$  (снаряд дальнобойной формы, все параметры в системе СИ).



Рис. 2. Бетонобойный артиллерийский снаряд калибром 152 мм

**Решение.** Уравнение движения снаряда в преграде:

$$m \cdot dV/dt = -F; \quad m \cdot dV/dt = -D^2 \cdot V / k; \quad m \cdot dV = -D^2 \cdot V \cdot dt / k; \quad V \cdot dt = dx, \\ m \cdot dV = -D^2 \cdot dx / k.$$

После интегрирования получим:  $h = k \cdot m \cdot V_0 / D^2$  (эмпирическая Березанская формула).

Глубина проникания в грунт (песок):  $h_n = 4,2 \text{ м}$ .

**Задача 4.** Боевая часть (БЧ) бетонобойного неуправляемого авиационного реактивного снаряда (НАР С-8БМ) калибром  $D = 80 \text{ мм}$  имеет массу  $m = 7,4 \text{ кг}$  и начальную скорость  $V_0 = 450 \text{ м/с}$  [1-3, 7, 9-10, 12, 15, 18, 19-20].

Сила сопротивления преграды:  $F = \pi \cdot D^2 / 4 \cdot (H_0 + k \cdot \rho_n \cdot V^2)$ .

Динамическая твердость бетона  $H_0 = 8 \cdot 10^7 \text{ Па}$ ; плотность бетона  $\rho_n = 2000 \text{ кг/м}^3$ ; коэффициент формы снаряда  $k = 0,5$ .

Найти глубину  $h_B$  проникания снаряда в бетон.



Рис. 3. НАР С-8БМ

*Решение.* Обозначим:  $C = H_0$ ;  $A = k \cdot \rho_n$ . Тогда:  $F = \pi \cdot D^2 / 4 \cdot (A \cdot V^2 + C)$ .

Рассмотрим дифференциальное уравнение движения снаряда в бетоне:  $m \cdot dV/dt = -\pi \cdot D^2 / 4 \cdot (A \cdot V^2 + C)$ . В уравнении (1) произведем замену переменной  $t$  на переменную  $x$ . После интегрирования получим формулу (2) для глубины проникания  $h_B$  (эмпирическая формула Забудского).

Глубина проникания в бетон:  $h = 0,9$  м.

$$\frac{dV}{V^2 + C/A} = -\frac{\pi D^2 A}{4m} dt; \quad \frac{2VdV}{V^2 + C/A} = -\frac{\pi D^2 A}{2m} dx \quad (4.1)$$

$$\int_{V_0}^0 \frac{2VdV}{V^2 + C/A} = -\frac{\pi D^2 A}{2m} \int_0^h dx \quad (4.2)$$

$$\ln(C/A) - \ln(V_0^2 + C/A) = -\frac{\pi D^2 A}{2m} h \quad (4.3)$$

$$h = \frac{2m}{\pi A D^2} \ln(1 + V_0^2 A/C); \quad h = \frac{2m}{\pi D^2 k \rho_n} \ln(1 + k \rho_n V_0^2 / H_0) \quad (4.4)$$

**Задача 5.** Бетонобойный артиллерийский снаряд калибром  $D = 152$  мм имеет массу  $m = 40$  кг и скорость у преграды  $V_0 = 400$  м/с [4, 6, 8, 11, 13-14, 17]. Сила сопротивления преграды:  $F = \pi \cdot D^2/4 \cdot (H_0 + k \cdot \rho_n \cdot V^2)$ . Динамическая твердость бетона  $H_0 = 8 \cdot 10^7$  Па; плотность бетона  $\rho_n = 2000$  кг/м<sup>3</sup>; коэффициент формы снаряда  $k = 0,5$ .

Найти глубину  $h_B$  проникания снаряда в бетон.

*Решение* аналогично задаче 3. По формуле (2):  $h = 1,2$  м.

**Задача 6.** Имеется бронебойный снаряд [3] калибром  $D = 30$  мм и массой  $m = 0,4$  кг [4, 6, 8, 11, 13-14, 17].

Найти скорость снаряда  $V_0$  для пробития стальной преграды толщиной  $h = 40$  мм. Сила сопротивления стальной преграды:  $F = S \cdot C_1 \cdot (h/D)^{0,5}$ , где  $S = \pi \cdot D^2/4$ ,  $C_1 = 16 \cdot 10^8$  (в системе СИ).



Рис. 4. Бронебойный снаряд калибром 30 мм (вверху) и его бронебойный сердечник (внизу)

*Решение.* Уравнение движения снаряда в преграде:

$$m \cdot dV/dt = -F; \quad m \cdot dV/dt = -C_1 \cdot (h/D)^{0,5} \cdot \pi \cdot D^2/4;$$

$$m \cdot dV = -C_1 \cdot (h/D)^{0,5} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot dt/4.$$

Умножим обе части уравнения на  $V$ :

$$m \cdot V \cdot dV = -C_1 \cdot (h/D)^{0,5} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot V \cdot dt/4; \quad \text{с учетом: } V \cdot dt = dx, \text{ получим:}$$

$$m \cdot V \cdot dV = -C_1 \cdot (h/D)^{0,5} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot dx/4. \quad \text{Проинтегрируем это уравнение}$$

и получим формулу (эмпирическая формула Жакоб де Марра):

$$V_0 = \left( \frac{\pi \times C_1}{2} \right)^{0,5} \frac{D^{0,75} \times h^{0,5}}{m^{0,5}} = 770 \text{ м/с}.$$

*Задача 7.* Пуля для подводной стрельбы из автомата АПС калибром  $D = 5,66$  мм имеет массу  $M_0 = 20$  г. На глубине  $h = 5$  м начальная скорость пули равна  $V_0 = 245$  м/с, интервал поражения пули составляет  $l_5 = 30$  м. Плотность воды  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>. Критерий поражения ЖС считать в виде энергии поражения  $E_n = 100$  дж.

Определить интервал поражения пули  $l_{20}$  на глубине  $h = 20$  м и сравнить с экспериментом ( $l_{20} = 20$  м).



Рис. 5. Патрон автомата АПС

*Решение.* Скорость поражения пули рассчитывается по формуле  $V_n = (2 \cdot E_n/m)^{0,5}$  и составляет  $V_n = 112$  м/с [1-3, 7, 9-10, 12, 15, 18, 19-20]. Рассмотрим дифференциальное уравнение (1) движения пули в воде на глубине 5 метров, гидростатическим давлением можно пренебречь.

$$M_0 \times \frac{dV}{dt} = -k \times S \times \frac{\rho_{\beta} \times V^2}{2} \quad (7.1)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dx} \times \frac{dx}{dt} = \frac{dV}{dx} \times V \quad (7.2)$$

$$M_0 \times \frac{dV}{dx} = -\frac{1}{2} \times k \times S \times \rho_{\beta} \times V \quad (7.3)$$

$$\int_{V_0}^{V_n} \frac{dV}{V} = \frac{k}{2 \times M_0} \times S \times \rho_{\beta} \times \int_0^{l_n} dx \quad (7.4)$$

$$\ln V_n - \ln V_0 = \frac{k \times S \times \rho_{\beta} \times l_n}{2 \times M_0} \quad (7.5)$$

$$l_n = \frac{8 \times M_0}{k \times \pi \times D^2 \times p_\beta} \times \ln \frac{V_0}{V_n} \quad (7.6)$$

$$k = \frac{8 \times M_0 \times \ln(V_0/V_n)}{l_n \times \pi \times D^2 \times p_\beta} \quad (7.7)$$

Произведем замену переменной  $t$  на переменную  $x$  в уравнении (2). После интегрирования получим формулу для убойного интервала пули  $l_n$ , позволяющую определить по формуле (3) коэффициент лобового сопротивления воды  $k = 0,04$ .

Рассмотрим движение пули на глубине 20 м. Сила сопротивления воды:  $F = \pi \cdot D^2/4 \cdot (P + k \cdot \rho_B \cdot V^2/2)$ , здесь  $P$  – статическая составляющая силы сопротивления. Обозначим:  $A = k \cdot \rho_B/2$ . Тогда:  $F = \pi \cdot D^2/4 \cdot (A \cdot V^2 + P)$ . Дифференциальное уравнение движения пули в воде на большой глубине имеет вид:

$$M_0 \frac{dV}{dt} = -\frac{\pi \times D^2}{4} (A \times V^2 + P) \quad (7.8)$$

$$\frac{dV}{V^2 + P/A} = -\frac{\pi \times D^2 \times A}{4 \times M_0} dt \quad (7.9)$$

$$\frac{2 \times V \times dV}{V^2 + P/A} = -\frac{\pi \times D^2 \times A}{2 \times M_0} dx \quad (7.10)$$

$$\int_{V_0}^{V_\Pi} \frac{2 \times V \times dV}{V^2 + P/A} = -\frac{\pi \times D^2 \times A}{2 \times M_0} \int_0^{l_\Pi} dx \quad (7.11)$$

$$\ln(V_\Pi^2 + P/A) - \ln(V_0^2 + P/A) = -\frac{\pi \times D^2 \times A}{2 \times M_0} l_\Pi \quad (7.12)$$

Если  $P/(AV_\Pi^2) \approx 0$ , то

$$\ln \frac{V_0^2 \left[ 1 + P/(AV_0^2) \right]}{V_\Pi^2 \left[ 1 + P/(AV_\Pi^2) \right]} \approx \ln \frac{V_0^2}{V_\Pi^2} = 2 \ln \frac{V_0}{V_\Pi} \quad (7.13)$$

$$l_\Pi \approx \frac{2 \times M_0}{\pi \times A \times D^2} 2 \ln \frac{V_0}{V_\Pi} \quad (7.14)$$

$$l_\Pi \approx \frac{8 \times M_0}{\pi \times k \times p_\beta \times D^2} \times \ln \frac{V_0}{V_\Pi} \quad (7.15)$$

При малых значениях  $P$  формула (6) переходит в (3). Пусть  $h = 20$  м, тогда  $P = \rho \cdot g \cdot h = 2 \cdot 10^5$  Па,  $l_\Pi \approx 19$  м.

*Задача 8.* Пуля для подводной стрельбы из автомата АДС калибром  $D = 5,45$  мм имеет массу  $M_0 = 16$  г. На глубине 5 м начальная скорость пули равна  $V_0 = 333$  м/с, убойный интервал пули составляет  $l_5 = 25$  м. Плотность воды  $\rho_B = 1000$  кг/м<sup>3</sup>. Критерий поражения ЖС считать в виде убойной энергии поражения  $E_n = 100$  дж.

Определить убойный интервал пули  $l_{20}$  на глубине 20 м.

$$M_0 \times \frac{dV}{dt} = -k \times S \times \frac{\rho_B \times V^2}{2} \quad (8.1)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dx} \times \frac{dx}{dt} = \frac{dV}{dx} \times V \quad (8.2)$$

$$M_0 \times \frac{dV}{dx} = -\frac{1}{2} \times k \times S \times \rho_B \times V \quad (8.3)$$

$$\int_{V_0}^{V_n} \frac{dV}{V} = \frac{k \times S \times \rho_B}{2 \times M_0} \times \int_0^{l_n} dx \quad (8.4)$$

$$\ln V_n - \ln V_0 = \frac{k \times S \times \rho_B \times l_n}{2 \times M_0} \quad (8.5)$$

$$l_n = \frac{2 \times M_0}{k \times S \times \rho_B} \times \ln \frac{V_0}{V_n} \quad (8.6)$$

$$k = \frac{2 \times M_0 \times \ln(V_0/V_n)}{l_n \times S \times \rho_B} \quad (8.7)$$



Рис. 6. Патрон автомата АДС

*Решение.* Убойная скорость поражения пули рассчитывается по формуле  $V_n = (2 \cdot E_y/m)^{0,5}$  и составляет  $V_n = 112$  м/с [1-3, 7, 9-10, 12, 15, 18, 19-20].

Рассмотрим дифференциальное уравнение (1) движения пули в воде на глубине 5 метров, гидростатическим давлением можно пренебречь. Произведем замену переменной  $t$  на переменную  $x$  в уравнении (2). После интегрирования получим формулу для убойного интервала пули  $l_n$ , позволяющую определить по формуле (3) неизвестное  $k = 0,05$ .

Рассмотрим движение пули на глубине 20 м. Сила сопротивления воды:  $F = \pi \cdot D^2/4 \cdot (P + k \cdot \rho_B \cdot V^2/2)$ , здесь  $P$  – статическая составляющая силы сопро-

тивления. Обозначим:  $A = k \cdot \rho_B / 2$ . Тогда:  $F = \pi \cdot D^2 / 4 \cdot (A \cdot V^2 + P)$ . Дифференциальное уравнение движения пули в воде на большой глубине имеет вид:

$$\frac{dV}{V^2 + C/A} = -\frac{\pi D^2 A}{4m} dt \quad (8.8)$$

$$\frac{2VdV}{V^2 + C/A} = -\frac{\pi D^2 A}{2m} dx \quad (8.9)$$

$$\int_{V_0}^{V_y} \frac{2VdV}{V^2 + C/A} = -\frac{\pi D^2 A}{2m} \int_0^{l_y} dx \quad (8.10)$$

$$\ln(V_y + C/A) - \ln(V_0^2 + C/A) = -\frac{\pi D^2 A}{2m} l_y \quad (8.11)$$

$$l_y = \frac{2m}{\pi A D^2} \ln \frac{V_0^2 + C/A}{V_y^2 + C/A} \quad (8.12)$$

$$\ln_y = \frac{2m}{\pi A D^2} \ln \frac{AV_0^2/C + 1}{AV_y^2/C + 1} \quad (8.13)$$

Пусть  $h = 20$  м, тогда  $P = \rho \cdot g \cdot h = 2 \cdot 10^5$  Па,  $l_{II} \approx 18$  м.

### Результаты

Результаты расчетов задач № 6, 7 приведены в таблице. В последней строке таблицы приводятся тактико-технические характеристики (ТТХ) автоматов. Расчетные данные согласуются с экспериментом.

Таблица 1

Согласование расчетных данных с характеристиками

Характеристики пули	Автомат	
	АПС	АДС
Калибр $D$ , мм	5,66	5,45
Масса $m$ , г	20	16
Скорость $V_0$ , м/с	245	333
Интервал $l_5$ , м	30	25
Коэффициент $k$	0,04	0,05
$l_{20}$ , (расчет)	19	20
$l_{20}$ , (ТТХ)	18	18

## Заключение

Представлены инженерные модели проникания недеформируемых ударников в преграды: дерево, грунт, бетон, сталь, воду. Выполнены расчеты проникания типовых ударников, которые удовлетворительно согласуются с эмпирическими формулами. Перечисленные модели необходимы для решения военно-прикладных задач проникания боеприпасов в различные преграды.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеевский В.П. К вопросу о проникании стержня в преграду с большой скоростью // Физика горения и взрыва. 1966. № 2.
2. Бабкин А.В. Средства поражения и боеприпасы: Учеб. / А.В. Бабкин, В.А. Велданов, Е.Ф. Грязнов и др.; Под общ. ред. В. В. Селиванова. – М.: Моск. гос. техн. ун-т, 2008.
3. Балаганский И.А., Мержиевский Л.А. Действие средств поражения и боеприпасов: Учебник. – Новосибирск Изд-во НГТУ. – 2004.
4. Брилев О. Танк на пороге XXI века (технический облик) // Военный парад. 1997. № 4 (22).
5. Водопьянов М.Я. Теория и расчет артиллерийских снарядов: Лабораторный практикум. – СПб.: БГТУ, 2002.
6. Воротилин М.С., Князева Л.Н., Чуков А.Н., Шмарakov Л.Н. Современные средства поражения бронетанковой техники: учеб. пособие. Тула: ТулГУ, 2005.
7. Высокоскоростные ударные явления. – М.: Мир, 1973.
8. Григорян В.А., Белобородько А.Н., Терехин И.И. и др. Расчет и синтез структур баллистической защиты танков: Учеб. пособие / Под ред. В.А. Григоряна. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
9. Григорян В.А., Белобородько А.Н., Дорохов Н.С. и др. Частные вопросы конечной баллистики / Под. ред. В.А. Григоряна. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
10. Зукас Дж. А., Николас Т., Свифт Х.Ф. и др. Динамика удара: Пер. с англ. М.: Мир, 1985.
11. Курков Б.А., Мураховский В.И., Сафонов Б.С. и др. Основные боевые танки / Под ред. Б.С. Сафонова и В.И. Мураховского. М.: Арсенал-Пресс, 1993.
12. Мержиевский Л.А., Титов В.М. Высокоскоростной удар // Физика горения и взрыва. 1987. № 5.
13. Носков Б.И. Малокалиберные выстрелы к автоматическим пушкам: учеб. пособие. М.: Изд-во «Вооружение. Политика. Конверсия», 1998.
14. Одинцов В. Танковое вооружение на пороге XXI века // Техника и вооружение. 1999. № 10.
15. Оружие и технологии России. Энциклопедия XXI век. Научно-техническое издание. Т. XII: Боеприпасы и средства поражения. М., 2006.
16. Прохоров Б.А. Боеприпасы артиллерии. М.: Машиностроение, 1973.
17. Растопшин М. Броня выигрывает соревнование. Концепция создания бронебойных подкалиберных снарядов нуждается в корректировке // Независимое военное обозрение. 2000. № 36.
18. Сагомоян А.Я. Проникание. М.: МГУ, 1974.
19. Физика быстропротекающих процессов. Т. 2 / Пер. с англ. Н.А. Златина. М.: Мир, 1971.
20. Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А. и др. Высокоскоростное взаимодействие тел. Новосибирск: Изд. СО РАН, 1999.

© Е. В. Проскуряков, М. В. Сорокин, А. И. Пошехонов, 2019