

УДК 539.3

ОЦЕНКА СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОНИКАНИЮ ОБЫЧНЫХ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ В КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ И В ГРУНТЫ

Доктор техн. наук *В.А. Седнев*, кандидат техн. наук *С.Л. Копнышев*
ФГБОУ ВО «Академия государственной противопожарной
службы МЧС России»

Предложен научно-методический подход определения силы сопротивления прониканию обычных средств поражения с произвольной выпуклой формой головной части в конструкционные материалы и грунты. В основу его положены полученные ранее авторами соотношения для определения давления на контактной поверхности расширяющейся в среде сферической полости за счет внутреннего давления.

Ключевые слова: объект инфраструктуры, обычные средства поражения, критический элемент, проникание, физическая стойкость, устойчивость функционирования.

EVALUATION OF THE RESISTANCE FORCE TO PENETRATION OF CONVENTIONAL DEFEAT MEANS TO STRUCTURAL MATERIALS OF INFRASTRUCTURES AND GROUNDS

Doctor (Tech.) *V.A. Sednev*, Ph.D (Tech.) *S.L. Kopynshev*
Federal state budgetary educational institution of higher education
«Academy of the state fire-fighting service of EMERCOM of Russia»

The article proposes a scientific and methodological approach for determining the resistance to penetration of conventional defeat means with an arbitrary convex shape of the head into structural materials and soils. It is based on the relations obtained earlier by the authors for determining the pressure on the contact surface of the spherical cavity expanding in the medium due to internal pressure.

Keywords: infrastructure object, conventional means of destruction, critical element, penetration, physical stability, stability of operation.

Анализ тенденций развития вооруженной борьбы [1-3] позволяет утверждать, что вероятность крупномасштабной войны с участием России в последние десятилетия снизилась. Вместе с тем, существуют определенные очаги напряженности, в том числе и в непосредственной близости от границ России, которые могут перерасти в военные конфликты различной интенсивности. Основные угрозы военной безопасности РФ могут быть связаны с вероятностью возникновения военных конфликтов на Юго-Западном и Центральном-Азиатском стратегических направлениях.

Вероятной конфликтной основой для военного противоборства с НАТО может явиться столкновение интересов Российской Федерации и Североатлантического блока в странах ближнего зарубежья.

При существующих концепциях ведения боевых действий, когда стирается грань между войной и миром, а вооруженная борьба ведется без объявления государствами со-

стояния войны, до начала активной фазы вооруженного противостояния следует ожидать воздействия противника на объекты инфраструктуры, существенно необходимые для устойчивого функционирования экономики и выживания населения в военное время [1-3].

Большинство крупных промышленных объектов страны размещено в густонаселенных районах, в непосредственной близости от крупных городов и населенных пунктов и функционируют в составе межотраслевых и территориально-производственных комплексов, нарушение нормальной работы которых может повлечь за собой значительные человеческие жертвы, ущерб окружающей природной среде, потерю управления, разрушение инфраструктуры, негативное изменение или разрушение экономики административно-территориальной единицы, субъекта Российской Федерации или страны в целом на длительный срок.

В военное время риски возникновения чрезвычайных ситуаций на таких объектах существенно повышаются, так как воздействие по ним становится целенаправленным, осуществляется современными средствами поражения, а их выбор в качестве целей нападения в значительной степени определяется тяжестью возможных последствий и возможностью психологического воздействия на население. Поражение промышленных объектов может достигаться воздействием как обычного, так и высокоточного оружия, а до начала активной фазы вооруженного противостояния - организацией диверсионно-террористических действий с привлечением сил специальных войск.

В таких условиях традиционные методы обеспечения безопасности объектов инфраструктуры не смогут предотвратить катастрофу. Поэтому наряду с обеспечением выполнения общепринятых требований, отраженных в технических стандартах и правилах, возникает необходимость оценки физической стойкости критических элементов и повышения защищенности указанных объектов от диверсионных и террористических воздействий.

Устойчивость функционирования объектов экономики в военное время может быть достигнута комплексом мер по их защите, увеличением физической стойкости их критических элементов к внешним динамическим нагрузкам, в основу разработки которого должно быть положено математическое моделирование динамического ударно-пробивного воздействия средств поражения.

В настоящее время теоретические исследования процессов проникания средств поражения в различные материалы и грунты основаны на расчете величины силы сопротивления поражаемому элементу со стороны среды.

Задачи о проникании в точной постановке являются достаточно сложными, для получения их решения требуются современные вычислительные средства, а также детальный анализ используемых вычислительных схем. Поэтому наряду с точными решениями задач о проникании целесообразно находить решения, позволяющие достаточно легко и быстро получать приближенные оценки искомых величин [4-6]. Используемые при этом методы ориентированы на установление функциональной зависимости между силой сопротивления проникающему телу со стороны преграды и его характеристиками, а также физико-механическими характеристиками среды и начальными условиями проникания.

Одним из широко используемых допущений для поражающих элементов (ПЭ) средств поражения с выпуклой головной частью является гипотеза локального взаимодействия [4, 7, 8], согласно которой каждая элементарная площадка поверхности ПЭ взаимодействует с преградой независимо от других элементарных площадок, а нормальное напряжение на поверхности ее контакта с преградой определяется ее ориентацией относительно направления скорости проникания. Существенное различие прочностей ПЭ и преграды, как правило, позволяет не учитывать деформацию ПЭ, считая его абсолютно жестким.

Рассмотрим задачу определения силы сопротивления со стороны преграды проникающему ПЭ с произвольным выпуклым очертанием головной части радиуса R , представляющей собой произвольное тело вращения. Будем считать, что форма головной части задается вращением вокруг оси OY некоторой дифференцируемой выпуклой вниз кривой, определенной в правом нижнем квадранте декартовой системы координат и задаваемой уравнением $y = f(x)$ такой, что ее вторая производная $f''(x) \geq 0$ при $x > 0$ (рис. 1).

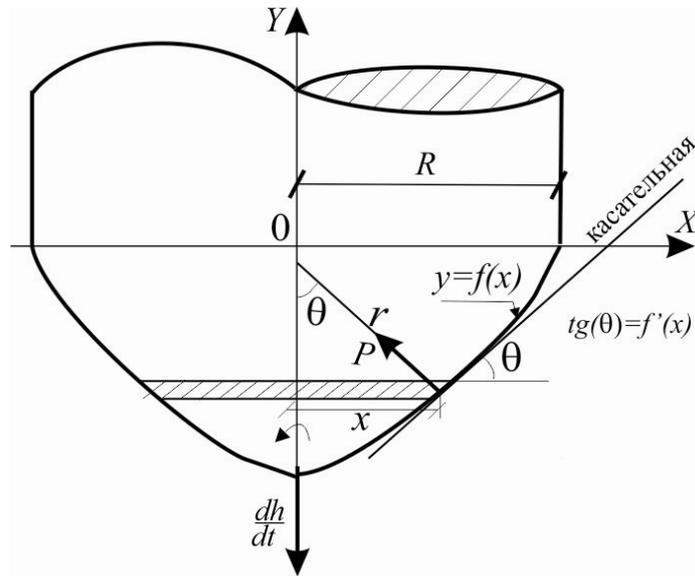


Рис. 1. Поражающий элемент с выпуклой формой головной части

При этом ПЭ считается абсолютно жестким телом, и делается допущение о том, что его кинетическая энергия расходуется только на деформацию среды и сообщение скорости движения частицам среды, т. е. на преодоление сил сопротивления среды.

Гипотеза локального взаимодействия выпуклой головной части ПЭ со средой позволяет считать, что каждая элементарная площадка на поверхности вращения при проникании будет испытывать такое же противодействие, как соответствующая площадка расширяющейся сферической полости в этой среде с некоторым радиусом r , определяемым углом наклона θ этой площадки относительно направления скорости ее движения.

Обозначим расстояние от оси ПЭ до элементарной площадки головной части через x , тогда величина радиуса r условной расширяющейся сферической полости может быть определена по зависимости

$$r = \frac{x}{\sin \theta},$$

и, учитывая соотношение $\sin \theta = \frac{\operatorname{tg} \theta}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta}}$, корректное при $0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}$, запишем

$$r = \frac{x \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta}}{\operatorname{tg} \theta}. \quad (1)$$

Величина $tg\theta$ характеризует угол наклона касательной к графику функции $y = f(x)$ и может быть определена как производная этой функции

$$tg\theta = f'(x). \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим окончательную зависимость между r и $f(x)$

$$r = \frac{x\sqrt{1+f'^2(x)}}{f'(x)}. \quad (3)$$

Тогда величину нормального давления, действующего на выделенную площадку, можно [9] определить по зависимости

$$P_n = A + Br \frac{d^2h}{dt^2} \cdot \cos\theta + C \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \cdot \cos^2\theta, \quad (4)$$

а величину противодействия P в направлении оси ОУ – выражением

$$P = A \cdot \cos\theta + Br \frac{d^2h}{dt^2} \cdot \cos^2\theta + C \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \cdot \cos^3\theta, \quad (5)$$

где A , B и C – коэффициенты, являющиеся функциями пяти характеристик материала преграды $\rho_0, \rho, E_0, E, \sigma_s$, определяемые на этапе пластического деформирования материала преграды при $\frac{dh}{dt} > \sqrt{\frac{E_0}{\rho_0}} \cdot \sqrt[3]{\beta}$ по зависимостям

$$A = -\frac{2}{3}\sigma_s \ln\beta + \frac{4E}{9} \left[\frac{\pi^2}{6} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \beta^n \right]; \quad B = \rho \left(1 - \beta^{1/3}\right); \quad C = \rho \left[\frac{3}{2} - \frac{\beta^{4/3}}{2} - \beta^{1/3} \right]; \quad (6)$$

а на этапе распространения упругой волны при $\frac{dh}{dt} \leq \sqrt{\frac{E_0}{\rho_0}} \cdot \sqrt[3]{\beta}$ по зависимостям

$$A = \frac{2}{3}\sigma_s (1 - \ln\beta) + \frac{4E}{9} \left[\frac{\pi^2}{6} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \beta^n \right]; \quad B = \rho \left(1 - \beta^{1/3}\right); \quad C = \rho \left\{ \frac{3}{2} - 2\beta^{1/3} + \frac{\beta^{4/3}}{2} \right\}, \quad (7)$$

где ρ_0 и ρ – плотности материала преграды в невозмущенном состоянии и за ударной волной соответственно;

E_0, E – модуль упругости и модуль линейного упрочнения при сжатии материала преграды;

σ_s - предел текучести материала преграды;

$$\beta = \frac{\rho - \rho_0}{\rho};$$

h – глубина внедрения ПЭ в преграду;

$\frac{dh}{dt}$ - скорость внедрения ПЭ в преграду.

Учитывая (1) и замечая, что $\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1+tg^2\theta}} = \frac{1}{\sqrt{1+f'^2(x)}}$, (4) и (5) примут вид функ-

ций от x

$$P_n = A + \frac{Bx}{f'(x)} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} + \frac{C}{(1+f'^2(x))} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2, \quad (8)$$

$$P = \frac{A}{\sqrt{1+f'^2(x)}} + \frac{Bx}{f'(x)\sqrt{1+f'^2(x)}} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} + \frac{C}{(1+f'^2(x))\sqrt{1+f'^2(x)}} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2. \quad (9)$$

Элементарная площадь шарового слоя в этом случае как функция от x может быть записана в виде

$$ds = 2\pi x \sqrt{1+f'^2(x)} \cdot dx, \quad (10)$$

и, следовательно, сила F сопротивления ПЭ в процессе его проникания с учетом трения ПЭ о преграду составит

$$\begin{aligned} F &= 2\pi A \int_0^R x \cdot dx + 2\pi B \frac{d^2h}{dt^2} \int_0^R \frac{x^2}{f'(x)} \cdot dx + 2\pi C \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \int_0^R \frac{x}{(1+f'^2(x))} \cdot dx + \\ &+ 2\pi \mu A \int_0^R x f'(x) dx + 2\pi \mu B \frac{d^2h}{dt^2} \int_0^R x^2 \cdot dx + 2\pi \mu C \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \int_0^R \frac{x \cdot f'(x)}{(1+f'^2(x))} \cdot dx = \quad (11) \\ &= \pi A \left[R^2 + 2\mu \int_0^R x f'(x) dx \right] + 2\pi B \frac{d^2h}{dt^2} \left[\int_0^R \frac{x^2}{f'(x)} \cdot dx + \frac{\mu R^3}{3} \right] + 2\pi C \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \left[\int_0^R \frac{x + \mu x f'(x)}{(1+f'^2(x))} \cdot dx \right], \end{aligned}$$

где μ - коэффициент трения ударника о преграду.

В качестве примера определим силу сопротивления прониканию ПЭ с конусообразным очертанием головной части (рис. 2).

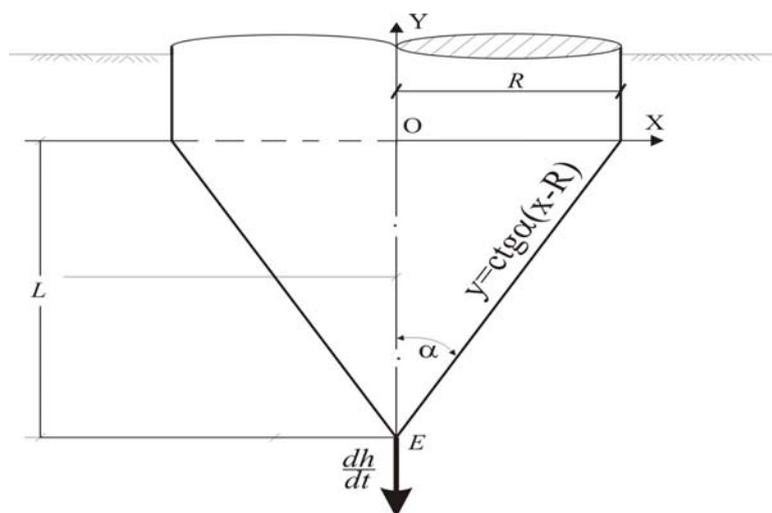


Рис. 2. Поражающий элемент с конусообразной формой головной части

Используя соотношение (11), с учетом уравнения $y = f(x) = \operatorname{ctg}\alpha(x - R)$ отрезка прямой, лежащего в нижнем правом квадранте системы координат и образующего конусообразную форму головной части при вращении вокруг оси OY , получим

$$\begin{aligned}
 F &= \pi A \left[R^2 + 2\mu \cdot \operatorname{ctg}\alpha \int_0^R x dx \right] + 2\pi B \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot \frac{d^2 h}{dt^2} \left[\int_0^R x^2 \cdot dx + \frac{\mu R^3}{3} \right] + \\
 &\quad + 2\pi C \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 (\sin^2 \alpha + \mu \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha) \int_0^R x \cdot dx = \\
 &= \pi A R^2 (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg}\alpha) + \frac{2R^3}{3} \pi B \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot \frac{d^2 h}{dt^2} (1 + \mu) + \pi R^2 C \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 (\sin^2 \alpha + \mu \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha).
 \end{aligned} \tag{12}$$

Таким образом, на закономерности проникания ПЭ в среду наибольшее влияние оказывают масса ПЭ, форма его головной части, скорость встречи с поверхностью преграды и физико-механические свойства материала самой преграды (включая диаграммы сжатия и сдвига), коэффициент трения ПЭ о преграду при проникании. При этом получено обобщенное математическое выражение (11) для оценки силы сопротивления прониканию ПЭ с выпуклой головной частью, представляющей собой тело вращения, в преграду при ударе по нормали к ее поверхности.

Литература

1. Клименко А.А. «Ограниченная война»: концепция современных и будущих военных конфликтов // Современная армия: вооружение, тактика, боевой опыт. - 2012, URL: <http://www.modernarmy.ru/article/175> (дата обращения 04.06.2019).
2. Шушканов В.В. Характер войн и вооруженных конфликтов первой четверти XXI века // «Совершенствование гражданской обороны в Российской Федерации». Материалы VI научно-практической конференции. - М.: МЧС России. - 2009. - с. 30-37.
3. Лебедев В.В. Прогнозные оценки возможных войн и вооруженных конфликтов на период до 2025 г. // «Совершенствование гражданской обороны в Российской Федерации». Материалы VII научно-практической конференции. - М.: МЧС России. - 2010. - с. 30-31.

4. Линник Е.Ю. Моделирование нестационарных процессов удара и проникания тел вращения в мягкие грунтовые среды. Дисс... канд. физ.-матем. наук. - Нижний Новгород: НГУ им. Н. И. Лобачевского. - 2014. – 145 с.
5. Фомин В.М., Гулидов А.И., Садырин А.И. и др. Высокоскоростное взаимодействие тел. - Новосибирск: Изд-во СО РАН. - 1999. - 600 с.
6. Аптуков В.Н., Мурзакаев Р.Т., Фонарев А.В. Прикладная теория проникания. - М.: Наука. - 1992. - 105 с.
7. Котов В.Л., Баландин В.В., Брагов А.М. и др. Применение модели локального взаимодействия для определения силы сопротивления внедрению ударников в песчаный грунт // Прикладная механика и техническая физика, Т. 54, № 4. – М. - 2013. - С. 114 – 125.
8. Сагомоян А.Я. Динамика пробивания преград. – М.: Изд-во МГУ. - 1988. – 221 с.
9. Седнев В.А., Копнышев С.Л. Теоретические основы обоснования требований к физической стойкости гидротехнических сооружений и других объектов энергетики при внешнем динамическом воздействии// Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. - 2018, № 6. - С. 43–62.

Сведения об авторах

Седнев Владимир Анатольевич, профессор, профессор кафедры защиты населения и территорий учебно-научного комплекса гражданской защиты Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Академия государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д.4), 8 (495) 617-26-83, e-mail: sednev70@yandex.ru

Копнышев Сергей Львович, доцент, доцент кафедры защиты населения и территорий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Академия государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4, тел. (495) 617-26-59, (916) 582-83-47, Serkopn@mail.ru.