

УДК 623.454

DOI: 10.22213/2413-1172-2020-1-54-64

Оценка эффективности многофакторного поля поражения с учетом действия зажигательных элементов

В. В. Козлов, доктор технических наук, профессор, Черноморское высшее военно-морское училище имени П. С. Нахимова, Севастополь, Россия

А. В. Васильев, Черноморское высшее военно-морское училище имени П. С. Нахимова, Севастополь, Россия

А. А. Демченко, кандидат технических наук, Черноморское высшее военно-морское училище имени П. С. Нахимова, Севастополь, Россия

А. И. Чуприн, Черноморское высшее военно-морское училище имени П. С. Нахимова, Севастополь, Россия

Проведенный анализ последних военных операций с применением массированного высокоточного оружия в обычном снаряжении (Югославия, Ирак, Ливия, Сирия и др.) подтверждает, что основными береговыми и морскими целями являются объекты ракетных и авиационных комплексов как потенциальные носители ядерного оружия. Спланированное поражение объектов ракетных и авиационных комплексов на земле и на море обеспечивает стратегическое превосходство. Объекты авиационных и мобильных ракетных комплексов относятся к объектам с горюченасыщенными материалами и при известном их местоположении являются весьма уязвимыми целями по отношению к совместному осколочно-огневому воздействию. При этом следует отметить, что для поражения данных целей используется и энергия самих целей, во много крат превосходящая энергию применяемого средства поражения.

Сегодня осколочные и осколочно-фугасные боевые части средств поражения образуют один из самых обширных и развитых классов боеприпасов, предназначенных для поражения практически всех типов целей, однако их применение без использования зажигательных средств поражения не всегда целесообразно и эффективно. В условиях ведения боевых действий основной объем задач по поражению назначенных целей решается с высокой степенью вероятности одновременным применением осколочно-фугасных и зажигательных средств поражения. Известно, что совместное применение боеприпасов разрушительного (фугасного, осколочного и др.) и зажигательного характера эффективно с точки зрения нанесенного ущерба при условии совмещения их зон поражения. В реальных условиях организация такого комбинированного воздействия затруднена из-за значительного индивидуального рассеивания средств поражения с различными поражающими факторами.

Совместное применение средств поражения разрушительно-зажигательного действия в едином боеприпасе значительно повышает их боевую эффективность, и прежде всего по объектам с горюченасыщенными материалами. Создание такого многофакторного оружия – один из безусловных приоритетов госпрограммы вооружения.

Для конструирования такого оружия на начальных этапах необходимо выработать единый научный подход для оценки эффективности многофакторных полей поражения с учетом действия зажигательных элементов, которого на сегодня нет. Представлены теоретические исследования в области оценки эффективности многофакторного оружия.

Ключевые слова: боеприпасы, осколки, многофакторность, топливо, энергия, вероятность, эффективность.

Введение
Изыскание путей, обеспечивающих дальнейшее повышение эффективности средств поражения, возможно как совершенствованием способов применения существующих средств поражения, так и созданием новых средств поражения, обладающих либо усиленным поражающим фактором воздействия на цель, либо комбинацией различных поражающих факторов [1, 2].

Одним из возможных направлений разрешения этой проблемы является применение новых материалов с высокой энергетической плотно-

стью и разработка боеприпасов с совмещенными зонами физически разнородных поражающих факторов, обеспечивающих в совокупности дополнительный ущерб, обусловленный явлением накопления ущерба [3].

С развитием химической и металлургической промышленности в РФ появилась возможность использовать в качестве зажигательных составов составы с новыми свойствами, например, составы на основе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза: $Ni + Al, Ti + C, 3Pb + 5Zr, Ti + B$ [4]. Кроме того, предполагается использовать комбинированные боевые части

с компактными малогабаритными зажигательными элементами, содержащими широко известные термитные составы ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Mg}$, $\text{CuO} + \text{Ti}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}$) в качестве дополнительного снаряжения боеприпасов осколочно-фугасного действия [5].

В США и в нашей стране боеприпасы подобного типа наряду с обычными осколочными поражающими элементами (ОПЭ) имеют зажигательные элементы (ЗЭ) [6–8].

На рис. 1 в качестве примера представлены компактные зажигательные элементы (патент РФ на изобретение RU F42B12/44 № 2332632; авторское свидетельство СССР на изобретение № 325103).

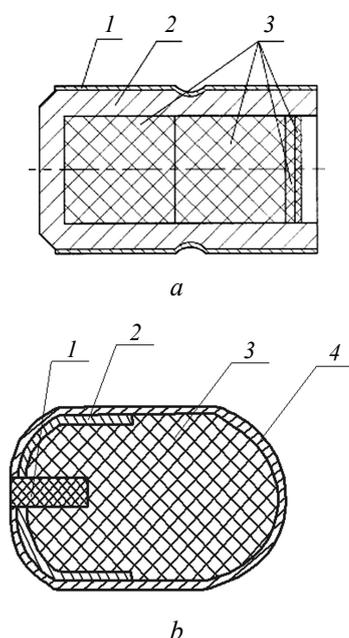


Рис. 1. Зажигательные элементы: *a* – типа стакан: 1 – кожух; 2 – корпус; 3 – зажигательный состав; *b* – типа желудь: 1 – переходной воспламеняющий состав; 2 – внутренняя оболочка; 3 – основной зажигательный состав; 4 – корпус

Fig. 1. Incendiary elements: *a* - type glass: 1 - casing; 2 - housing; 3 - incendiary composition; *b* - type acorn: 1 - transitional igniting composition; 2 - inner shell; 3 - the main incendiary composition; 4 - body

Известные методы по оценке эффективности фугасных, осколочно-фугасных и зажигательных средств поражения, разработанные в разное время В. С. Пугачевым, Е. С. Вентцель, Р. С. Саркисяном, Ю. Г. Мильграмом, Ф. П. Миропольским, обеспечивают единый подход к вычислению обобщенных характеристик поражающего действия. Однако они неприемлемы для оценки эффективности многофакторных средств поражения по целям, имеющим горю-

ченасыщенные материалы, к которым относятся легкоуязвимые объекты поражения.

Это обстоятельство предопределяет актуальность и целесообразность создания средств поражения комбинированного разрушительно-зажигательного действия.

Цель исследования – оценка боевых возможностей совместного осколочно-зажигательного поля поражения как перспективных многофакторных средств поражения.

Используемые подходы и исходные требования

Зажигательное действие ОПЭ – один из существенных факторов поражения легкоуязвимых целей. Особо важную роль зажигательное действие играет при действии осколочных потоков по летательным аппаратам, у которых площадь топливных баков составляет 30...60 % уязвимой площади цели.

Зажигательное действие ОПЭ характеризуется вероятностью воспламенения и последующего горения топлива при попадании в отсек осколка, масса и скорость которого известны.

С физической точки зрения процесс инициирования горения топлива весьма сложен и до настоящего времени не поддается полному теоретическому описанию.

В связи с этим задача оценки инициирующей способности осколков решается в основном экспериментально. Так, с помощью экспериментов показано, что в качестве основного критерия, определяющего зажигательную способность осколка, может быть принят его удельный импульс i [9]:

$$i = \frac{qv}{\bar{s}} = \frac{q^{\frac{1}{3}}v}{\Phi},$$

где q – масса осколка, кг; v – скорость осколка, м/с; \bar{s} – площадь мишени осколочного поля, м^2 ; $\Phi = \frac{\bar{s}}{q^{\frac{2}{3}}}$ – параметр формы осколочного поля, $\text{м}^2/\text{кг}^{2/3}$.

Процесс воспламенения зависит от ряда факторов, одним из которых является наличие экранировки топливных баков. Пробоитие таких экранов стальными ОПЭ сопровождается горением алюминия и образованием заградного потока мелких раскаленных частиц в виде факела, способного воспламенить топливо.

Установлено также, что вероятность воспламенения и горения топлива P_3 для баков современной конструкции зависит от массы осколочного поля q и скорости осколочного поля v и определяется по формуле

$$P_3 = 1 - \exp\left(-\rho \sum_{i=1}^3 S_i\right), \quad (1)$$

где ρ – плотность потока осколочных поражающих элементов, $1/\text{м}^2$; S_i – уязвимая площадь i -й грани отсека.

Уязвимая площадь i -й грани отсека определяется по зависимостям:

$$S_i = \begin{cases} 0 & \text{при } \delta_n > h_{\text{пр}}, \\ (S_r \sin \alpha) p_{3,0} & \end{cases} \quad (2)$$

$$P_b = \begin{cases} 0 & \text{при } \chi < \chi_{\min}, \\ \frac{\chi - \chi_{\min}}{\chi_{\max} - \chi_{\min}} & \text{при } \chi_{\min} \leq \chi < \chi_{\max}, \\ 1 & \text{при } \chi_{\min} \geq \chi_{\max}; \end{cases} \quad (3)$$

$$\chi = \bar{s}^{\frac{1}{2}} V, \quad (4)$$

где S_r – площадь грани отсека; δ_n – средняя толщина обшивки отсека; $h_{\text{пр}}$ – предельная толщина пробития преграды осколком; P_b – вероятность воспламенения топлива одним осколком;

ком; \bar{s} – площадь миделя осколка; V – скорость соударения; χ – параметр осколка.

Необходимые для расчета значения параметров χ_{\min} и χ_{\max} приводятся в таблицах уязвимости отсеков воздушных целей.

На рис. 2 представлены графики, определяющие скорость ОПЭ V в зависимости от его массы q , при которой происходит воспламенение топлива и пробитие отсека с топливом заданной толщины δ_d с соответствующими вероятностями.

Как следует из условия (4), вероятность воспламенения P_b топлива при попадании в отсек с топливом осколка может быть повышена за счет увеличения начальных скоростей разлета осколков V_0 и площади миделя осколка \bar{s} .

Применение же более мощных взрывчатых веществ и увеличение коэффициента наполнения позволяет незначительно повысить начальную скорость V_0 осколка, но вместе с тем это приводит к уменьшению массы осколка и снижению зажигательной способности за счет большего дробления и снижения массы корпуса боеприпаса [10].

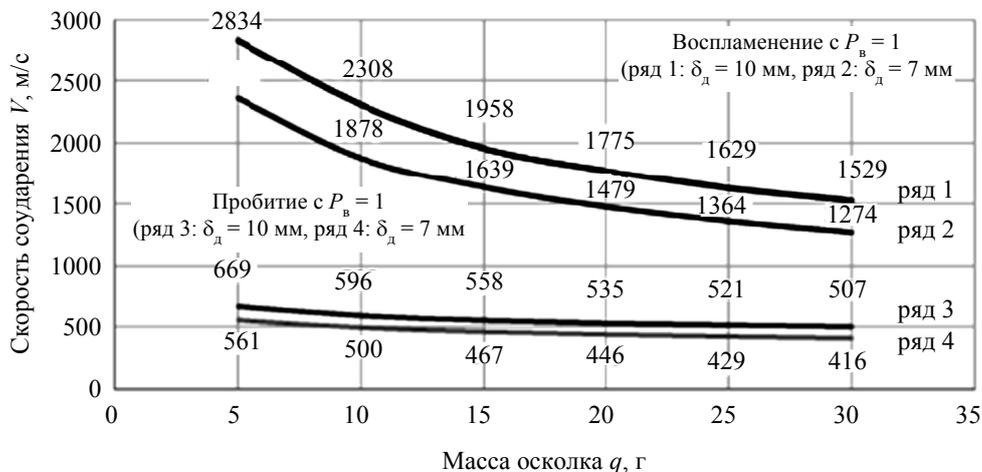


Рис. 2. Скорости, обеспечивающие воспламенение и пробитие для различных масс осколков

Fig. 2. Speeds that provide ignition and penetration for different masses of fragments

Анализ графических зависимостей (см. рис. 2) подтверждает, что для создания зажигательной способности ОПЭ необходимы более значительные скорости соударения по сравнению со скоростями, необходимыми для пробития стенок резервуаров и отсеков.

Для зажигательного элемента вероятность поражения агрегата по типу «А» (уничтожение) определяется вероятностью пробития преграды $P_{\text{пр}}$ (стенки твердотопливного ракетного двигателя, боевой части, отсека с топливом) [11]:

$$P_{\text{пр}} = \begin{cases} 1, & \text{если } V^* \leq V, \\ 0, & \text{если } V^* > V; \end{cases} \quad (5)$$

$$V_{\text{пр}}^* = \sqrt{\frac{2\Phi E_h^* h_2}{q^{\frac{1}{3}}}}, \quad (6)$$

где $P_{\text{пр}}$ – вероятность пробития преграды; V^* – скорость осколка, при которой обеспечивается пробитие преграды, м/с; V – скорость встречи

осколка с преградой, м/с; E_h^* – критическое (разрушающее) значение кинетической энергии осколка, отнесенное к объему пробойны, Дж/м³; q – масса осколка, кг; h_3 – толщина дюралевого эквивалента, м.

При проведении расчетов по дюралевым преградам полагают $E_h^* = 10^9$ Дж/м³.

Экспресс-оценка функционирования многофакторного поля поражения с учетом действия зажигательных элементов

В упрощенном виде механизм комбинированного поражающего действия многофакторного средства поражения заключается в следующем.

За счет первичного поля поражения (осколочно-фугасного) осуществляется общее разрушение цели и вскрытие емкостей с горючесмазочными материалами (резервуаров, топливных баков и т. п.), в результате чего происходит растекание горючего по подстилающей поверхности. Зажигательные элементы при взрыве распределяются в зоне действия осколочно-фугасного поля поражения и при контакте с горючей жидкостью воспламеняют ее, что приводит к возникновению отдельных очагов пожара и в конечном итоге – к поражению всей цели.

Область распределения зажигательных элементов разбивается на число зон j , в каждой из которых элементы размещаются с осредненной плотностью $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_j$. Зоны ограничены окружностями с радиусами $R_1, R_2, R_3, \dots, R_j$.

Математическое ожидание числа зажигательных элементов, воспламенивших растекающееся горючее по подстилающей поверхности при накрытии площади растекания горючего в фиксированный момент времени зоной действия зажигательных элементов с осредненной плотностью ρ , определяется как [12]

$$m = \Delta S_{\Pi} \rho P(\tau), \tag{7}$$

где ΔS_{Π} – площадь перекрытия зоны растекания горючего зоной действия зажигательных элементов, м²; ρ – плотность распределения зажигательных элементов в зоне накрытия, 1/м²; $P(\tau)$ – вероятность воспламенения зажигательных элементов горючего на подстилающей поверхности при их контакте через время τ после подрыва многофакторного средства поражения.

На рис. 3 изображена схема накрытия зоны растекания горючего зоной накрытия зажигательными элементами.

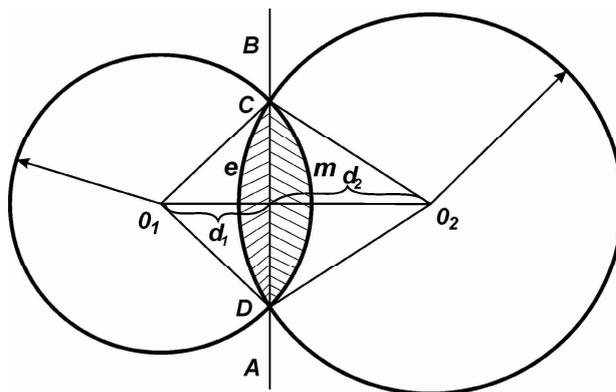


Рис. 3. Схема накрытия зоны растекания горючего

Fig. 3. The scheme covers the zone of spreading of the fuel

Как следует из рисунка, площадь перекрытия ΔS_{Π} равна сумме площадей сегментов S_{CDe} и S_{CDm} , а площадь сегмента определяется как разность площади сектора и площади треугольника.

Формула для определения площади перекрытия ΔS_{Π} имеет вид

$$\Delta S_{\Pi} = \sqrt{R^2 - d_1^2} \left(\frac{1}{2} \pi R - d_1 \right) + \sqrt{r^2 - d_2^2} \left(\frac{1}{2} \pi r - d_2 \right), \tag{8}$$

где R – приведенный радиус разлета зажигательных элементов, м; r – приведенный радиус растекания горючего, м.

Рассмотрим общий случай, когда площадь растекания горючего в различные моменты времени τ перекрывается j -ми зонами накрытия с осредненными плотностями распределения зажигательных элементов ρ_j .

На рис. 4 представлена общая схема перекрытия площади растекания в моменты времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i, \dots, \tau_m$ j -ми зонами действия зажигательных элементов при фиксированных координатах точки подрыва многофакторного средства поражения относительно центра цели (агрегата) [13].

В системе координат XOZ центр O есть точка подрыва многофакторного средства поражения с координатами x_{γ}, z_{λ} . Начало отсчета системы координат совмещено с центром цели.

Центры окружностей $O_1, O_2, \dots, O_i, \dots, O_m$ с координатами $x_1, z_1; x_2, z_2; \dots, x_i, z_i; \dots, x_m, z_m$ есть центры приведенных площадей растекания $S_{1\text{раст}}, S_{2\text{раст}}, \dots, S_{i\text{раст}}, S_m$, имеющие, соответственно, приведенные радиусы растекания в моменты времени.

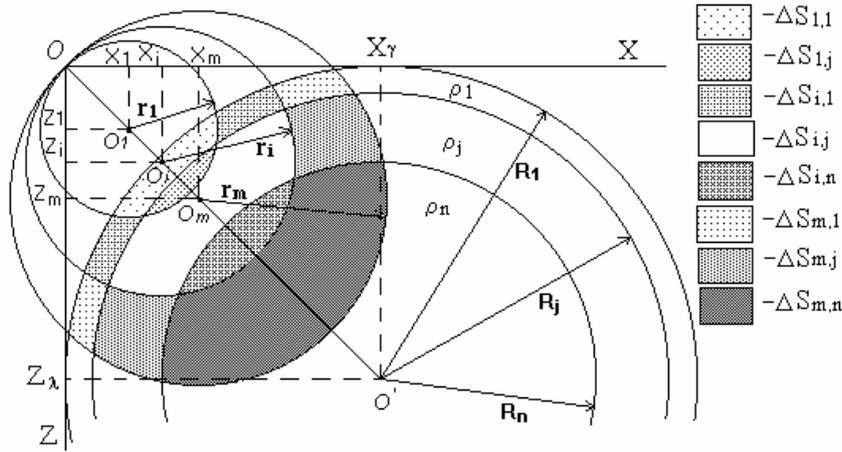


Рис. 4. Общая схема перекрытия площади растекания

Fig. 4. The General scheme of the overlap area of the spreading

Приведенные радиусы $R_1, R_2, \dots, R_j, \dots, R_n$ ограничивают, соответственно, зоны накрытия $1, 2, \dots, j, \dots, n$ с плотностями распределения зажигательных элементов в каждой из них – $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_j, \dots, \rho_n$. Расстояние от центра цели до точки подрыва многофункциональных боеприпасов определяется по формуле (см. рис. 4)

$$R_{\gamma, \lambda} = \sqrt{x_{\gamma}^2 + z_{\lambda}^2}. \tag{9}$$

Допустим, в момент времени τ_1 площадь растекания горючего принимает значение $S_{1\text{раст}}$ с центром в точке O и перекрывается j -ми зонами действия зажигательных элементов. В этом случае математическое ожидание числа зажигательных элементов, воспламенивших горючее, определяется как сумма произведений площади перекрытия ΔS_{ij} и плотности распределения ρ_j соответствующей зоны на величину $P(\tau_i)$:

$$m_1 = \Delta S_{1,1}\rho_1 P(\tau_1) + \Delta S_{1,2}\rho_2 P(\tau_1) + \dots + \Delta S_{1,j}\rho_j P(\tau_1) + \dots + \Delta S_{1,m}\rho_m P(\tau_1) = \sum_{j=1}^n \Delta S_{1,j}\rho_j P(\tau_1). \tag{10}$$

В момент времени τ_2 площадь растекания принимает значение $S_{2\text{раст}}$ с центром в точке O_2 , тогда математическое ожидание m_2 определяется как

$$m_2 = \Delta S_{2,1}\rho_1 P(\tau_2) + \Delta S_{2,2}\rho_2 P(\tau_2) + \dots + \Delta S_{2,j}\rho_j P(\tau_2) + \dots + \Delta S_{2,m}\rho_m P(\tau_2) = \sum_{j=1}^n \Delta S_{2,j}\rho_j P(\tau_2); \tag{11}$$

в момент времени τ_i :

$$m_i = \Delta S_{i,1}\rho_1 P(\tau_i) + \Delta S_{i,2}\rho_2 P(\tau_i) + \Delta S_{ij}\rho_j P(\tau_i) + \dots + \Delta S_{i,m}\rho_m P(\tau_i) = \sum_{i=1}^n \Delta S_{ij}\rho_j P(\tau_i); \tag{12}$$

через время τ_n :

$$m_n = \Delta S_{n,1}\rho_1 P(\tau_n) + \Delta S_{n,2}\rho_2 P(\tau_n) + \Delta S_{nj}\rho_j P(\tau_n) + \dots + \Delta S_{n,m}\rho_m P(\tau_n) = \sum_{i=1}^n \Delta S_{nj}\rho_j P(\tau_n). \tag{13}$$

Тогда суммарное математическое ожидание числа зажигательных элементов, воспламенивших горючее за время работоспособности,

$$m_{\Sigma} = \sum_{j=1}^n \Delta S_{1,j}\rho_j P(\tau_1) + \sum_{j=1}^n \Delta S_{2,j}\rho_j P(\tau_2) + \dots + \sum_{j=1}^n \Delta S_{ij}\rho_j P(\tau_i) + \dots + \sum_{j=1}^n \Delta S_{nj}\rho_j P(\tau_n) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Delta S_{ij}\rho_j (R_j) P(\tau_i), \tag{14}$$

где ΔS_{ij} – фрагмент i -й площади растекающегося горючего за промежуток времени j -й зоной накрытия зажигательными элементами, m^2 ; ρ_j – осредненная плотность распределения зажигательных элементов в j -й зоне накрытия, $1/m^2$; $P(\tau_i)$ – вероятность воспламенения растекающегося горючего зажигательным элементом в момент времени τ_i .

Значение ΔS_{ij} определяется из рис. 4:

$$\Delta S_{ij} = S_{ij} - S_{i,j+1} - (S_{i-1,1} - S_{i-1,j-1}); \tag{15}$$

$$S_{i,j} = \sqrt{R_j^2 - d_{i,j}^2} \left(\frac{1}{2} \pi R_j - d_{i,j} \right) + \sqrt{\left(r_1 + \sum_{j=1}^n \Delta r_i \right)^2 - d_{i,j}'^2} \left(\frac{1}{2} \pi \left(r_1 + \sum_{j=1}^n \Delta r_i \right) - d_{i,j}' \right), \quad (16)$$

где S_{ij} – условная площадь перекрытия j -й зоны растекания за время τ_i j -й зоной действия зажигательных элементов, m^2 ; R_j – приведенный радиус с j -й зоны накрытия, m ; r_1 – приведенный радиус пятна растекающегося горючего в момент времени $\tau_1 = \Delta\tau$, m ; $\Delta\tau_i$ – приращение приведенного радиуса пятна растекающегося горючего за время $\Delta\tau_i$, m .

Расстояния d_{ij} , d'_{ij} находим по формулам

$$d_{i,j} = \frac{d}{2} + \frac{R_j^2 - \left(r_1 + \sum_{i=2}^m \Delta r_i \right)^2}{2d_i}; \quad (17)$$

$$d'_{ij} = \frac{d}{2} + \frac{\left(r_1 + \sum_{i=2}^m \Delta r_i \right)^2 - R_j^2}{2d_i},$$

где d_i – расстояние между точкой подрыва СП и центром пятна растекающегося горючего в момент времени τ_i , m .

Из рис. 3 находим:

$$d_i = OO_i = \sqrt{(x_\lambda - x_i)^2 + (z_j - z_i)^2};$$

$$x_i = \left(r_1 + \sum_{j=2}^m \Delta r_i \right) \frac{x_\gamma}{R_{\gamma\lambda}};$$

$$z_i = \left(r_1 + \sum_{j=2}^m \Delta r_i \right) \frac{z_\lambda}{R_{\gamma\lambda}},$$

где x_i, z_i – координаты центра пятна растекающегося горючего, m ; x_γ, z_λ – координаты точки подрыва многофакторного СП, m ; $R_{\gamma,\lambda}$ – расстояние от точки подрыва многофакторного СП до центра агрегата, m .

Основными параметрами поля растекания горючего являются площадь растекания $S_{\text{раст}}$ и скорость перемещения горючего по подстилающей поверхности с различными характеристиками фильтрации грунта в различные моменты времени.

Анализ характеристик уязвимости типовых наземных объектов позволяет выделить две

группы элементарных целей с горюченасыщенными материалами. К первой группе можно отнести цели, представляющие один агрегат (резервуары с топливом, ж/д цистерны и т. д.), ко второй группе – элементарные цели, включающие отсеки и емкости с горюче-смазочными материалами (ГСМ) (самолеты и вертолеты на стоянках, автомобили и др.).

С учетом различных свойств реальных и искусственных покрытий, на которых размещаются элементы цели, было выбрано два типа поверхности: искусственная подстилающая поверхность с коэффициентом фильтрации $k_\phi = 0$ (железобетон, асфальт, сталь) и естественная подстилающая поверхность с $k_\phi > 0$ (твердый грунт, песчаный грунт). При использовании методов теории подобия была получена формула по определению площади растекания горючего $S_{\text{раст}}$ по подстилающей поверхности с $k_\phi = 0$ при $H_{\text{оср}} = \text{const}$:

$$S_{\text{раст}} = 2 \frac{k}{\sqrt{\pi}} \mu \sqrt{2gH_{\text{оср}}} \left(\frac{v_b}{v_r} \right)^{\frac{1}{3}} S_{\text{пр}} \frac{1}{\sqrt{S_{\text{пр}}}} \tau, \quad (18)$$

где $H_{\text{оср}}$ – средний напор, m ; $S_{\text{пр}}$ – суммарная площадь всех пробоин на боковой грани, m^2 ; v_b, v_r – коэффициенты кинематической вязкости воды и горючего соответственно, m^2/c ; τ – время истечения горючего, s .

Формула (18) позволяет рассчитывать площадь растекания без учета фильтрации грунта при постоянной величине среднего $H_{\text{оср}}$.

При оценке результатов действия первичного поля поражения по элементарным целям, имеющим незначительные объемы отсеков (агрегатов) с ГСМ, необходимо учитывать снижение уровня горючего, так как с течением времени происходит уменьшение величины обобщенного среднего напора $H_{\text{оср}}$ количества пробоин n .

В качестве примера на рис. 5 и 6 представлены графические зависимости площади растекания $S_{\text{раст}}$ и скорости перемещения топлива $V_{\text{п}}$ по подстилающей поверхности с учетом коэффициента фильтрации k_ϕ покрытий, объемов отсеков и резервуаров с горючим от времени τ .

Необходимо отметить, что расхождения в расчетах $S_{\text{раст}}$ по формулам, учитывающим понижение уровня топлива (графики 2, 4) и без учета понижения уровня топлива для агрегатов

с ГСМ, имеющих значительные размеры, например, типовой резервуар с ГСМ (высота 8 м, диаметр 9 м) составляют не более 5 %.

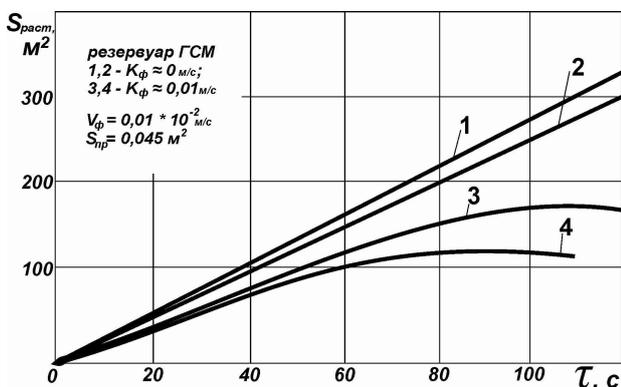


Рис. 5. Зависимость $S_{\text{раст}} = f(k_{\phi}, S_{\text{пр}}, \tau)$

Fig. 5. Dependence $S_{\text{раст}} = f(k_{\phi}, S_{\text{пр}}, \tau)$

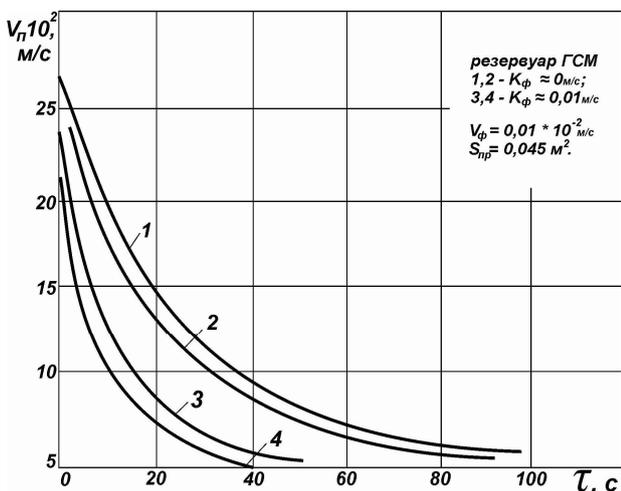


Рис. 6. Зависимость $V_n = f(k_{\phi}, S_{\text{пр}}, \tau)$

Fig. 6. Dependence $V_n = f(k_{\phi}, S_{\text{пр}}, \tau)$

Для определения вероятности воспламенения горючего зажигательным элементом $P(\tau_i)$ в момент времени τ_i были проведены серии экспериментов в лабораторных и полевых условиях.

Испытаниям подверглись зажигательные элементы типа желудь со стальной оболочкой, снаряженной составами $2\text{Al} + 2\text{Fe}_2\text{O}_3$; $3\text{Mg} + \text{Fe}_2\text{O}_3$; $2\text{Ti} + 2\text{CuO}$; $\text{Ti} + \text{C}$; $3\text{Pb} + 5\text{Zr}$; зажигательные элементы типа стакан с составом $3\text{Pb} + 5\text{Zr}$. В качестве подложки для перечисленных элементов использовались песчаный грунт и сталь.

По результатам экспериментальных исследований получены зависимости, определяющие

температуру зажигательных элементов и вероятности зажжения (воспламенения) топлива от времени.

Температура поверхности оболочки элемента от времени может быть представлена в следующем виде:

$$T = K_0 T_{\text{ад}} e^{-(K_1 \tau + K_2 \sqrt{\tau})}, \quad (19)$$

где $T_{\text{ад}}$ – адиабатическая температура химической реакции, °С; K_0 – коэффициент начального прогрева; K_1 , K_2 – коэффициент теплообмена; τ – время, с.

Коэффициенты теплообмена зависят в общем случае от толщины оболочки элемента, коэффициента теплопроводности ее материала, типа подложки и площади контакта с ней, а коэффициент начального прогрева – от теплоемкости оболочки $C_{\text{об}}$ и состава $C_{\text{в}}$, а также коэффициента наполнения η .

Полученная зависимость $T = f(\tau)$ достаточно полно отражает физику процесса. Так, характер изменения температуры прежде всего зависит от рецептуры наполнения (ее плотности, удельной теплоемкости), характеристик оболочки (ее толщины, удельной теплоемкости, коэффициента теплопроводности), коэффициента наполнения элемента и типа подложки. Тип подложки в значительной степени определяет теплоотвод.

Вероятность воспламенения $P_{\text{в}}$ в общем виде определяется температурой зажигательного элемента T , скоростью перемещения топлива V_n и уровнем потока h_n .

В диапазоне скоростей перемещения $V_n = 0 \dots 1,0 \text{ м/с}$ и при $T_{\text{мин}}^{v=0} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ и $T_{\text{макс}}^{v=0} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ вероятность воспламенения $P_{\text{в}}$ имеет вид

$$P_{\text{в}} = \frac{K_0 T_{\text{ад}} e^{-(K_1 \tau + K_2 \sqrt{\tau})} - 500 V_n}{300}. \quad (20)$$

Экспериментальные зависимости температуры T и вероятности воспламенения $P_{\text{в}}$ от времени представлены на рис. 7, 8.

Если учесть, что рабочая температура, обеспечивающая зажжение дизельного топлива (летнего) с вероятностью близкой к единице составляет $800 \dots 1200 \text{ }^\circ\text{C}$, то поражающие элементы, снаряженные составом $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}$, сохраняют работоспособность в течение времени $30 \dots 60 \text{ с}$, что обеспечивает их достаточно высокую эффективность.

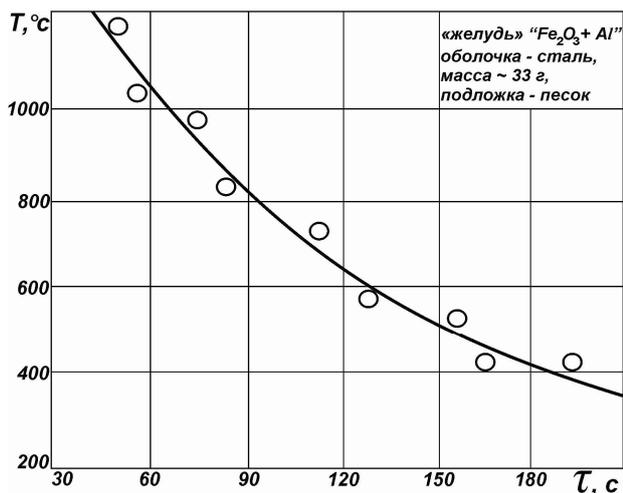


Рис. 7. Экспериментальная кривая $T = f(\tau)$ ЗЭ типа желудь, $Fe_2O_3 + Al$

Fig. 7. Experimental curve $T = f(\tau)$ of acorn type IE, $Fe_2O_3 + Al$

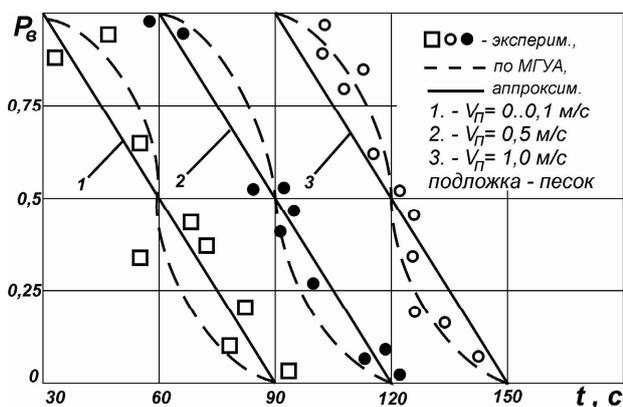


Рис. 8. Вероятность воспламенения топлива ЗЭ типа желудь с составом $T_i + C$ от времени t с момента взведения ЗЭ до контакта

Fig. 8. The probability of ignition of acorn type fuel IE the composition $T_i + C$ from the time t from the moment of cocking to contact

Используя методы оценки эффективности СП и учитывая особенности функционирования совместного осколочно-зажигательного поля поражения, определим структуру обобщенного координатного закона поражения.

В этом случае координатный закон поражения типовых целей с учетом поражающих факторов и их видов (фугасного, осколочного, зажигательного) имеет следующий вид:

$$G(X_\gamma, Z_\lambda) = 1 - (1 - G_{o.з.}(X_\gamma, Z_\lambda)) \times (1 - G_{ф.д.}(X_\gamma, Z_\lambda)) \prod_{j=1}^N (1 - G_j(X_\gamma, Z_\lambda)), \quad (18)$$

где $G_{ф.д.}(X_\gamma, Z_\lambda)$ – координатный закон поражения за счет фугасного действия,

$$G_{ф.д.}(X_\gamma, Z_\lambda) = \begin{cases} 1, & \text{если } k \geq k_{кр}, \\ 0, & \text{если } k < k_{кр}; \end{cases} \quad k_{кр} - \text{критерий,}$$

характеризующий уязвимость цели по отношению фугасному действию; $G_j(X_\gamma, Z_\lambda)$ – координатный закон поражения j -го агрегата; $G_{o.з.}(X_\gamma, Z_\lambda)$ – координатный закон поражения за счет зависимого действия ОПЭ и ЗЭ.

Координатный закон поражения j -го агрегата определяется по следующей зависимости:

$$G_j(X_\gamma, Z_\lambda) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - G_{ji}(X_\gamma, Z_\lambda)], \quad (19)$$

где $G_{ji}(X_\gamma, Z_\lambda)$ – координатный закон поражения j -го агрегата i -м видом действия поражающих элементов ($i = 1$ – независимое действие ОПЭ; $i = 2$ – независимое действие ЗЭ; $i = 3$ – зависимое действие ЗЭ и ОПЭ).

Вероятность поражения осколками j -го уязвимого агрегата $G_{j1}(X_\gamma, Z_\lambda)$, приводящего к прекращению функционирования, по заданному типу определяется по формуле

$$G_{j1}(X_\gamma, Z_\lambda) = 1 - \exp(-m_{j1}), \quad (20)$$

где m_{j1} – математическое ожидание числа инертных ОПЭ, поразивших j -й агрегат. Величина m_{j1} определяется по формуле

$$m_{j1} = \sum_{l=1}^3 \sum_{v=1}^m n_{jlv} P_{jlv}, \quad (21)$$

где n_{jlv} – математическое ожидание числа ОПЭ, попавших в l -ю грань j -го агрегата; P_{jlv} – вероятность поражения j -го агрегата за счет v -го вида поражающего действия осколка (1 – механическое; 2 – зажигательное; 3 – инициирующее).

Аналогично рассчитывается математическое ожидание числа ЗЭ, поразивших j -й агрегат:

$$m_{j2} = \sum_{l=1}^3 \sum_{v=1}^m n_{jlv} P_{j2v}. \quad (22)$$

Математическое ожидание числа ЗЭ, воспламенивших пятно горючего, с учетом (14) определяется как

$$m_{j3} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Delta S_{ij} \rho_j(R_j) P(\tau_i). \quad (23)$$

В этом случае вероятность воспламенения растекающегося топлива за счет зависимого действия ОПЭ и ЗЭ имеет вид

$$G_{j3}(X_\gamma, Z_\lambda) = 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Delta S_{ij} \rho_j(R_j) P(\tau_i)\right). \quad (24)$$

Обобщенный координатный закон поражения с учетом всех видов поражающих факторов и расчетной схемы (см. рис. 3) имеет вид

$$G(X_\gamma, Z_\lambda) = 1 - \left(1 - G_{\text{ф.д}}(X_\gamma, Z_\lambda)\right) \times \left. \begin{aligned} & \times \prod_{j=1}^n \left\{ \exp\left(\left((S_{j1} X_\gamma + Z_\lambda S_{j2} + Y_n S_{j3}) \times \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. \frac{N_1 \sum_{j=1}^k \sum_{v=1}^m P_{j1v} + N_2 \sum_{j=1}^k \sum_{v=1}^m P_{j2v}}{4\pi R^3 \cos(\theta)} \right) \right\} + \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Delta S_{ij} \rho_j P(\tau_i) \right\}, \quad (25) \end{aligned}$$

где N_1, N_2 – количество инертных и зажигательных элементов соответственно; S_{j1}, S_{j2}, S_{j3} – площади боковых и верхней (нижней) граней j -х агрегатов; P_{j1v} и P_{j2v} – вероятности поражения j -х агрегатов ОПЭ и ЗЭ соответственно за счет v -го вида поражающего действия.

Выводы

Таким образом, разработанная экспресс-оценка функционирования многофакторного поля поражения с учетом действия зажигательных элементов позволяет вычислить значения показателей эффективности перспективных многофакторных боеприпасов и совместного применения разрушительного (осколочно-фугасного) и зажигательного действия.

За счет высоких энергетических возможностей зажигательных элементов расширяются боевые возможности средств поражения, увеличивается зажигательная и иницирующая способности по сравнению с осколочными поражающими элементами при непосредственном контакте с отсеком цели, а также за счет дополнительного эффекта при контакте с пятном горячего и горючими материалами.

Для определения обобщенной характеристики $S_{\text{пр}}$ необходимо иметь исходные данные о площади растекания горючего $S_{\text{раст}}$, плотности распределения зажигательных элементов на подстилающей поверхности и математическом ожидании числа зажигательных элементов, вос-

пламенивших горючее при зависимом действии зажигательных элементов от инертных поражающих элементов, а также о математическом ожидании числа инертных и зажигательных элементов, поразивших отсеки и агрегаты при независимом друг от друга действии.

Расчет по фугасному действию проводится с учетом ступенчатого закона поражения. Следовательно, для определения обобщенной характеристики $S_{\text{пр}}$ необходимо знать координатный закон поражения.

Библиографические ссылки

1. Макаренко Н. Г., Яковлев Ю. С., Плотников Я. Р. Актуальные проблемы развития эксплуатации вооружения и военной техники // Актуальные проблемы развития и эксплуатации ракетно-артиллерийского, специального вооружения и морской техники : сб. тр. (доклады и статьи) 4-й науч.-практ. конф. ЧВВМУ имени П. С. Нахимова (Севастополь, 25–28 сентября 2019 г.). 2019. Вып. 4 (19). С. 173–179.
2. Опережающее создание научно-технического задела в интересах развития вооружения, военной и специальной техники / В. В. Ключков, А. М. Купашов, В. В. Максимов, С. М. Рождественская // Военная мысль. 2018. № 12. С. 23–32.
3. Жуков А. В. Об эффективности корабельных артиллерийских установок при отражении противокорабельных ракет // Изв. Тульского ГУ. 2015. № 2. С. 41–44.
4. Селиванов В. В., Ильин Ю. Д. О выборе приоритетов при разработке кинетического оружия для решения задач в военных конфликтах // Военная мысль. 2017. № 7. С. 29–40.
5. Дыбов В. Н., Подгорных Ю. Д. О необходимых условиях достижения (завоевания) господства в воздушно-космической сфере // Военная мысль. 2018. № 8. С. 15–21.
6. Сергеев Ю. А. Создание за рубежом взрывчатых веществ пониженной чувствительности для оснащения артиллерийских боеприпасов // Зарубежное военное обозрение. 2019. Т. 869, № 8. С. 48–51.
7. Барабанщиков В. Ф., Плачинта К. Н. Крылатые ракеты морского базирования стран НАТО // Тр. ЧВВМУ имени П. С. Нахимова. 2019. Т. 19, № 4. С. 6–15.
8. Зубов В. А. Программируемые боеприпасы воздушного подрыва для американских пушек BUSH-MASTER // Морской сборник. 2019. Т. 2062, № 1. С. 72–79.
9. Селиванов В. В. Боеприпасы. М. : МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2016. 506 с.
10. Сухопяткин И. Т., Воробьев А. А. Вероятность пробития конструктивных элементов корабля поражающими элементами осколочных боеприпасов // Тр. ЧВВМУ имени П. С. Нахимова. 2019. Т. 19, № 4. С. 81–84.

11. Ладанов В. И. Методический аппарат морфологического и кластерного анализа показателей защищенности типовых наземных целей и объектов // Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем : сб. ст. междунар. практ. конф. Пермского ВИ ВНГ РФ (Пермь, 15–17 мая 2017 г.). 2017. № 8 (23). С. 61–70.

12. Козлов В. В., Рыбаков А. П. Баллистические и термические воздействия на объекты технических систем с горюче-насыщенными материалами : монография. Пермь : От и До, 2012. 254 с.

13. Шамсудинов Ш. М., Ладанов В. И. К вопросу моделирования воздействия и оценки эффективности многофакторного поля поражения легкобронированных боевых машин в целях уменьшения уязвимости и ущерба // Актуальные вопросы совершенствования военной и специальной техники. 2018. № 12. С. 69–76.

14. Козлов В. В., Васильев А. В. Оптимизация конструктивных параметров многофакторного средства поражения // Актуальные проблемы развития и эксплуатации ракетно-артиллерийского, специального вооружения и морской техники : материалы (доклады и статьи) 3-й науч.-практ. конф. ЧВВМУ имени П. С. Нахимова (Севастополь, 25–29 сентября 2018 г.). Севастополь : ЧВВМУ имени П. С. Нахимова, 2018. Вып. 4 (13). С. 111–119.

References

1. Makarenko N.G., Yakovlev Yu.S., Plotnikov Ya.R. *Aktual'nye problemy razvitiya ekspluatatsii vooruzheniya i voennoj tekhniki* [Actual problems of development of operation of weapons and military equipment]. *Sbornik trudov (doklady i stat'i) 4-j nauchno prakticheskoy konferencii ChVVMU im. P.S. Nahimova «Aktual'nye problemy razvitiya i ekspluatatsii raketno-artillerijskogo, special'nogo vooruzheniya i morskoy tekhniki*. [Proc. of the 4th scientific and practical conference of CHVVMU. P.S. Nakhimova "Actual problems of development and operation of rocket-artillery, special weapons and marine equipment" (Sevastopol, September 25-28, 2019)]. 2019, vol. 4, pp. 173-179 (in Russ.).

2. Klochkov V.V., Kupashov A.M., Maksimov V.V., Rozhdestvenskaya S.M. [Advanced creation of scientific and technical reserve for the development of weapons, military and special equipment]. *Voennaya mysl'*, 2018, no. 12, pp. 23-32 (in Russ.).

3. Zhukov A.V. [On the effectiveness of ship artillery installations in repelling anti-ship missiles]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 2, pp. 41-44 (in Russ.).

4. Selivanov V.V., Ilyin U.D. [On the choice of priorities in the development of kinetic weapons for solving problems in military conflicts]. *Voennaya mysl'*, 2017, no. 7, pp. 29-40 (in Russ.).

5. Dybov V.N. Podgornyykh U.D. [On the necessary conditions for achieving (conquering) dominance in the

aerospace sphere]. *Voennaya mysl'*, 2018, no. 8, pp. 15-21 (in Russ.).

6. Sergeev U.A. [Creating low-sensitivity explosives abroad for equipping artillery ammunition]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2019, vol. 869, no. 8, pp. 48-51 (in Russ.).

7. Barabanshchikov V.F., Plachinta K.N. [Cruise missiles of sea basing of NATO countries]. *Trudy ChVVMU imeni P.S. Nakhimova*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 6-15 (in Russ.).

8. Zubov V.A. [Programmable air-blasting ammunition for American BUSHMASTER guns]. *Morskoi sbornik*, 2019, vol. 2062, no. 1, pp. 72-79 (in Russ.).

9. Selivanov V.V. *Boepripasy* [Ammunition]. Moscow, Bauman Moscow state technical University Publ., 2016, 506 p. (in Russ.).

10. Suchopyatkin I.T., Vorobyev A.A. [The Probability of penetration of structural elements of ship shrapnel shrapnel ammunition]. *Trudy ChVVMU imeni P.S. Nakhimova*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 81-84 (in Russ.).

11. Ladanov V.I. *Metodicheskij apparat morfologicheskogo i klasterного analiza pokazatelej zashchishchennosti tipovyh nazemnyh celej i ob'ektov* [Methodological apparatus for morphological and cluster analysis of security indicators for typical ground targets and objects]. *Sbornik statej Mezhdunarodnoj prakticheskoy konferencii Permskogo VI VNG RF "Problemy effektivnosti i bezopasnosti funkcionirovaniya slozhnyh tekhnicheskikh i informacionnyh sistem"* [Proc. of articles Of the international practical conference of the Perm military Institute of the national guard troops Russian Federation "Problems of efficiency and security of complex technical and information systems" (Perm, may 15-17, 2017)]. 2017, no. 8, pp. 61-70 (in Russ.).

12. Kozlov V.V., Rybakov A.P. *Ballisticheskije i termicheskije vozdeystviya na obyektu tekhnicheskikh sistem s goryuche-nasyshchennymi materialami* [Ballistic and thermal effects on objects of technical systems with fuel-saturated materials]. Perm, Ot i do Publ., 2012, 254 p. (in Russ.).

13. Shamsudinov S.M., Ladanov V.I. [On the issue of modeling the impact and evaluating the effectiveness of the multi-factor field of destruction of lightly armored combat vehicles in order to reduce vulnerability and damage]. *Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya voennoi i spetsial'noi tekhniki*, 2018, no. 1, pp. 69-76 (in Russ.).

14. Kozlov V.V., Vasiliev A.V. *Optimizatsiya konstruktivnykh parametrov mnogofaktornogo sredstva porazheniya* [Optimization of design parameters of a multi-factorial means of destruction]. *Sbornik materialov (doklady i stati) 3-y nauchno-prakticheskoy konferencii ChVVMU im. P.S. Nakhimova "Aktualnyye problemy razvitiya i ekspluatatsii raketno-artillerijskogo. spetsial'nogo vooruzheniya i morskoy tekhniki"* [Proc. of the 3rd scientific-practical conference of the Black Sea Nakhimov Higher Naval School "Actual problems of development and operation of rocket-artillery, special weapons and marine equipment" (Sevastopol, September 25-29, 2018)]. 2018, no. 4, pp. 111-119 (in Russ.).

Evaluation of Effectiveness of Multifactorial Lesion Field Taking into Account the Action of Incendiary Elements

V.V. Kozlov, DSc in Engineering, Professor, Black Sea Nakhimov Higher Naval School, Sevastopol, Russia

A.V. Vasilyev, Black Sea Nakhimov Higher Naval School, Sevastopol, Russia

A.A. Demchenko, PhD in Engineering, Black Sea Nakhimov Higher Naval School, Sevastopol, Russia

A.I. Chuprin, Black Sea Nakhimov Higher Naval School, Sevastopol, Russia

The analysis of recent military operations with the use of massive precision weapons in conventional equipment (Yugoslavia, Iraq, Libya, Syria, etc.) confirms that the main coastal and maritime targets are, first of all, objects of missile and aviation complexes, as potential carriers of nuclear weapons. The planned defeat of missile and aircraft systems on land and at sea provides strategic superiority. Objects of aviation and mobile missile systems belong to objects with fuel-saturated materials and at their known location are very vulnerable targets in relation to joint shrapnel-fire effects. At the same time, it should be noted that the energy of the targets themselves is used to defeat these targets, which is many times greater than the energy of the applied weapon.

Today, shrapnel and high-explosive weapons of mass destruction form one of the most extensive and developed classes of ammunition intended for almost all types of targets, but their use without the use of incendiary weapons is not always appropriate and effective. In conditions of combat operations, the main volume of tasks to defeat designated targets is solved with a high degree of probability by the simultaneous use of high-explosive and incendiary weapons. It is known that the joint use of destructive (high-explosive, fragmentation, etc.) and incendiary ammunition is effective from the point of view of the damage caused, provided that their zones of destruction are combined. In real conditions, organization of such a combined effect is difficult because of the significant individual dispersion of the means of destruction with various damaging factors.

It is the joint use of destructive and incendiary weapons in a single ammunition that will significantly increase their combat effectiveness and, above all, for objects with combustible materials. Creating such a multi-factor weapon is one of the absolute priorities of the state armament program.

To design such weapons at the initial stages, it is necessary to develop a unified scientific approach to assess the effectiveness of multifactor fields of destruction, taking into account the action of incendiary elements, which is not available today. The scientific paper presents theoretical studies in the field of evaluating the effectiveness of multi-factor weapons.

Keywords: ammunition, shrapnel, multi-factor, fuel, energy, probability, efficiency.

Получено 12.12.2019

Образец цитирования

Оценка эффективности многофакторного поля поражения с учетом действия зажигательных элементов / В. В. Козлов, А. В. Васильев, А. А. Демченко, А. И. Чуприн // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 1. С. 54–64. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-1-54-64.

For Citation

Kozlov V.V., Vasilyev A.V., Demchenko A.A., Chuprin A.I. [Evaluation of Effectiveness of Multifactorial Lesion Field Taking into Account the Action of Incendiary Elements]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 54-64 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-1-54-64.