

УДК 623.45(075.8)

doi: 10.53816/20753608_2025_1_119

**МЕТОДИКА ВЫБОРА ПРИОРИТЕТНОГО ОСКОЛОЧНО-ФУГАСНОГО
ЗАЖИГАТЕЛЬНОГО БОЕПРИПАСА
ИЗ КОНКУРЕНТНОЙ ГРУППЫ ПУТЕМ СРАВНЕНИЯ
ИХ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ***

**METHODOLOGY FOR SELECTING PRIORITY HIGH EXPLOSIVE
INCENDIARY AMMUNITION FROM A COMPETITIVE GROUP
BY COMPARING THEIR SPECIALIZED DIGITAL TWINS**

Чл.-корр. РАРАН С.М. Мужичек¹, М.А. Корзун², А.А. Скрынников¹, А.К. Савенко¹

¹ГосНИИАС, ²ЦНИИХМ

S.M. Muzhichek, M.A. Korzun, A.A. Skrynnikov, A.K. Savenko

В статье предложена методика выбора приоритетного осколочно-фугасного зажигательного боеприпаса из конкурентной группы с использованием технологии специализированных цифровых двойников (СЦД). Выбор предпочтительного боеприпаса осуществляется при сравнении значений комплексного показателя, полученных по результатам наземных и виртуальных испытаний СЦД конкурирующих боеприпасов по поражающему действию.

Ключевые слова: конкурирующие осколочно-фугасные зажигательные боеприпасы, специализированный цифровой двойник, натурные испытания, виртуальные испытания, обобщенный показатель поражающего действия, выбор предпочтительного осколочно-фугасного зажигательного боеприпаса.

The article proposes a method for selecting a priority high-explosive incendiary munition from a competitive group using specialized digital twin technology. The choice of the preferred ammunition is carried out by comparing the complex indicator obtained from the results of ground and virtual tests of specialized digital twins of competing ammunition in terms of damaging effect.

Keywords: competing high-explosive incendiary ammunition, specialized digital twin, full-scale tests, virtual tests, generalized lethality indicator, selection of justified high-explosive incendiary ammunition.

В современном мире различные виды и способы моделирования находят широкое применение на всех этапах жизненного цикла образцов вооружения и военной техники (поисковые исследования, эскизное, техническое проектирова-

ние, стендовые и полигонные испытания, производство и эксплуатация).

Известно, что детальное изучение одних сторон моделируемого объекта обычно осуществляется ценой отказа от исследования других его

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00244).

сторон. Поэтому любая модель замещает оригинал лишь в строго ограниченных рамках. Из этого следует, что для одного объекта может быть построено несколько «специализированных» моделей, концентрирующих внимание на определенных сторонах исследуемого объекта или же характеризующих объект с разной степенью детализации. При оценке эффективности поражающего действия разрабатываемых образцов вооружения и военной техники важным аспектом является построение их специализированных цифровых двойников, а также выбор приоритетного боеприпаса из конкурентной группы.

В результате подрыва осколочно-фугасных зажигательных (ОФЗ) боеприпасов в окружающей среде возникают осколочное поле, ударно-волновое поле и тепловое поле [1–3]. Каждое из этих полей характеризуется своими обобщенными показателями. Совокупность таких показателей характеризует степень воздействия боеприпасов на объекты окружающей среды. Совокупность частных моделей определения обобщенных показателей поражающего действия боеприпасов, реализованная в виде комплексной математической модели и ее программной реализации, может рассматриваться как специализированный цифровой двойник поражающего действия ОФЗ боеприпасов.

Частные методики оценки эффективности поражающего действия боеприпасов включают наземные и виртуальные испытания. Содержанием наземных испытаний осколочно-фугасных зажигательных боеприпасов является определение основных частных характеристик их поражающего действия, а именно:

- распределения осколков корпусов боеприпасов по массе и углам разлета;
- избыточного давления на фронте и импульс ударной волны;
- характеристик теплового поля, возникающего в окружающей среде в результате подрыва боеприпаса.

Виртуальные испытания позволяют распространить полученные в наземных условиях результаты на другие условия применения, например при подрыве боеприпасов в жидкости, в грунте или в воздухе (подрыв на заданной высоте).

Следует отметить, что известные методики наземных испытаний ОФЗ боеприпасов разра-

ботаны еще в СССР и не в полной мере отражают современное понимание механизмов их поражающего действия, а также не учитывают возможности современных информационных технологий.

Сравнение между собой нескольких конкурирующих ОФЗ боеприпасов обычно проводится не по какой-то одной частной характеристике поражающего действия боеприпаса, а по целому набору этих характеристик. При этом во внимание принимаются наиболее существенные поражающие факторы, которые затем количественно оцениваются обобщенными показателями поражающего действия. Совокупность обобщенных показателей (цифровой двойник) при их программной реализации может быть затем использована для определения некоторого комплексного показателя, который в наиболее полной мере характеризует поражающее действие каждого отдельного конкурирующего боеприпаса. Сравнение конкурирующих ОФЗ боеприпасов по комплексному показателю, а также выбор наиболее предпочтительного боеприпаса из конкурентной группы представляет собой актуальную научную задачу.

На этапе наземных испытаний целесообразно определять частные характеристики поражающего действия боеприпасов с использованием современных информационных технологий при минимальном количестве проводимых испытаний [4].

Указанные частные характеристики поражающего действия могут быть определены с помощью разработанного авторами способа комплексных испытаний. Данный способ заключается в подрыве ОФЗ боеприпаса, установленного в заданное положение в центре профилированной круговой мишенной стенки, размеченной на зоны, соответствующие направлениям разлета осколков в принятой системе координат. Расстояние между боеприпасом и профилированной круговой мишенной стенкой равно R .

Для определения частных характеристик осколочного действия выполняются следующие действия:

- регистрируют попадания и улавливания, проводят подсчет числа осколков, попадающих в каждую зону;
- измеряют размеры и площади пробойин;

— производят регистрацию, запись и последующую обработку сигналов с электретных датчиков, размещенных по соответствующим зонам мишенной стенки;

— проводят оценку количественных характеристик осколочного поля по массам, скоростям, форме и размерам осколков.

Для определения частных характеристик фугасного действия:

— устанавливают линейки датчиков давления, соединенных с автономными измерителями давления;

— фиксируют линейками датчиков давления и автономными измерителями давления величины избыточного давления в ударной волне по расстояниям и направлениям, передают полученные значения избыточного давления ударной волны на удаленный компьютер;

— на удаленном компьютере определяют величины скорости движения фронта ударной волны, избыточного давления на фронте и импульса ударной волны по расстояниям и направлениям, фиксируют во времени форму ударно-волнового поля, создаваемого в окружающей среде испытываемым боеприпасом.

Для определения частных характеристик зажигательного действия:

— вводят датчики температуры, устанавливаемые на поверхности земли параллельно датчикам давления, объединяют датчики давления и температуры, установленные на одном расстоянии от точки подрыва боеприпаса в блоки датчиков, а также используют автономные измерители давления и температуры, соединенные по радиоканалу с удаленным компьютером;

— блоками датчиков давления и температуры, автономными измерителями давления и тем-

пературы фиксируют изменение величин давления и температуры в заданных точках пространства после прихода фронта ударной волны во времени по расстояниям и направлениям, полученные значения передают на удаленный компьютер;

— на удаленном компьютере дополнительно определяют величины температуры окружающей среды после прихода ударной волны по расстояниям и направлениям, а также тепловой импульс, коэффициент зажигательной способности K_z , скорость движения теплового поля по расстояниям и направлениям, фиксируют во времени форму теплового поля, создаваемого в окружающей среде испытываемым боеприпасом (рис. 1).

Распределение осколков боеприпаса по угловым секторам и по массе может быть представлено в виде таблицы (таблица).

В таблице обозначено: n_{ij} — число осколков, попавших в i -ю весовую группу j -го углового сектора; $i = 1, m+1$, $j = 1, n$. Значения $\hat{q}_i$ и $\hat{\varphi}_j$ определяют границы выделенных весовых групп и угловых секторов соответственно. При $> \hat{q}_m$ весовая группа не ограничена сверху.

Введем случайные величины: Q — масса осколка, Φ — угол в меридианной плоскости. Так как эти случайные величины зависимы, то целесообразно рассматривать двумерный случайный вектор (Φ, Q) с функцией распределения $F(\varphi, q) = P(\Phi < \varphi; Q < q)$, $0 \leq \varphi \leq 180$, $q_{\min} \leq q < \infty$, где $q_{\min} = \hat{q}_0$ ($q_{\min}$ — минимальная масса отбираемых осколков).

Функция распределения случайной величины Φ определяется через $F(\varphi, q)$ по формуле $F(\varphi) = F(\varphi, \infty)$ и может быть представлена в виде кумулятивной функции

$$F(\varphi) = \begin{cases} 0, & \text{при } \varphi < \hat{\varphi}_0; \\ F(\hat{\varphi}_{j-1}) + \frac{\varphi - \hat{\varphi}_{j-1}}{\hat{\varphi}_j - \hat{\varphi}_{j-1}} (F(\hat{\varphi}_j) - F(\hat{\varphi}_{j-1})), & \text{при } \hat{\varphi}_{j-1} \leq \varphi < \hat{\varphi}_j; \\ 1, & \text{при } \varphi \geq \hat{\varphi}_n; \end{cases}$$

$$F(\hat{\varphi}_j) = \frac{N_j}{N},$$

где $N_j = \sum_{i=1}^{m+1} n_{ij}$ — суммарное число осколков, принадлежащих j -му угловому сектору;

$$N = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m+1} n_{ij} \text{ — суммарное число осколков,}$$

сформированных при подрыве боеприпаса.

Типовая функция распределения $F(\varphi)$ осколков по углу φ приведена на рис. 2.

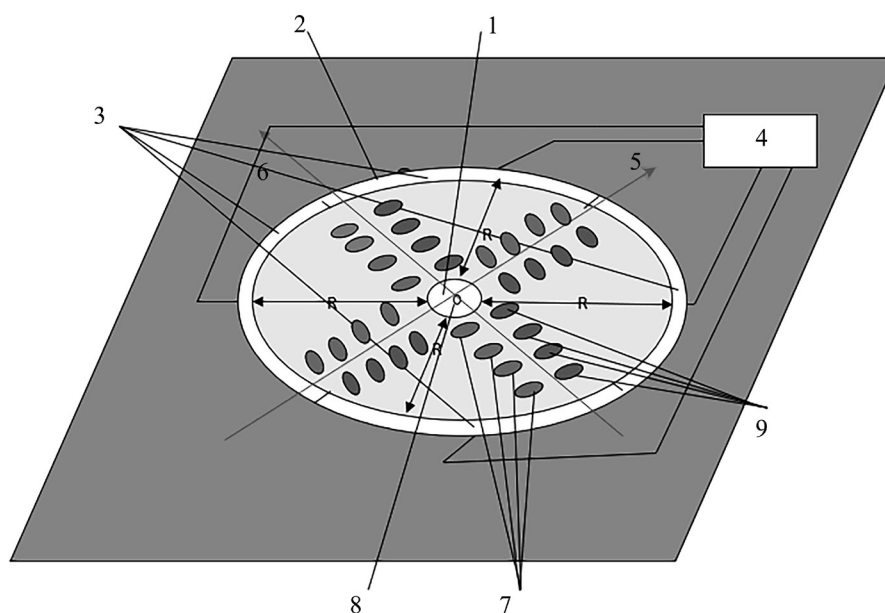


Рис. 1. Схема проведения наземных испытаний: 1 — испытываемый боеприпас; 2 — профилированная круговая мишенная стенка; 3 — электретенные датчики; 4 — блок определения количественных характеристик осколочного поля по массам, скоростям, форме и размерам осколков; 5, 6 — оси введенной системы координат; 7 — датчики давления; 8 — узел инициирования; 9 — датчики температуры

Таблица

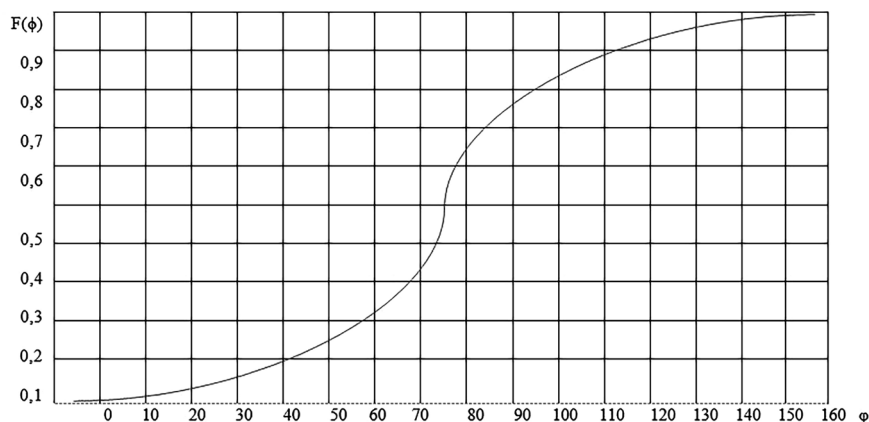
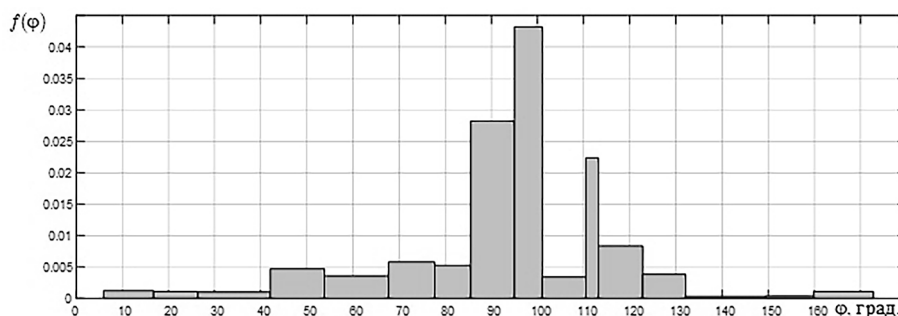
Распределение осколков боеприпасов по массе и по углам разлета

Весовая группа	Угловой сектор					
	$\widehat{\varphi}_0 \dots \widehat{\varphi}_1$	$\widehat{\varphi}_1 \dots \widehat{\varphi}_2$	...	$\widehat{\varphi}_{j-1} \dots \widehat{\varphi}_j$	...	$\widehat{\varphi}_{n-1} \dots \widehat{\varphi}_n$
$\widehat{q}_0 \dots \widehat{q}_1$	n_{11}	n_{12}	...	n_{1j}	...	n_{1n}
$\widehat{q}_1 \dots \widehat{q}_2$	n_{21}	n_{22}	...	n_{2j}	...	n_{2n}
...	...	...	...	...	...	...
$\widehat{q}_{i-1} \dots \widehat{q}_i$	n_{i1}	n_{i2}	...	n_{ij}	...	n_{in}
...	...	...	...	...	...	...
$\widehat{q}_{m-1} \dots \widehat{q}_m$	$n_{m,1}$	$n_{m,2}$	...	$n_{m,j}$	...	$n_{m,n}$
$> \widehat{q}_m$	$n_{m+1,1}$	$n_{m+1,2}$	...	$n_{m+1,j}$	...	$n_{m+1,n}$

Гистограмма $f(\varphi)$ относительных частот для этого примера приведена на рис. 3.

Распределение осколков в пределах углового сектора — равномерное. Так как распределение осколков по массе определяется для каждого углового сектора и не зависит от конкретного значения угла φ в пределах этого сектора, то при проведении стохастического моделирования закон распределения осколков по массе и

по направлению можно представить как функцию распределения двумерной случайной величины смешанного типа, в которой первая компонента Z является дискретной случайной величиной с конечным числом возможных состояний, определяющей номер углового сектора, а вторая компонента — случайная величина Q (масса осколка) является непрерывной случайной величиной.


 Рис. 2. Функция распределения $F(\varphi)$ осколков по углу φ

 Рис. 3. Гистограмма $f(\varphi)$ относительных частот

Дискретная случайная величина Z задается распределением вероятностей $P(Z = j) = p_j$, $j = 1, n$, тогда

$$F(z) = \sum_{j=1}^n p_j C(z - j),$$

где $C(z - j)$ — единичная функция Хевисайда:

$$C(z - j) = \begin{cases} 0, & \text{при } z \geq j; \\ 1, & \text{при } z < j. \end{cases}$$

Пример функции распределения $F(z)$ приведен на рис. 4.

При построении условного закона распределения элементов по массе (при условии, что рассматривается заданный угловой сектор) необходимо определиться с открытым интервалом ($q > 100$ г). Для этого воспользуемся значением $\bar{q}_{m+1,j}$ — средней массой осколков j -го углового сектора, имеющих массу более 100 г. Так как никаких данных о виде распределения элементов в этом интервале нет, то так же, как и для других интервалов, может быть принято

равномерное распределение значений массы в пределах интервала. Тогда правая граница интервала $q > 100$ г может быть определена из соотношения

$$\bar{q}_{m+1,j} = \frac{\hat{q}_{mj} + \hat{q}_{m+1,j}}{2},$$

(математическое ожидание равномерно распределенной случайной величины), откуда

$$\hat{q}_{m+1,j} = 2\bar{q}_{m+1,j} - \hat{q}_{mj},$$

где $\hat{q}_{m+1,j}$ — правая граница искомого интервала.

Таким образом, можно считать, что данные о распределении осколков сгруппированы по массе и по направлению с заданными границами всех интервалов. Имея данные распределения, можно определить величины обобщенных показателей пробивного действия осколочного поля боеприпаса: $h_{\text{пр}}$ — предельной толщины монолитной преграды конечной толщины, которую способен пробить осколочный поток боеприпаса, и h_{Σ} — предельной суммарной толщины раз-

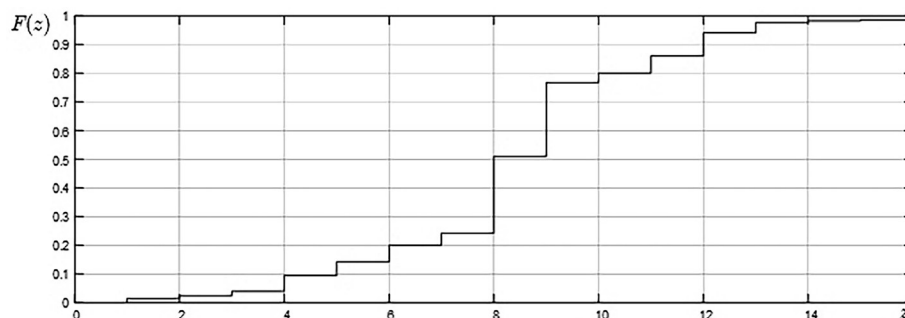


Рис. 4. Функция распределения $F(z)$

несенных преград, которые способен пробить осколок боеприпаса.

Для определения частных характеристик фугасного и зажигательного действия ОФЗ боеприпаса по результатам испытаний на испытательном полигоне определяются формульные зависимости избыточного давления ΔP от массы взрывчатого вещества (ВВ) m_0 и от расстояния R до изделия, а также $J_{уд}$ в виде:

$$\Delta P = A \frac{m_0}{R^3} + B \frac{\sqrt[3]{m_0^2}}{R^2} + C \frac{\sqrt[3]{m_0}}{R};$$

$$J_{уд} = \int_0^{\tau_{сж}} P(t) dt,$$

где $\tau_{сж}$ — время фазы сжатия ударной волны.

Величина теплового импульса I_T определяется для каждого расстояния от точки подрыва испытываемого боеприпаса, где установлен датчик температуры, по формуле

$$I_T = \int_{t_0}^{t_k} (T_{и}(t) - T_{окр}) dt,$$

где $T_{и}$ — значение температуры, измеренное датчиком температуры в момент времени t ;

$T_{окр}$ — температура окружающей среды до момента подрыва испытываемого боеприпаса;

t_0 — время начала измерения температуры датчиком температуры (время прихода фронта ударной волны к соответствующему блоку датчиков);

t_k — время завершения измерения температуры датчиком температуры (время возвращения температуры к значению $T_{окр}$).

Величина скорости движения теплового поля, образующегося в окружающей среде в результате подрыва испытываемого боеприпаса,

определяется следующим образом. После прихода фронта ударной волны к соответствующему блоку датчиков, с помощью датчиков давления и температуры проводится измерение давления и температуры. Момент начала измерения температуры фиксируется соответствующим автономным измерителем давления и температуры. Следует отметить, что к каждому автономному измерителю давления и температуры подключено минимум четыре блока датчиков, расположенных на расстояниях R_2 , R_3 , R_4 между собой. После прохождения тепловым фронтом расстояния R_2 запускается следующий датчик температуры, входящий в состав следующего блока датчиков. Момент запуска этого датчика температуры также фиксируется автономным измерителем давления и температуры. Автономный измеритель давления и температуры, кроме того, фиксирует промежуток времени Δt прохождения тепловым фронтом расстояния R_2 от первого датчика температуры ко второму и определяет скорость движения теплового фронта на этом участке по формуле

$$V_1 = \frac{R_2}{\Delta t}.$$

Аналогично определяется скорость движения теплового фронта на участках от R_2 до R_3 и от R_3 до R_4 . Таким образом, в результате обработки результатов эксперимента получается набор скоростей, позволяющий построить эмпирическую зависимость изменения скорости движения теплового фронта от расстояния до испытываемого боеприпаса.

По результатам обработки измерений на удаленном компьютере также может быть построено ударно-волновое и тепловое поле, создаваемое в окружающей среде испытываемым

осколочно-фугасным зажигательным боеприпасом во времени по расстояниям и направлениям.

Далее на удаленном компьютере по результатам обработки испытаний определяются обобщенные показатели поражающего действия боеприпаса. Применительно к осколочно-фугасному зажигательному боеприпасу такими обобщенными показателями являются:

– предельная толщина $h_{пр}$ монолитной преграды, которую способен пробить осколочный поток боеприпаса;

– предельная суммарная толщина h_{Σ} разнесенных преград, которые способен пробить осколочный поток боеприпаса;

– эквивалентная масса $M_{экв}$ заряда ВВ боеприпаса;

– коэффициент K_3 зажигательной способности боеприпаса.

Методики определения обобщенных показателей $h_{пр}$, h_{Σ} , $M_{экв}$, K_3 приведены в работах [5–12].

Далее определяют комплексный показатель поражающего действия испытываемого боеприпаса $\mathcal{E}$ в виде:

$$\mathcal{E}_{\Sigma i} = (A_1 \mathcal{E}_{пр} + A_3 \mathcal{E}_p + A_2 \mathcal{E}_ф + A_4 \mathcal{E}_3);$$

$$\sum_{i=1}^n A_i = 1, 0 < A_i < 1,$$

где A_i — весовые коэффициенты, определяющие степень важности i -го обобщенного показателя поражающего действия, определяемые экспертным методом;

$\mathcal{E}_{пр}$ — величина показателя пробивного действия по монолитной преграде;

$\mathcal{E}_p$ — величина показателя пробивного действия по разнесенным преградам;

$\mathcal{E}_ф$ — величина показателя фугасного действия;

$\mathcal{E}_3$ — величина показателя зажигательного действия.

Определение весовых коэффициентов A_i осуществляется с помощью метода экспертных оценок [13].

После завершения наземных и виртуальных испытаний всех ОФЗ боеприпасов, входящих в конкурентную группу, определяется боеприпас, имеющий максимальное значение $\mathcal{E}_{\Sigma i}$. Этот боеприпас считается приоритетным в группе по поражающему действию.

Результаты проведенных экспериментальных и виртуальных испытаний с использованием цифровых двойников боеприпасов свидетельствуют о том, что предлагаемая методика позволяет сократить время проведения испытаний и трудоемкость их проведения в несколько раз (в зависимости от числа конкурирующих боеприпасов), а также повысить оперативность, точность и полноту сравнительной оценки конкурирующих ОФЗ боеприпасов по поражающему действию [14, 15].

Список источников

1. Способ оценки пробивного действия дистанционного боеприпаса и устройство для его осуществления: пат. 2491501 Рос. Федерация. № 2012118262/11; заявл. 04.05.2012; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 24. 11 с.
2. Способ определения зажигательной способности боеприпаса дистанционного действия и устройство для его осуществления: пат. 2521460 Рос. Федерация. № 2013117931/11; заявл. 18.04.2013; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18. 15 с.
3. Способ определения иницирующей способности дистанционного боеприпаса и устройство для его осуществления: пат. 2490589 Рос. Федерация. № 2012118261/11; заявл. 04.05.2012; опубл. 20.08.2013, Бюл. № 23. 13 с.
4. Способ оперативной оценки эффективности поражающего действия боеприпаса и устройство для его осуществления: пат. 2442104 Рос. Федерация. № 2010138430/11; заявл. 17.09.2010; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 4. 18 с.
5. Способ автоматизированной оценки эффективности поражающего действия боеприпаса дистанционного действия и устройство для его осуществления: пат. 2519616 Рос. Федерация. № 2012152801/11; заявл. 07.12.2021; опубл. 20.06.2014, Бюл. № 17. 23 с.
6. Мужичек С.М., Скрынников А.А., Абрамов С.А. Методика определения показателя фугасного действия малокалиберных боеприпасов при проведении их натурных испытаний // Сб. тр. V Международного симпозиума «Специальная связь и безопасность информации: технология, производство, управление». 2017. С. 72–75.

7. Мужичек С.М., Ефанов В.В., Скрынников А.А., Абрамов С.А. Методический подход к автоматизации испытаний малокалиберных боеприпасов // Радиоэлектронные технологии. 2017. № 2. С. 69–73.

8. Мужичек С.М., Скрынников А.А., Абрамов С.А. и др. О методике автоматизированного проведения наземных испытаний малокалиберных боеприпасов // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 9–10 (111–112). С. 48–53.

9. Комраков Н.Ю., Мужичек С.М., Скрынников А.А. Применение байесовского подхода построения логистической регрессии при обработке результатов испытаний на стойкость элементов авиационных конструкций // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2018. Т. 21, № 2. С. 132–142.

10. Способ автоматизированной сравнительной оценки дистанционных боеприпасов по поражающему действию: пат. 2756991 Рос. Федерация. № 2020132775; заявл. 05.10.2020; опубл. 08.10.2021, Бюл. № 28. 17 с.

11. Желязков Е.П., Комраков Н.Ю., Крысин А.В. Методические основы определения исходных данных по уязвимости воздушных целей для оценок эффективности стрельбы

по ним малогабаритными ЗУР. Монография. Тверь: 2 ЦНИИ МО РФ, 2002. 68 с.

12. Комраков Н.Ю., Смагин П.В. Методика оценки параметров запреградного поля осколков, способного поразить жизненно важные агрегаты воздушных целей // Сб. ст. XXII Всероссийской научно-технической конференции школы-семинара «Передача, прием, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах». М.: РПА «АРП», 2011. С. 253–257.

13. ГОСТ 23554.1–79. Система управления качеством продукции. Экспертные методы оценки качества промышленной продукции. Организация и проведение экспертной оценки качества продукции. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1979. 31 с.

14. Мужичек С.М., Корзун М.А., Скрынников А.А., Савенко А.К. Методика создания специализированных цифровых двойников ударных боеприпасов (зажигательного действия) // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2023. № 2(127). С. 48–57.

15. Маслова Л.А., Савенко А.К., Корзун М.А. и др. О целесообразности использования специализированных цифровых двойников боеприпасов при разработке систем исходных данных по средствам и объектам поражения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2023. № 1(126). С. 30–40.