УДК 623.451

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_20

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ ХРАНЕНИИ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ БОЕПРИПАСОВ В РАЗЛИЧНОЙ ТАРЕ ПРИ ВНЕШНЕМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

A MODEL FOR PREDICTING EMERGENCY SITUATIONS WHEN STORING ARTILLERY AMMUNITION IN VARIOUS CONTAINERS UNDER EXTERNAL THERMAL INFLUENCE

Д-р техн. наук А.Б. Терентьев, канд. техн. наук Н.Н. Борисов, канд. техн. наук А.А. Ошкин, Д.Ф. Филиппов

D.Sc. A.B. Terentyev, Ph.D. N.N. Borisov, Ph.D. Oshkin A.A., D.F. Filippov

Филиал ВА МТО им. А.В. Хрулева (г. Пенза)

В статье приведены результаты разработки математической модели оценки вероятности возникновения аварийной ситуации при хранении артиллерийских боеприпасов на арсеналах и складах при внешнем тепловом несанкционированном действии. С этой целью была рассмотрена система двух случайных величин, время внешнего несанкционированного теплового действия и время взрыва боеприпаса. Таким образом, разработанная математическая модель позволяет определять максимальное время нахождения в штатном (безопасном) состоянии артиллерийского боеприпаса в различной таре, принимать научно обоснованные решения при разработке оптимальных схем складирования боеприпасов, для различных условий хранения изделий, а также проводить экономическую оценку использования тары из различных материалов.

Ключевые слова: артиллерийский выстрел, боеприпас, случайные величины, несанкционированное действие, аварийное состояние, математическая модель, тара.

The article presents the results of developing a mathematical model for assessing the probability of an emergency situation occurring during the storage of artillery ammunition in arsenals and warehouses under external thermal unauthorized action. To this end, a system of two random variables was considered, namely, the time of external unauthorized thermal action and the time of ammunition explosion. Thus, the developed mathematical model allows for determining the maximum time of an artillery ammunition in a normal (safe) state in various containers, making scientifically based decisions when developing optimal ammunition storage schemes for various storage conditions, and conducting an economic assessment of the use of containers made of different materials.

Keywords: artillery shot, ammunition, random variables, unauthorized action, emergency condition, mathematical model, packaging.

Наиболее реальную картину стойкости боеприпасов (БП) к несанкционированным действиям (НСД) дают натурные испытания. Однако, прежде чем перейти к таким испытаниям, необходимо оценить поведение БП при возникновении аварийной ситуации (АС). С этой целью проведено прогнозирование АС при несанкционированном нагреве выстрела на этапе хранения БП на основе усовершенствованной математической модели определения времени индукции реакции БП на тепловые НСД.

Несанкционированный внешний нагрев проявляется, в первую очередь, при пожаре. При этом условно могут наблюдаться два случая:

1) пожар непосредственно вблизи БП (в хранилище или в носителе БП);

2) пожар за стенкой хранилища или носителя БП.

Первый случай классифицируется как быстрый нагрев БП, второй случай — медленный нагрев [1].

В реальности могут встречаться совершенно разные условия возникновения и протекания НСД в виде нагрева, поэтому необходима расчетная оценка и прогнозирование поведения БП в этих условиях.

Метательные заряды в гильзе, как правило, хранятся в таре вместе со снарядом, пример размещения выстрела представлен на рисунке [2, 3].

Для прогнозирования вероятности перехода артиллерийского боеприпаса, находящегося в штатной или перспективной таре, в аварийное состояние при несанкционированном внешнем тепловом воздействии необходимо разработать математическую модель прогноза [4, 5]. Первым этапом разработки математической модели является построение расчетной схемы в АС при несанкционированном внешнем тепловом воздействии.

Формирование композиции случайных величин схемы перехода артиллерийского боеприпаса, находящегося в штатной или перспективной таре, в аварийное состояние при несанкционированном внешнем тепловом воздействии

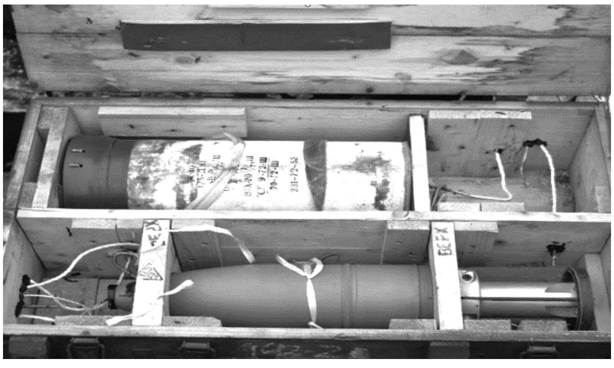
Переход артиллерийского боеприпаса, находящегося в штатной или перспективной таре при внешнем несанкционированном тепловом воздействии, происходит во времени, так как случайной величиной, описывающей рассматриваемые явления является время T, то для описания процесса целесообразно использовать фундаментальные положения теории вероятности и решать задачу в вероятностной постановке. Целесообразно смоделировать рассматриваемый процесс изменения состояний артиллерийского выстрела в вероятностной постановке [6–8].

С этой целью рассмотрим систему двух случайных величин (СВ) [9] — времени внешнего несанкционированного теплового воздействия, (горения тары с артиллерийским выстрелом) и времени взрыва боеприпаса $\left(T_i, T_j\right)$, $\left(i = 1, 2, ..., i_n\right)$, $\left(j = 1, 2, ..., j_n\right)$, с известными исчерпывающими характеристиками:

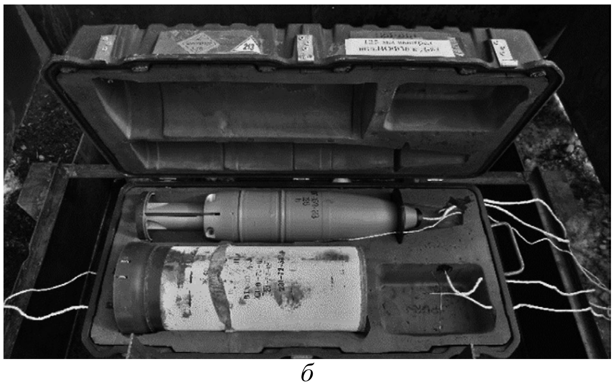
– функция распределения рассматриваемых двух СВ $F_1\left(t_1, t_2\right)$;

– функция плотности вероятности распределения рассматриваемых двух СВ $f_1\left(t_1, t_2\right)$.

Примем допущение, что СВ Y_1, Y_2 являются некоторыми функциями рассматриваемых двух СВ $\left(T_1, T_2\right)$:



а



б

Рис. 125-мм выстрел ВОФ36 в таре: а — осколочно-фугасный выстрел в деревянной таре; б — осколочно-фугасный выстрел в полимерной таре

$$\begin{cases} Y_1 = \Psi_1(T_1, T_2); \\ Y_2 = \Psi_2(T_1, T_2). \end{cases} \qquad (1)$$

Условие (1) позволяет считать, что система СВ (Y_1, Y_2) представляет собой функциональное преобразование системы рассматриваемых двух СВ (T_1, T_2).

Получим исчерпывающие характеристики системы СВ (Y_1, Y_2). Считаем, что функциональное преобразование является однозначным, каждой паре значений (t_1, t_2) соответствует определенная одна пара значений (y_1, y_2), и известны обратные преобразования:

$$T_1 = \Theta_1(Y_1, Y_2);$$
$$T_2 = \Theta_2(Y_1, Y_2).$$

Рассмотрим элементарную область dS_t в системе координат $(t_1 0 t_2)$. В силу однозначности преобразования в системе координат $y_1 0 y_2$ этой области отвечает определенная элементарная область dS_y.

Вероятность попадания случайной точки (T_1, T_2) в область dS_t будет равна вероятности попадания случайной точки (Y_1, Y_2) в область dS_y, что определяет фундаментальное условие

$$f_1(t_1, t_2)\, dS_t = f_2(y_1, y_2)\, dS_y. \qquad (2)$$

Условие (2) позволяет определить функцию плотности вероятности распределения

$$f_2(y_1, y_2) = f_1(t_1, t_2)\frac{dS_t}{dS_y}. \qquad (3)$$

В условии (3) величина $\dfrac{dS_t}{dS_y}$ является якобианом преобразования координат.

В общем случае вычисление функционального определителя системы функций по переменным t_1, t_2, ..., t_n производится в последовательности: имеем n функций от n переменных

$$\begin{cases} t_1 = f_1(y_1, y_2, ..., y_n); \\ t_2 = f_2(y_1, y_2, ..., y_n); \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots; \\ t_n = f_n(y_1, y_2, ..., y_n), \end{cases}$$

которые определены в n-мерной области D, имеют в ней непрерывные частные производные по всем переменным, представленные определителем

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial t_1}{\partial y_1} & \frac{\partial t_1}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial t_1}{\partial y_n} \\ \frac{\partial t_2}{\partial y_1} & \frac{\partial t_2}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial t_2}{\partial y_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial t_n}{\partial y_1} & \frac{\partial t_n}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial t_n}{\partial y_n} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\partial t_1}{\partial y_1} & \frac{\partial t_2}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial t_n}{\partial y_1} \\ \frac{\partial t_1}{\partial y_2} & \frac{\partial t_2}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial t_n}{\partial y_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial t_1}{\partial y_n} & \frac{\partial t_2}{\partial y_n} & \dots & \frac{\partial t_n}{\partial y_n} \end{vmatrix}.$$

Для системы СВ (Y_1, Y_2) якобиан преобразований координат вычисляется

$$\frac{dS_t}{dS_y} = J = \begin{vmatrix} \frac{\partial t_1}{\partial y_1} & \frac{\partial t_1}{\partial y_2} \\ \frac{\partial t_2}{\partial y_1} & \frac{\partial t_2}{\partial y_2} \end{vmatrix} = \frac{\partial t_1}{\partial y_1}\cdot\frac{\partial t_2}{\partial y_2} - \frac{\partial t_1}{\partial y_2}\cdot\frac{\partial t_2}{\partial y_1}.$$

Функция плотности положительна, что определяет ее вид

$$f_2(y_1, y_2) = f_1\big(\Theta_1(y_1, y_2), \Theta_2(y_1, y_2)\big)_2 |J|. \qquad (4)$$

Определим функцию плотности вероятности распределения системы СВ (T_1, T_2), имеющую нормальное распределение

$$f_1(t_1, t_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_{t_1}\sigma_{t_2}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t_1^2}{\sigma_{t_1}^2} + \frac{t_2^2}{\sigma_{t_2}^2}\right)},$$

для условий система СВ (R, Φ), определяемая

$$T_1 = R \cdot \cos\Phi;$$

$$T_2 = R \cdot \sin\Phi.$$

Определим функцию плотности вероятности распределения

$$f_2(r, \phi) = \frac{r}{2\pi\sigma_{t_1}\sigma_{t_2}} \cdot e^{-\frac{r^2}{2}\left(\frac{\cos^2\phi}{\sigma_{t_1}^2} + \frac{\sin^2\phi}{\sigma_{t_2}^2}\right)}.$$

Рассмотрим условие для задачи аварийного состояния.

1. Имеется система двух рассматриваемых СВ (T_1, T_2).

2. Известна функция плотности вероятности распределения рассматриваемых СВ $f_1(t_1, t_2)$.

3. Рассматривается СВ Z

$$Z = \Psi(T_1, T_2).$$

Необходимо определить функцию плотности вероятности распределения СВ Z.

Для решения задачи рассмотрим систему (Z, Z^*), где искусственно введем величину $Z^* = T_1$.

На основании условия (2) обратные функции имеют вид

$$\begin{cases} T_1 = \Theta_1(Z, Z^*) = Z^*; \\ T_2 = \Theta_2(Z, Z^*). \end{cases}$$

Используя условие (4), получим

$$f_2(z, z^*) = f_1(t_1, t_2)|J| = f_1(z^*, \Theta_2(z, z^*))|J|.$$

При условии $Z^* = T_2$, то функция плотности вероятности распределения имеет вид

$$f(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_2(\Theta_1(z, t_2), t_2)|J|\,dt_2.$$

Рассмотренные условия позволяют определить функцию плотности вероятности распределения суммы двух СВ.

Пусть СВ Z является суммой СВ T_1 и T_2, известна функция плотности вероятности распределения $f(t_1, t_2)$ системы. Требуется определить функцию плотности вероятности распределения $f(z)$ СВ Z.

Функцию плотности суммы СВ получим из условия

$$f(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t_1, z - t_1)\,dt_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} f(z - t_2, t_2)\,dt_2.$$

Данное математическое действие называется композицией распределения СВ.

Полученные характеристики могут быть применены для построения математической модели прогнозирования вероятности перехода артиллерийского боеприпаса, находящегося в штатной или перспективной таре в различное состояние при несанкционированном внешнем тепловом воздействии.

4. Разработка модели прогнозирования вероятности перехода артиллерийского БП, находящегося в штатной или перспективной таре, в аварийное состояние при несанкционированном внешнем тепловом воздействии.

Примем гипотезу: артиллерийский БП находится в штатной деревянной таре и подвергается несанкционированному внешнему тепловому воздействию до перехода в аварийное состояние — взрыва боеприпаса.

Время несанкционированного внешнего теплового воздействия на артиллерийский выстрел в деревянной таре обозначим через T_c.

Для анализа оценки случайного времени финального события T_c рассмотрим гипотезы о распределении t_i — времени штатного состояния артиллерийского выстрела, укупоренного в штатную тару:

$t_г$ — время горения штатной тары артиллерийского выстрела;

t_p — время взрыва артиллерийского выстрела.

Последовательно рассмотрим вероятности перехода артиллерийского выстрела, укупоренного в деревянную или перспективную тару из штатного состояния S_1 в состояние горения S_2 на основе гипотезы о нормальном законе распределения двух СВ времени T_c, $T_г$.

Используя формулу полной вероятности событий, определим вероятность P_{12} перехода артиллерийского выстрела из состояния S_1 в S_2 при условии, что

$$P_1(t = 0) = 1;$$

$$P_{12} = \int_0^{\infty} f(t_c)P(t_г < t_c)\,dt_c =$$

$$= \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} e^{-\left(\frac{t_c - a_c}{2\sigma_c^2}\right)^2} \cdot P(t_г < t_c)\,dt_c =$$

$$= \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} e^{-\left(\frac{t_c - a_c}{2\sigma_c^2}\right)^2} \cdot \left(\int_0^{\infty} f(t_c)\,dt_c - \int_{t_c}^{\infty} f(t_г)\,dt_г\right) dt_c.$$

Для количественной оценки используем функцию Лапласа, получаем вероятность перехода из штатного состояния S_1 в состояние горения S_2

$$P_{12}=\frac{1}{4}\cdot\left(1+\Phi\left(\frac{a_c}{E_c}\right)\right)\cdot\left(\Phi\left(\frac{a_г}{E_г}\right)+\Phi\left(\frac{t_c-a_г}{E_г}\right)\right),$$

где a_c, $a_г$ — математические ожидания СВ T_c, $T_г$ соответственно;

E_c, $E_г$ — срединные отклонения СВ T_c, $T_г$ соответственно.

С гипотезой для нормального закона распределения, вероятность P_{23} перехода из состояния горения S_1 в состояние взрыва S_3 получаем зависимость

$$P_{23}=\int_0^{\infty} f(t_c)P\left(t_г+t_p<t_c\right)dt_c.$$

При получении P_{23} рассматривая процедуру композиции распределений для определения $f(z)$, где $z=t_г+t_p$,
получим:

$$f(z)=\int_0^z\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_г}\cdot e^{-\frac{(t_г-a_г)^2}{2\sigma_г^2}}\cdot\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p}\cdot e^{-\frac{(z-t_г-a_p)^2}{2\sigma_p^2}}dt_г=$$

$$=\frac{1}{2\pi\sigma_г\sigma_p}\int_0^z e^{-\frac{(t_г-a_г)^2}{2\sigma_г^2}}\cdot e^{-\frac{(z-t_г-a_p)^2}{2\sigma_p^2}}dt_г.$$

Преобразуем показатель степени в подынтегральной функции.

Обозначим

$$\begin{cases}t_г-a_г=t,\\ z-a_z=\nu.\end{cases}$$

Для математического ожидания имеем

$$a_z=M(Z)=a_г+a_p,\ \ a_p=a_z-a_г.$$

Получаем

$$\frac{(t_г-a_г)^2}{\sigma_г^2}+\frac{(z-t_г-a_p)^2}{\sigma_p^2}=\frac{t^2}{\sigma_г^2}+\frac{(z-t_г-a_z+a_г)^2}{\sigma_p^2}=\frac{t^2}{\sigma_г^2}+\frac{\left((z-a_z)-(t_г-a_г)\right)^2}{\sigma_p^2}=\frac{t^2}{\sigma_г^2}+\frac{(\nu-t)^2}{\sigma_p^2}=$$

$$=\frac{t^2}{\sigma_г^2}+\frac{\nu^2-2\nu t+t^2}{\sigma_p^2}=\frac{t^2\sigma_p^2+\nu^2\sigma_г^2-2\nu t\sigma_г^2+t^2\sigma_г^2}{\sigma_г^2\sigma_p^2}=\frac{t^2\left(\sigma_г^2+\sigma_p^2\right)-2\nu t\sigma_г^2+\nu^2\sigma_г^2}{\sigma_г^2\sigma_p^2}=$$

$$=\frac{t^2\left(\sigma_г^2+\sigma_p^2\right)-2\nu t\sigma_г^2+\frac{\sigma_г^4}{\sigma_г^2+\sigma_p^2}\nu^2-\frac{\sigma_г^4}{\sigma_г^2+\sigma_p^2}\nu^2+\nu^2\sigma_г^2}{\sigma_г^2\sigma_p^2}=$$

$$=\frac{\sigma_г^2+\sigma_p^2}{\sigma_г^2\sigma_p^2}\left(t^2-\frac{2\nu t\sigma_г^2}{\sigma_г^2+\sigma_p^2}+\frac{\sigma_г^4\nu^2}{\left(\sigma_г^2+\sigma_p^2\right)^2}\right)-\frac{\nu^2\sigma_г^2}{\sigma_p^2\left(\sigma_г^2+\sigma_p^2\right)}+\frac{\nu^2}{\sigma_p^2}=\frac{\sigma_г^2+\sigma_p^2}{\sigma_г^2\sigma_p^2}\left(t-\frac{\sigma_г^2\nu}{\sigma_г^2+\sigma_p^2}\right)^2-\frac{\nu^2}{\sigma_г^2+\sigma_p^2}.$$

Введем обозначение

$$\frac{\sqrt{\sigma_г^2+\sigma_p^2}}{\sigma_г\sigma_p}\left(t-\frac{\sigma_г^2\nu}{\sigma_г^2+\sigma_p^2}\right)=u.$$

Получим

$$dt=\frac{\sigma_г\sigma_p}{\sqrt{\sigma_г^2+\sigma_p^2}}du;$$

$$f(z)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_г\sigma_p}e^{-\frac{\nu^2}{2\left(\sigma_г^2+\sigma_p^2\right)}}\times\int_0^z\frac{e^{-\frac{u^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}}\cdot\frac{\sigma_г\sigma_p}{\sqrt{\sigma_г^2+\sigma_p^2}}du.$$

С учетом условий

$$\begin{cases}\sigma_z=\sqrt{\sigma_г^2+\sigma_p^2};\\ \nu=z-a_z;\\ \int_0^z\frac{e^{-\frac{u^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}}du=1,\end{cases}$$

определяем

$$f(z)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z}e^{-\frac{(z-a_z)^2}{2\sigma_z^2}}.$$

Результатом композиции нормальных распределений двух СВ является также нормальное распределение.

Получаем вероятность

$$P\left(t_{\text{г}}+t_p<t_c\right)=\int_0^z f\left(z\right)dz=\int_0^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z}e^{-\frac{(z-a_z)^2}{2\sigma_z^2}}dz=$$

$$=\frac{1}{2}\left(\Phi\left(\frac{z-a_z}{E_z}\right)+\Phi\left(\frac{a_z}{E_z}\right)\right)=k,$$

число k находится с использованием функции Лапласа.

Вероятность перехода артиллерийского выстрела в состояние взрыва S_3 (аварийное состояние) P_{23} определяется как

$$P_{23}=\int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c}e^{-\frac{(t_c-a_c)^2}{2\sigma_c^2}}P\left(t_{\text{г}}+t_p<t_c\right)dt_c=$$
$$=k\cdot\int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c}e^{-\frac{(t_c-a_c)^2}{2\sigma_c^2}}dt_c=\frac{1}{2}k\cdot\left(1+\Phi\left(\frac{a_c}{E_c}\right)\right). \tag{5}$$

Учитывая зависимость (5), получаем конечное значение определения вероятности перехода артиллерийского боеприпаса в состояние взрыва S_3 (аварийное состояние) P_{23}

$$P_{23}=\frac{1}{2}k\cdot\left(1+\Phi\left(\frac{a_c}{E_c}\right)\right). \tag{6}$$

Таким образом, получена зависимость по определению вероятности перехода артиллерийского боеприпаса из состояния горения тары S_2 в состояние взрыва боеприпаса S_3 при несанкционированном внешнем тепловом воздействии.

Количественную оценку вероятности перехода артиллерийского выстрела, укупоренного в штатную или перспективную тару, в состояние взрыва, рассмотрим на основе гипотезы о нормальном законе распределения ее характеристик.

Описать любой случайный процесс нормальным законом распределения позволяет генерация нормально распределенных чисел. Для этого нормальное число можно взять в таблице значений функции Лапласа и получить случайное число по методу взятия обратной функции: $x=F^{-1}\left(r\right)$, где F — интегральная функция Лапласа.

Количественное прогнозирование вероятности перехода артиллерийского выстрела, укупоренного в штатную или перспективную тару из штатного состояния S_1 в состояние горения S_2 описывается временными характеристиками, характеризующими несанкционированное внешнее тепловое воздействие, измеряемыми в секундах:

a_c = 14 мин 30 с = 870 с — математическое ожидание времени несанкционированного внешнего теплового воздействия;

E_c = 154,3 с — срединное отклонение времени несанкционированного внешнего теплового воздействия;

$E_{\text{Г}}$ = 115,8 с — срединное отклонение для заданного значения времени несанкционированного внешнего теплового воздействия.

Величины a_c, E_c, $E_{\text{г}}$ определялись на основе проведения испытаний с использованием зависимости

$$E_{\text{Г}}=\frac{t_{\max}-t_{\min}}{b_n},$$

где b_n — коэффициент определения срединного отклонения по размаху результатов измерений.

Определим количественное значение вероятности перехода артиллерийского выстрела, укупоренного в штатную или перспективную тару, при несанкционированном внешним тепловом воздействии из штатного состояния S_1 в состояние горения S_2 P_{12} для нормального закона распределения СВ

$$P_{12}=$$
$$=\frac{1}{4}\cdot\left(1+\Phi\left(5{,}6400\right)\right)\cdot\left(\Phi\left(5{,}6430\right)+\Phi\left(1{,}8740\right)\right)=$$
$$=\frac{1}{4}\cdot 1{,}9998\cdot 1{,}7928=0{,}8963\approx 0{,}9.$$

Полученное значение $P_{12}\approx 0{,}9$ показывает высокую степень вероятности перехода артиллерийского выстрела из штатного состояния S_1 в состояние горения S_2 при несанкционированном внешнем тепловом воздействии. P_{12} является гипотезой для прогнозирования перехода артиллерийского выстрела из состояния горения S_2 в состояние взрыва S_3 с вероятностью P_{23}.

Таблица

Количественные оценки времени реакции артиллерийского боеприпаса на несанкционированное тепловое воздействие

Материал тары	Вероятность реакции боеприпаса	Время реакции, мин		Δt		Изменение времени реакции боеприпаса	Вероятность увеличения времени реакции боеприпаса, ΔP, %
		снаряда	заряда	снаряда	заряда		
Дерево	0,97 (97 %)	14,50	14,75	–	–	–	–
Пластик	0,96 (96 %)	19,45	20,00	4,95	5,25	1,3	33,1
Пластик с отражающей поверхностью внутреннего вкладыша	0,97 (97 %)	$T = 0$	22,00	0	7,52	1,47	50,2

Состояние артиллерийского боеприпаса, находящегося в штатной или перспективной таре при несанкционированном внешним тепловом воздействии описывается неубывающей функцией времени T, события перехода рассматриваемого выстрела из состояния S_2 в S_3, определяемое условием (6), достоверное с финальным исходом — взрыва боеприпаса.

$P_{23} = 0{,}96 \approx 1$, что соответствует реальной величине a_c = 14,5 мин.

Расчеты проводились в сравнении с боеприпасом, укупоренным в штатную деревянную тару. Результаты расчетов представлены в таблице.

Полученные результаты позволяют проводить оценку огнестойкости штатной тары из перспективных материалов для хранения боеприпасов. Так использование пластиковой тары увеличивает на 33,1 % ее огнестойкость, чем деревянной, а пластиковой тары с отражающей поверхностью на 50,2 % больше огнестойкость, чем в деревянной, что снижает вероятность перехода боеприпаса в аварийное состояние при несанкционированном внешним тепловом воздействии.

При проведении испытаний по тепловому воздействию на боеприпасы, укупоренные в пластиковую тару, имели место случаи отсутствия взрыва по окончанию горения тары. На данный момент их можно считать анормальными результатами измерений, которые требуют проведения дальнейших исследований.

Выводы

Таким образом, по результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы.

1. Разработанная математическая модель прогнозирования вероятности перехода артиллерийского боеприпаса, находящегося в штатной или перспективной таре, в аварийное состояние при несанкционированном внешнем тепловом воздействии показала свою работоспособность при описании и анализе горения рассматриваемой тары с боеприпасами.

2. Модель позволяет определять максимальное время нахождения в штатном состоянии артиллерийского боеприпаса, находящегося в таре из перспективных материалов.

3. Разработанная математическая модель позволяет принимать научно обоснованные решения при разработке оптимальных схем складирования боеприпасов для различных условий хранения изделий.

4. Модель позволяет проводить экономическую оценку использования тары из различных материалов.

Список источников

1. Боеприпасы повышенной стойкости к опасным внешним воздействиям: особенности конструирования, испытаний и эксплуатации / Б.В. Мацеевич [и др.]. Красноармейск: ОАО «КНИИМ», 2014. 168 с.

2. Основы проектирования, производства и испытаний боеприпасов и их элементов. В 3-х ч. Часть 3. Основы производства и испытаний энергонасыщенных материалов / А.Б. Терентьев [и др.]. Пенза: Филиал ВА МТО, Пенз. арт. инж. ин-т, 2020. 426 с.

3. Борисов Н.Н., Ошкин А.А., Филиппов Д.Ф. Сборник научных статей по материалам НПК «Тыловое обеспечение войск (сил):

современные особенности, проблемные вопросы и пути их решения». Вольск: ВВИМО, 2023. С. 115–123.

4. Колмогоров А.Н. Основные понятия теории вероятностей. М.: URSS: Изд-во Ленанд, 2025. 120 с.

5. Филиппов Д.Ф., Борисов Н.Н. и др. Сборник трудов IX-й Всероссийской НПК «Актуальные проблемы современного инженерного образования». Омск: ОАБИИ, 2023. С. 142–147.

6. Феллер В.А. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т. 1; пер. с пересмотренного 3-го англ. изд. Ю.В. Прохорова; предисл. А.Н. Колмогорова. М.: URSS: Изд-во Ленанд, 2009. 527 с.

7. Феллер В.А. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т. 2. М.: URSS: Изд-во Ленанд, 2009. 751 с.

8. Боровков А.А. Теория вероятностей: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 010100 «Математика». Изд. 5-е, сущ. перер. и доп. М.: URSS: Изд-во Ленанд, 2009. 652 с.

9. Гнеденко Б.В., Колмогоров А.Н. Предельные распределения для сумм независимых случайных величин. Изд. 2-е, перераб. и сущ. доп. М.: URSS: Изд-во Ленанд, 2025. 328 с.

References

1. Ammunition of increased resistance to dangerous external influences: features of design, testing and operation / B.V. Matseevich [et al.]. Krasnoarmeysk: JSC «KNIIM», 2014. 168 p.

2. Fundamentals of design, production and testing of ammunition and their elements. In 3 parts. Part 3. Fundamentals of production and testing of energy-saturated materials / A.B. Terentyev [et al]. Penza: Branch of VA MTO, Penza. art. eng. in-t, 2020. 426 p.

3. Borisov N.N., Oshkin A.A., Filippov D.F. Collection of scientific articles based on the materials of the NPC «Logistics of troops (forces): modern features, problematic issues and ways to solve them». Volsk: VVIMO, 2023. Pp. 115–123.

4. Kolmogorov A.N. Basic concepts of probability theory. Moscow: URSS: Lenand, 2025. 120 p.

5. Filippov D.F., Borisov N.N. et al. Proceedings of the ixth All-Russian Scientific and Technical Conference «Actual problems of modern engineering education». Omsk: OABII, 2023. Pp. 142–147.

6. Feller V.A. Introduction to probability Theory and its applications. Vol. 1: translated from the revised 3rd English ed. by Yu.V. Prokhorov; preface by A.N. Kolmogorov. Moscow: URSS: Lenand, 2009. 527 p.

7. Feller V.A. Introduction to probability theory and its applications. Vol. 2. Moscow: URSS: Lenand, 2009. 751 p.

8. Borovkov A.A. Probability theory: a textbook for students of higher educational institutions studying in the field of 010100 «Mathematics» / A.A. Borovkov. 5th Ed., substantially revised and add. Moscow: URSS, 2009. 652 p.

9. Gnedenko B.V., Kolmogorov A.N. Marginal distributions for sums of independent random variables. Moscow: URSS: Lenand, 2025. 328 p.