

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ БОЕПРИПАСОВ С МАЛОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ К ВНЕШНИМ ТЕПЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ ВЗРЫВЧАТЫМИ СОСТАВАМИ

А. А. Ошкин¹, Д. Ф. Филиппов², А. И. Годунов³

^{1,2} Филиал Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе, Пенза, Россия

³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ oshkin.aa@mail.ru, ² filippov.dima@mail.ru, ³ godunov@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность темы обусловлена ее практической значимостью для решения задач эксплуатационной безопасности боеприпасов, находящихся на объектах хранения, когда необходимо знать время взрыва изделий. Предложена разработанная аналитическая модель определения допустимого времени воздействия на боеприпасы поражающих факторов внешней среды (молнии и ландшафтного пожара). *Материалы и методы.* Моделирование процесса возникновения аварийных ситуаций при взрыве штатных или перспективных боеприпасов с малочувствительными взрывчатыми составами при внешнем тепловом воздействии можно описать схемой марковского случайного процесса со счетным числом состояний. Использование марковской модели позволяет применить хорошо разработанный и апробированный математический аппарат и получить заведомо надежный результат вследствие принятых достаточно жестких ограничений. *Результаты и выводы.* Таким образом, разработанная аналитическая модель определения допустимого времени воздействия на боеприпасы поражающих факторов внешней среды может быть использована для прогнозирования эксплуатационной безопасности изделий, находящихся на хранении или в сборочно-ремонтном производстве арсеналов комплексного хранения ракет и боеприпасов. Полученный алгоритм определения допустимого времени воздействия на боеприпасы поражающих факторов внешней среды целесообразно использовать при разработке перспективных боеприпасов с малочувствительными взрывчатыми составами.

Ключевые слова: эксплуатационная безопасность, поражающие факторы внешней среды, аналитическая модель, тепловое воздействие, боеприпас

Для цитирования: Ошкин А. А., Филиппов Д. Ф., Годунов А. И. Методика оценки эксплуатационной безопасности боеприпасов с малочувствительными к внешним тепловым воздействиям взрывчатыми составами // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 81–87. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-9

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE OPERATIONAL SAFETY OF AMMUNITION WITH EXPLOSIVES THAT ARE INSENSITIVE TO EXTERNAL THERMAL INFLUENCES

A.A. Oshkin¹, D.F. Filippov², A.I. Godunov³

^{1,2} Branch of the Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev in Penza, Penza, Russia

³ Penza State University, Penza, Russia

¹ oshkin.aa@mail.ru, ² filippov.dima@mail.ru, ³ godunov@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the article is due to its practical significance for solving the problems of operational safety of ammunition located at storage facilities, when it is necessary to know the time of explosion of products. The article proposes a developed analytical model for determining the permissible exposure time for ammunition to damaging environmental factors (lightning and landscape fire). *Materials and methods.* Modeling of the process of emergency situations during the explosion of standard or promising ammunition with low-sensitivity explosive compositions under external thermal influence can be described by a Markov random process scheme with a countable number of states. The use of the Markov model makes it possible to apply a well-developed and proven mathematical apparatus and obtain a deliberately reliable result due to the rather strict restrictions adopted. *Results and conclusions.* Thus, the developed analytical model for determining the permissible exposure time for ammunition to damaging environmental factors can be used to predict the operational safety of products in storage or in the assembly and repair production of arsenals for complex storage of missiles and ammunition. The obtained algorithm for determining the

permissible time of exposure to damaging environmental factors on ammunition is advisable to use in the development of promising ammunition with low-sensitivity explosive compositions.

Keywords: operational safety, damaging environmental factors, analytical model, thermal impact, ammunition

For citation: Oshkin A.A., Filippov D.F., Godunov A.I. Methodology for assessing the operational safety of ammunition with explosives that are insensitive to external thermal influences. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):81–87. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-9

Введение

В последние годы особое внимание при разработке боеприпасов уделяется вопросам обеспечения их безопасности, сохранности и защищенности на всех стадиях жизненного цикла, моделированию аварийных ситуаций и прогнозированию их последствий, повышению безопасности боеприпасов при несанкционированных действиях. В последние годы из-за несанкционированных действий на боеприпасы, хранимые на арсеналах, экономике страны нанесен огромный ущерб.

Анализируя содержание операционной деятельности применительно к боеприпасам на различных этапах жизненного цикла, можно отметить, что ее суть сводится к оценке безопасности, надежности и эффективности действия после того, как на них осуществлены различные внешние опасные воздействия [1].

Поскольку избежать единичного взрыва боеприпасов практически невозможно, особенно при террористических действиях, то основная задача состоит в том, чтобы этот единичный взрыв не привел к цепной реакции – массовым взрывам других средств поражений, находящихся на арсенале или в боекомплекте носителя боеприпасов (танка, самоходной артиллерийской установки, автомобиля и т.д.).

Методика оценки и прогнозирования эксплуатационной безопасности

Достаточно строгим методом исследования боя является его описание с помощью вероятностных моделей [2]. В отличие от аналитических моделей вероятностные модели учитывают стохастический характер протекания боя и позволяют более полно его проанализировать. Широкое распространение получили вероятностные модели, построенные на основе марковских и полумарковских процессов [3].

Время несанкционированного внешнего теплового воздействия на боеприпасы в форме быстрого или медленного нагрева несравнимо мало со временем их хранения, поэтому правомерным является применение в данном случае вероятностных моделей на основе марковских процессов.

Моделирование процесса возникновения аварийных ситуаций при взрыве штатных или перспективных боеприпасов с малочувствительными взрывчатыми составами при внешнем тепловом воздействии можно описать схемой марковского случайного процесса со счетным числом состояний (особо опасных операций) $S_i(t), i = \overline{1, n}$, и непрерывным временем при учете гипотез, рассматриваемых в области ограничений $\Omega(t)$ и векторов управляющих воздействий $\overline{K(t)}$.

Область ограничений $\Omega(t)$ представляет возможность пребывания боеприпасов в аварийной ситуации при внешнем тепловом воздействии к моменту времени t . Совокупность векторов управляющих воздействий $\overline{K(t)}$ включает временные параметры развития аварийной ситуации при внешнем тепловом воздействии на боеприпас.

Использование марковской модели позволяет применить хорошо разработанный и апробированный математический аппарат и получить заведомо надежный результат вследствие принятых достаточно жестких ограничений при разработке самого аппарата.

На рис. 1 приведен граф состояний штатных или перспективных боеприпасов с малочувствительными взрывчатыми составами, находящимися на площадке открытого хранения, в результате внешнего теплового воздействия, вызванного, например, ландшафтным пожаром соседнего штабеля с артиллерийскими выстрелами, хранящимися тоже на площадке открытого хранения.

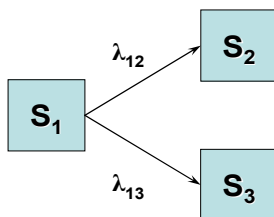


Рис. 1. Граф состояний боеприпасов при внешнем тепловом воздействии

В соответствии с графом состояний и принятой схемой полная группа состояний боеприпаса включает в себя: S_1 – исходное состояние боеприпаса перед внешним тепловым воздействием; S_2 – аварийное состояние боеприпаса в результате их взрыва, когда время теплового воздействия сравнялось или превысило время задержки вспышки взрывчатого состава боеприпаса; S_3 – безаварийное состояние боеприпаса, когда время теплового воздействия не превысило время задержки вспышки взрывчатого состава.

В соответствии с расчетной схемой можно составить систему дифференциальных уравнений А. Н. Колмогорова. Она имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dp_1}{dt} &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13})p_1; \\ \frac{dp_2}{dt} &= \lambda_{12}p_1; \\ \frac{dp_3}{dt} &= \lambda_{13}p_1, \end{aligned} \quad (1)$$

где p_i – вероятность нахождения боеприпасов в i -м состоянии; λ_{ij} – плотность вероятности перехода боеприпасов из i -го в j -е состояние.

Случайными временными величинами, характеризующими переход комплектующих элементов боеприпасов в состояния S_{ij} , являются $\bar{t}_{\text{возд}}$ и $\bar{t}_{\text{вспыш}}$.

Величина $\bar{t}_{\text{возд}}$ представляет собой математическое ожидание времени внешнего теплового воздействия на боеприпас.

Величина $\bar{t}_{\text{вспыш}}$ – математическое ожидание времени задержки вспышки штатного и малочувствительного взрывчатого состава.

Вероятности переходов p_{ij} можно выразить через времена теплового воздействия и задержки вспышки:

$$p_{12} = \frac{\bar{t}_{\text{возд}}}{\bar{t}_{\text{возд}} + \bar{t}_{\text{вспыш}}}; \quad p_{13} = \frac{\bar{t}_{\text{вспыш}}}{\bar{t}_{\text{возд}} + \bar{t}_{\text{вспыш}}}. \quad (2)$$

Тогда плотности вероятности перехода боеприпасов из состояния S_1 в состояния S_2 и S_3 можно описать следующими выражениями:

$$\lambda_{12} = \frac{\bar{t}_{\text{возд}}}{\bar{t}_{\text{возд}}(\bar{t}_{\text{вспыш}} + \bar{t}_{\text{возд}})}; \quad \lambda_{13} = \frac{\bar{t}_{\text{вспыш}}}{\bar{t}_{\text{вспыш}}(\bar{t}_{\text{вспыш}} + \bar{t}_{\text{возд}})}. \quad (3)$$

Полученные выражения являются уравнениями связи. Начальными условиями решения системы уравнений (2) и (3) являются условия, что при $t = 0$ $P_1(t) = 1$, $P_2(t) = 0$ и $P_3(t) = 0$.

Они включают обыкновенные уравнения и решаются численно методом Рунге – Кутта в информационной среде *Mathcad 15*.

Контроль правильности решения системы уравнений осуществляется по условию нормировки, т.е.

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1.$$

Задачу оценки и прогнозирования эксплуатационной безопасности штатных и перспективных боеприпасов с малочувствительными к внешним тепловым воздействиям взрывчатым составом можно решить и аналитическим способом. Система дифференциальных уравнений тогда будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} p_1(t) &= p_{10} e^{-(\lambda_{12} + \lambda_{13})t}; \\ p_2(t) &= p_{20} + \frac{\lambda_{12} p_{10}}{\lambda_{12} + \lambda_{13}} \left[1 - e^{-(\lambda_{12} + \lambda_{13})t} \right]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$p_3(t) = p_{30} + \frac{\lambda_{13} p_{10}}{\lambda_{12} + \lambda_{13}} \left[1 - e^{-(\lambda_{12} + \lambda_{13})t} \right],$$

где p_{10}, p_{20}, p_{30} – начальные значения вероятностей состояния.

Разработанные модели решения задачи оценки и прогнозирования тепловой стойкости штатного и перспективного снаряжения боеприпасов положены в основу предлагаемой методики. Блок-схема методики прогнозирования эксплуатационной безопасности штатных и перспективных боеприпасов представлена на рис. 2.

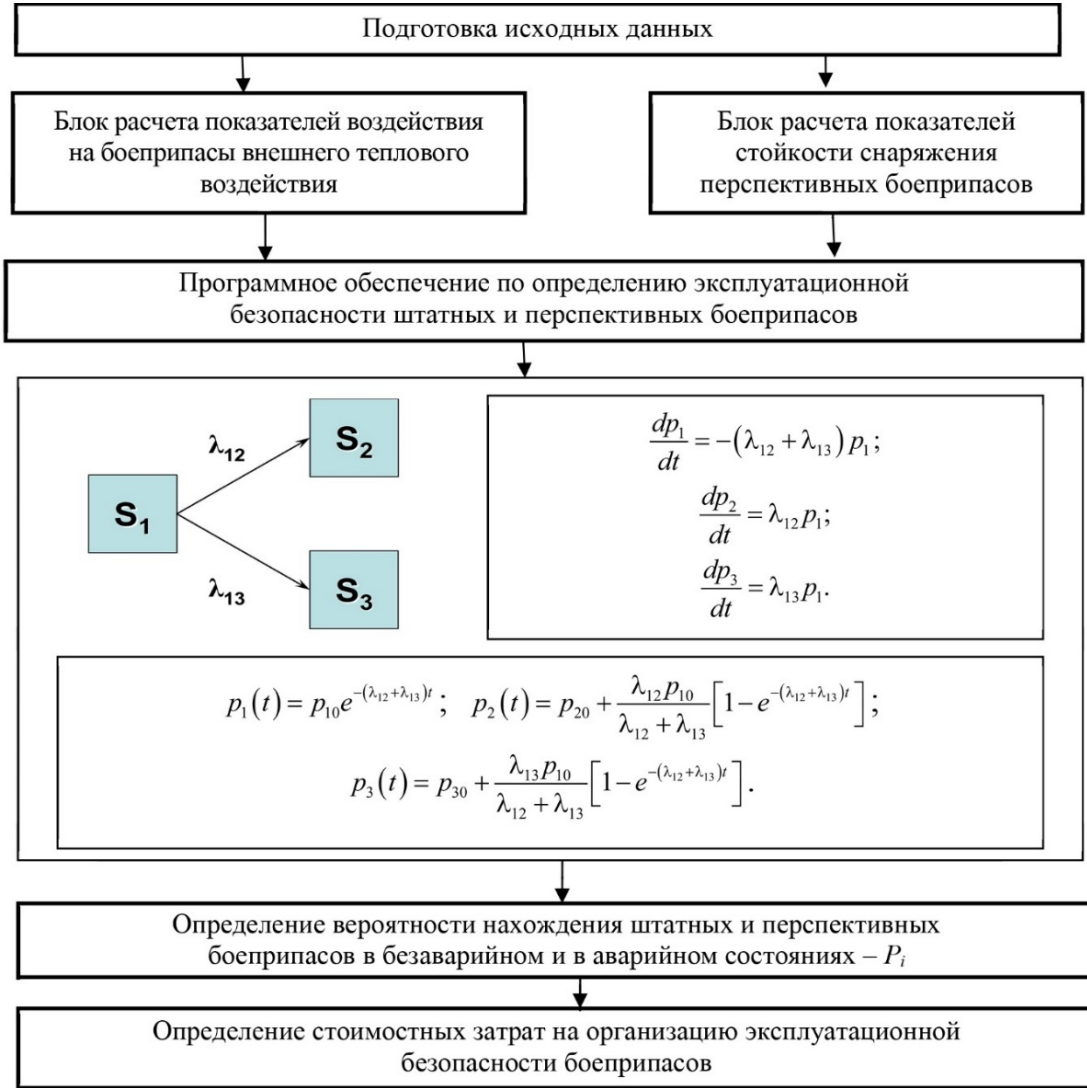


Рис. 2. Структурная блок-схема методики

Функционально структурная блок-схема методики состоит из трех модулей: модуль исходной информации, модуль функциональный и модуль информационный.

В свою очередь каждый модуль содержит блоки. Модуль исходной информации включает: блок расчета показателей внешнего теплового воздействия на боеприпасы и блок расчета показателей тепловой стойкости снаряжения перспективных боеприпасов. Выходным параметром модуля исходной информации является время задержки вспышки малочувствительного взрывчатого состава $t_{вспыш}$, по истечении которого происходит взрыв боеприпаса [4].

Функциональный модуль является основным и содержит вероятностную и аналитическую математические модели, прогнозирующие вероятности нахождения боеприпасов в безаварийном или в аварийном состояниях при времени $t_{возд}$ внешнего теплового воздействия. В блоках функционального модуля производятся решения уравнений численным методом Рунге – Кутты 4-го порядка и аналитическим методом по определению вероятности P_i нахождения боеприпасов в безаварийном или

в аварийном состояниях. Завершающим блоком функционального модуля является определение стоимостных затрат на организацию эксплуатационной безопасности боеприпасов.

Информационный блок представляет на экран или листинг графическую или табличную информацию, полученную по результатам вычислительных экспериментов. Программное обеспечение методики оценки и прогнозирования эксплуатационной безопасности штатных и перспективных боеприпасов с малочувствительными взрывчатыми составами к внешнему тепловому воздействию представляет собой программный продукт «Оценка и прогнозирование эксплуатационной безопасности боеприпасов», структура которого смоделирована в среде *MathCad 15*.

Вычислительный эксперимент по определению вероятности взрыва штатных боеприпасов при внешнем тепловом воздействии в виде медленного нагрева проводился при значениях временных характеристик, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Численные значения временных характеристик для штатных боеприпасов

Номер варианта	МОЖ времени теплового воздействия, $t_{\text{возд}}$, ч.	МОЖ времени вспышки ВВ, $t_{\text{вспыш}}$, ч.
1	13	15
2	16	15

Начальные условия: при $t = 0$ $P_1 = 1, P_2 = 0, P_3 = 0$.

Результаты решения системы дифференциальных уравнений приведены на рис. 3.

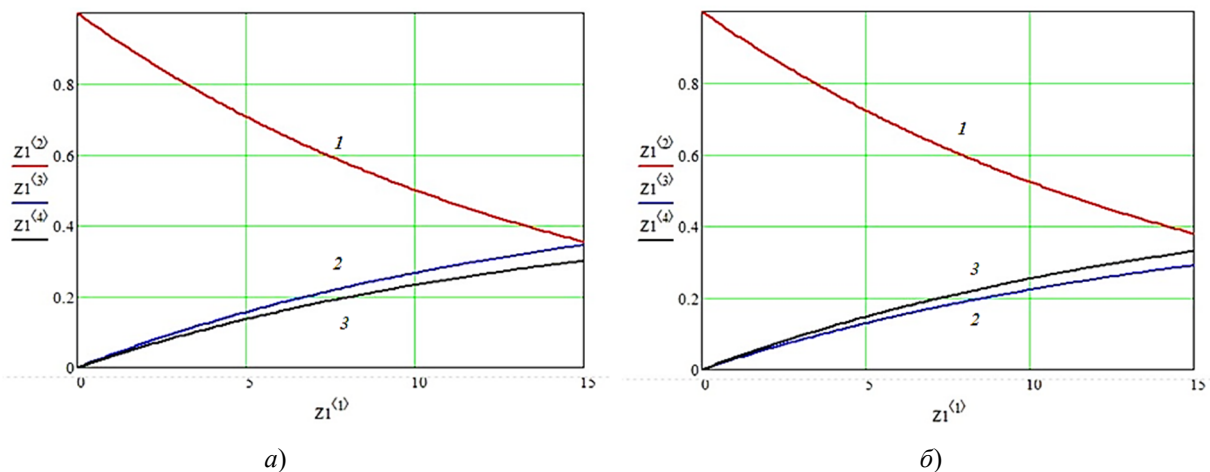


Рис. 3. Вероятности возникновения аварийной ситуации для штатных боеприпасов при времени теплового воздействия, меньшем (а) и большем (б) времени задержки вспышки:

- 1 – вероятность нахождения боеприпасов в исходном состоянии до начала теплового воздействия;
- 2 – вероятность нахождения боеприпасов в аварийном состоянии после теплового воздействия;
- 3 – вероятность нахождения боеприпасов в безопасном состоянии после теплового воздействия

Вычислительный эксперимент по определению вероятности взрыва перспективных боеприпасов, содержащих малочувствительные взрывчатые составы, при внешнем тепловом воздействии в виде медленного нагрева проводился при значениях временных характеристик, приведенных в табл. 2.

Таблица 2

Численные значения временных характеристик для перспективных боеприпасов

Номер варианта	МОЖ времени теплового воздействия, $t_{\text{возд}}$, ч	МОЖ времени вспышки ВВ, $t_{\text{вспыш}}$, ч
1	23	24
2	26	24

Начальные условия: при $t = 0$ $P_1 = 1, P_2 = 0, P_3 = 0$.

Результаты решения системы дифференциальных уравнений приведены на рис. 4.

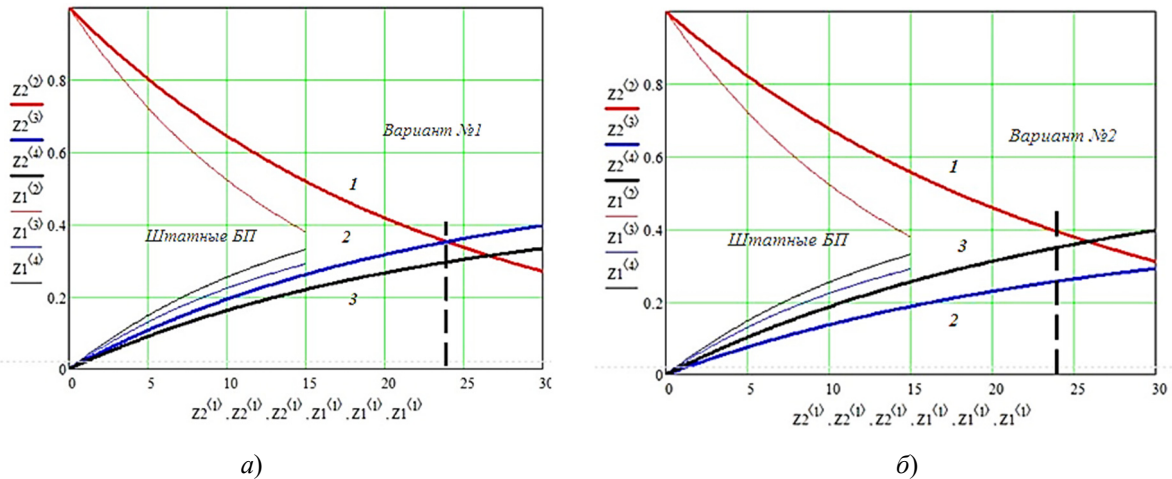


Рис. 4. Вероятности возникновения аварийной ситуации для перспективных боеприпасов при времени теплового воздействия, меньшем (а) и большем (б) времени задержки вспышки:

- 1 – вероятность нахождения боеприпасов в исходном состоянии до начала теплового воздействия;
- 2 – вероятность нахождения боеприпасов в аварийном состоянии после теплового воздействия;
- 3 – вероятность нахождения боеприпасов в безопасном состоянии после теплового воздействия

Анализ графиков показывает, что безопасное время внешнего теплового воздействия на перспективные боеприпасы, содержащие малочувствительные взрывчатые составы, значительно увеличилось и составило 60 %, поэтому возможность проведения работ по предупреждению взрыва также возросло. Вероятность нахождения перспективных боеприпасов в безопасном состоянии при медленном тепловом нагреве по сравнению со штатными повысилась с 0,38 до 0,55 (на 45 %), что свидетельствует об увеличении их эксплуатационной безопасности.

Заключение

Таким образом, разработанная методика определения допустимого времени воздействия на боеприпасы поражающих факторов внешней среды может быть использована для прогнозирования эксплуатационной безопасности изделий, находящихся на хранении или в сборочно-ремонтном производстве арсеналов комплексного хранения ракет и боеприпасов. Алгоритм определения допустимого времени воздействия на боеприпасы поражающих факторов внешней среды целесообразно использовать при разработке перспективных боеприпасов с малочувствительными разрывными составами. Алгоритм позволяет определить, каким должно быть допустимое время воздействия на боеприпас поражающих факторов внешней среды в виде молнии или ландшафтного пожара $t_{\text{возд}}$, чтобы в момент времени t вероятность нахождения боеприпасов в состоянии S_1 (исходное состояние) или в S_3 (безаварийное состояние) составляла бы значение p_1 , если в начальный момент времени она равна p_{10} .

Список литературы

1. Китаев В. Н. Оптимальные пути решения конструкторских задач на примере создания надежного электро-механического поляризованного переключателя // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 2. С. 113–116.
2. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов : учеб. пособие для втузов. 13-е изд. М. : Наука, 1985. Т. 2. 560 с.
3. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М. : Наука, 1969. 564 с.
4. Северцев Н. А., Зацаринный А. А. Учет случайности нагрузки и прочности в расчетах надежности конструкций оборонных технических систем для безопасной работы // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 4. С. 90–96.

References

1. Kitaev V.N. Optimal ways to solve design problems by the example of creating a reliable electromechanical polarized switch. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;2:113–116. (In Russ.)

2. Piskunov N.S. *Differentsial'noe i integral'noe ischisleniya dlya vtuzov: ucheb. posobie dlya vtuzov. 13-e izd. = Differential and integral calculus for higher education institutions : a textbook for higher education institutions. 13th ed.* Moscow: Nauka, 1985;2:560. (In Russ.)
3. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostey = Theory of probability.* Moscow: Nauka, 1969:564. (In Russ.)
4. Severtsev N.A., Zatsarinnyu A.A. Taking into account the randomness of load and strength in calculations of reliability of structures of defense technical systems for safe operation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2017;(4):90–96. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Александрович Ошкин

кандидат технических наук,
начальник отдела организации научной работы
и подготовки научно-педагогических кадров,
Филиал Военной академии материально-
технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе
(Россия, Пензенская область, Военный городок)
E-mail: oshkin.aa@mail.ru

Дмитрий Федорович Филиппов

адъюнкт,
Филиал Военной академии материально-
технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе
(Россия, Пензенская область, Военный городок)
E-mail: filippov.dima@mail.ru

Анатолий Иванович Годунов

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
профессор кафедры автоматизации и телемеханики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: godunov@pnzgu.ru

Aleksandr A. Oshkin

Candidate of technical sciences,
head of the department of organization of scientific work
and training of scientific and pedagogical personnel,
Branch of the Military Academy of Logistics
named after Army General A.V. Khrulev in Penza
(Military town, Penza region, Russia)

Dmitry F. Filippov

Adjunct,
Branch of the Military Academy of Logistics
named after Army General A.V. Khrulev in Penza
(Military town, Penza region, Russia)

Anatoly I. Godunov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
professor of the sub-department
of automation and telemechanics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 11.01.2024

Поступила после рецензирования/Revised 22.02.2024

Принята к публикации/Accepted 09.03.2024