

Всероссийский научно-исследовательский институт «Центр»
АО «НПО Спецматериалов»

ISSN 2306-1456

ВОПРОСЫ ОБОРОННОЙ ТЕХНИКИ

Серия 16

**Технические средства
противодействия терроризму**

Издается с 1937 г.

Выпуск 1–2 (199–200)



Москва • 2025

Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. — М.: ВНИИ «Центр». — СПб.: АО «НПО Спецматериалов». — СПб.: Любавич. 2025. Вып. 1–2 (199–200).

Представлен широкий круг вопросов, освещающих технические средства предотвращения и противодействия терроризму; их отработку и испытания; материалы и технологии.

Адрес редакции: 195277, Санкт-Петербург, Б. Сампсониевский пр., 28А, литера Б.
Тел. (812) 542-98-50; факс: (812) 542-75-58, E-mail: vot@npo-sm.ru

В соответствии с Решением президиума ВАК Минобрнауки России научно-технический журнал «Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму» включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Сайт vak.ed.gov.ru раздел — «Нормативно-справочная информация»,
подраздел — «Перечень рецензируемых научных изданий»

Председатель редакционного совета С.И. Довгучиц
Chairman of editorial board S.I. Dovguchits

Главный редактор А.Г. Шалковский
Chief editor A.G. Shalkovsky

Редакционный совет:

*д.в.н., профессор В.И. Бабенков, д.т.н. А.В. Ноздрачев,
д.т.н., профессор В.А. Петров, д.т.н., профессор А.А. Рахманов,
д.т.н., профессор М.В. Сильников (зам. председателя редсовета), д.м.н., профессор В.Б. Симоненко,
д.т.н., профессор Е.Ф. Харченко*

Editorial board:

*D.Sc. V.I. Babenkov, D.Sc. A.V. Nozdrachev, D.Sc. V.A. Petrov,
Ph.D. A.A. Rakhmanov, D.Sc. M.V. Silnikov, D.Sc. V.B. Simonenko, D.Sc. E.F. Kharchenko*

Редакционная коллегия:

*к.т.н. А.С. Алешин, д.т.н., профессор В.Г. Анисимов, д.в.н., д.т.н., профессор В.С. Артамонов,
д.т.н. В.И. Бабичев, д.ю.н., профессор В.Ю. Владимиров, д.т.н., профессор Д.П. Гасюк,
д.ф.-м.н., профессор Н.А. Иванов, к.т.н., профессор А.А. Карачев, д.т.н., профессор В.А. Кежаев,
д.т.н., профессор О.Г. Лапука, д.т.н. А.И. Михайлин, к.т.н., доцент А.Н. Рогалев,
к.т.н., доцент А.М. Сазыкин (отв. секретарь), д.т.н., профессор О.А. Финько,
к.с.н. Е.Б. Харченко, д.т.н. М.В. Чернышов, д.в.н., к.т.н., профессор С.В. Чварков*

Editorial assembly:

*Ph.D. A.S. Aleshin, D.Sc. V.G. Anisimov, D.Sc. V.S. Artamonov, D.Sc. V.I. Babichev, D.Sc. B.Yu. Vladimirov,
D.Sc. D.P. Gasyuk, D.Sc. N.A. Ivanov, Ph.D. A.A. Karachev, D.Sc. V.A. Kezhaev, Ph.D. O.G. Lapuka,
D.Sc. A.I. Mikhaylin, Ph.D. A.N. Rogalev, Ph.D. A.M. Sazykin, D.Sc. O.A. Fin'ko, Ph.D. E.B. Kharchenko,
D.Sc. M.V. Chernyshov, Ph.D. S.V. Chvarkov*

**Подписной индекс 41271 в объединенном каталоге «Пресса России»
Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования
и размещен на сайте Научной Электронной Библиотеки**

Учредители и издатели: ФГУП «ВНИИ «Центр»
Адрес: 123242, г. Москва, ул. Садовая-Кудринская, дом 11, стр. 1
АО «НПО Спецматериалов»
Адрес: 195277, Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., 28А, литера Б

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 - 81076 от 02.06.2021,
Федеральная служба по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор)

© ВНИИ «Центр», 2025
© АО «НПО Спецматериалов», 2025

УДК 338:245:339.9

doi: 10.53816/23061456_2025_1–2_3

**ЛОГИСТИЧЕСКИ-ИНТЕГРАЦИОННАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ
СИСТЕМЫ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГРУППИРОВКИ
ВОЙСК (СИЛ) В НОВЫХ РЕГИОНАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**LOGISTIC AND INTEGRATION ASSESSMENT OF THE STABILITY
OF THE LOGISTICS SUPPORT SYSTEM FOR THE GROUPING OF TROOPS
(FORCES) IN THE NEW REGIONS OF THE RUSSIAN FEDERATION**

Кахраманов Илгар Марш оглы

Kahramanov Ilgar Marish ogly

Военная академия материально-технического обеспечения им. А.В. Хрулева

В статье рассмотрен методический подход к логистически-интеграционной оценке устойчивости системы материально-технического обеспечения группировки войск (сил) в новых регионах Российской Федерации. Предложенный методический подход дает комплексное представление о текущем состоянии и динамике эффективности деятельности системы материально-технического обеспечения группировки войск (сил) на новых территориях России, позволяет отследить угрозы. По заключению автора, научная новизна данной статьи заключается в новом подходе к оценке устойчивости системы материально-технического обеспечения группировки войск (сил) на новых территориях, основу которого составляет поэтапная логистически-интеграционная оценка, которая предполагает выбор и обоснование системы комплексных показателей для оценки каждой функциональной составляющей военно-экономической устойчивости системы материально-технического обеспечения.

Ключевые слова: оценка, устойчивость, территория, показатель, материально-техническое обеспечение, группировка войск.

The article considers a methodological approach to the logistic and integration assessment of the stability of the logistics system of a group of troops (forces) in new regions of the Russian Federation. The proposed methodological approach provides a comprehensive view of the current state and dynamics of the effectiveness of the logistics support system for the deployment of troops (forces) in the new territories of Russia, and allows us to track threats. According to the author, the scientific novelty of this article lies in a new approach to assessing the stability of the logistics support system for a group of troops (forces) in new territories, based on a phased logistic and integration assessment, which involves the selection and justification of a system of integrated indicators to assess each functional component of the military-economic stability of the logistics system.

Keywords: assessment, stability, territory, indicator, material and technical support, grouping of troops.

Наиболее важное значение при оценке военно-экономического потенциала новых регионов Российской Федерации в интересах Вооруженных

сил будет иметь уровень устойчивости системы материально-технического обеспечения группировки войск (сил) на данных территориях [1–9].

В соответствии с методологией общей теории систем для материально-технического обеспечения следует определить показатели, которыми можно характеризовать понятие устойчивости [10]. Под устойчивостью в системе материально-технического обеспечения понимают способность системы возвращаться в состояние равновесия, после того как она была из этого состояния выведена под давлением внешних (или в системах с активными элементами — внутренних) возмущающих воздействий [11].

Понятие устойчивости включает в себя: состояние; поведение; равновесие; развитие. Следовательно, устойчивость системы материально-технического обеспечения следует оценивать по указанным показателям. Поэтому этапы предлагаемой методики учитывают эти понятия и дают им качественную и количественную оценку.

Предлагаемая логистически-интеграционная оценка уровня устойчивости материально-технического обеспечения группировки войск (сил) на новых территориях учитывает специфику реализации задач системой материально-технического обеспечения (СМТО) в особых условиях.

Функциональная составляющая военно-экономической устойчивости СМТО характеризует субъекты обеспечения с позиции эффективности выполнения ими своих функций. Принимая такое определение, можно утверждать, что для достижения и обеспечения военно-экономической устойчивости необходимо подвергнуть изменениям какую-либо функцию или группу функций СМТО. Применительно к СМТО предлагается выделить следующие функциональные компоненты военно-экономической устойчивости: производственную, транспортно-логистическую, ресурсную, бюджетную и организационную (координация использования ресурсного потенциала нового региона).

Логистически-интеграционная оценка устойчивости СМТО включает следующие этапы:

I этап — выбор и обоснование системы показателей для оценки каждой функциональной составляющей военно-экономической устойчивости СМТО;

II этап — расчет единичных показателей военно-экономической устойчивости по каждой функциональной составляющей устойчивости;

III этап — расчет относительных показателей военно-экономической устойчивости по

каждой функциональной составляющей устойчивости;

IV этап — расчет групповых показателей военно-экономической устойчивости по выбранным функциональным составляющим устойчивости;

V этап — расчет интегрального показателя военно-экономической устойчивости СМТО.

Для первого этапа каждой из функциональных компонент военно-экономической устойчивости определяем показатели.

1. Производственная компонента:

R_{MP} — материальные ресурсы, производимые в новом регионе;

$R_{ПМ}$ — производственные мощности предприятий и резервы технологического оборудования нового региона;

R_{BPM} — количество производственных предприятий по видам материальных ресурсов (продовольствие, обмундирование, ГСМ);

R_{TP} — производительность труда трудовых ресурсов.

2. Транспортно-логистическая компонента:

R_{BTC} — количество ведомственных транспортных средств органов обеспечения службы;

R_{BTD} — количество транспортных средств других собственников;

R_{CP} — терминально-складская инфраструктура региона;

R_{TK} — наличие транспортных коммуникаций видов транспорта.

3. Ресурсная компонента:

$R_{POГ}$ — ресурсные возможности органов тыла;

$R_{PMЭБ}$ — ресурсные возможности местной экономической базы;

$R_{ПР}$ — прочие ресурсные возможности.

4. Бюджетная компонента:

R_{BF} — бюджетное финансирование;

$R_{Пиф}$ — прочие источники финансирования.

5. Организационная компонента:

$R_{УВОТ}$ — уровень взаимодействия органов управления тылом с органами управления территориально-административных единиц;

$R_{ДРШ}$ — показатель доступности ресурсов из штатных источников;

$R_{ДРПИ}$ — показатель доступности ресурсов из прочих источников.

Для второго этапа определяем систему единичных показателей, функциональных составляющих военно-экономической устойчивости.

В соответствии с выделенными пятью группами функциональных составляющих военно-экономической устойчивости производится анализ пяти групп единичных показателей.

Система рекомендуемых к расчету единичных показателей экономической устойчивости представлена в табл. 1.

Для третьего этапа проводим расчет динамических индексов. Этот этап включает две операции: расчет динамических индексов и их перевод в относительные величины единичных показателей экономической устойчивости. Динамические индексы характеризуют динамику единичных показателей экономической устойчивости.

Таблица 1

Формулы расчета системы единичных показателей функциональных составляющих военно-экономической устойчивости СМТО

№ п/п	Показатель	Формула расчета
1. Показатели производственной устойчивости		
1.1	Материальные ресурсы, производимые в регионе	$R_{MP} = R_{MP_1} + R_{MP_2} + \dots + R_{MP_n},$ где $R_{MP_1}, R_{MP_2}, \dots, R_{MP_n}$ — объемы производства ресурсов предприятиями
1.2	Производственные мощности предприятий и резервы технологического оборудования региона	$R_{ПМ} = (\sum Q_i / M) 100,$ где $R_{ПМ}$ — коэффициент загрузки производств, %; $\sum Q_i$ — суммарный фактический объем производства, тыс. т; M — установленная мощность производственных предприятий, тыс. т
1.3	Количество производственных предприятий по видам материальных ресурсов (продовольствие, обмундирование, ГСМ)	$R_{ВМР} = \sum R_i Q_j,$ где R_i — предприятие по виду производимой продукции, ед.; Q_j — объем выпуска продукции по каждому виду, тыс. руб.
1.4	Производительность труда трудовых ресурсов	$R_{ТР} = \sum Q_i / (Ч_{ср.}),$ где $Ч_{ср.}$ — среднесписочная численность работников предприятия, чел.
2. Показатели транспортно-логистической устойчивости		
2.1	Количество ведомственных транспортных средств органов обеспечения служб тыла	$R_{ВТС} = \sum M_i,$ где M_i — подразделения обеспечивающих служб, имеющие транспортные средства, ед.
2.2	Количество транспортных средств других собственников	$R_{ВТД} = \sum N_i,$ где N_i — прочие собственники транспортных средств, ед.
2.3	Терминально-складская инфраструктура региона	$R_{СП} = \sum K_m,$ где K_m — количество объектов складской инфраструктуры различных типов, ед.
2.4	Наличие транспортных коммуникаций видов транспорта	$R_{ТК} = \sum S_i,$ где S_i — протяженность дорог разных видов транспорта, км

Таблица 1 (продолжение)

№ п/п	Показатель	Формула расчета
3. Показатели ресурсной устойчивости		
3.1	Ресурсные возможности органов тыла	$R_{\text{РОТ}} = \sum W_i$, где W_i — объемы поставок видов ресурсов службами тыла, тыс. руб. (ед., комплектов)
3.2	Ресурсные возможности местной экономической базы	$R_{\text{РМЭБ}} = \sum M_i$, где M_i — объемы поставок видов ресурсов предприятиями местной экон. базы тыс. руб. (ед., комплектов)
3.3	Прочие ресурсные возможности	$R_{\text{ПР}} = \sum P_i$, где P_i — прочие источники поставщиков ресурсов, тыс. руб. (ед., комплектов)
4. Показатели бюджетной устойчивости		
4.1	Бюджетное финансирование	$R_{\text{БФ}} = \sum M_i = M_1 + M_2 + \dots + M_n$, где M_n — объемы бюджетного финансирования по видам материального обеспечения, тыс. руб.
4.2	Прочие источники финансирования	$R_{\text{ПИФ}} = \sum D_j$, где D_j — прочие источники финансирования, тыс. руб.
5. Показатели организационной устойчивости		
5.1	Уровень взаимодействия органов управления тылом с органами управления территориально-административных единиц	$0 < R_{\text{УВОТ}} \leq 1$, где $R_{\text{УВОТ}} \rightarrow 1$
5.2	Показатель доступности ресурсов из штатных источников	$R_{\text{ДРШ}} = Q_{\text{Ф}} / Q_{\text{Ш}}$, где $Q_{\text{Ф}}$ — фактический (имеющийся) объем ресурсов; $Q_{\text{Ш}}$ — объем ресурсов по штатному расписанию
5.3	Показатель доступности ресурсов из прочих источников	$R_{\text{ДРПИ}} = Q_{\text{Д}} / Q_{\text{П}}$, где $Q_{\text{Д}}$ — объем ресурсов, поставляемый по договорам; $Q_{\text{П}}$ — потенциальный объем ресурсов из прочих источников

Их расчет проводится по традиционной формуле, отражающей темп экономического роста:

$$I_i = P_1 / P_0,$$

где P_1 — фактические значения каждого показателя в отчетном периоде;

P_0 — фактические значения каждого показателя в базисном периоде.

Поскольку все рассчитываемые показатели различаются по своей военно-экономической

сущности, для перевода в относительные величины единичных показателей используем балльный метод на основе экспертных оценок. Шкала присвоения баллов выглядит следующим образом: 2 балла — показатель в динамике улучшил значение; 1 балл — показатель в динамике не изменился; 0 баллов — показатель в динамике ухудшил значение.

Для четвертого этапа проводим расчет групповых показателей военно-экономической устойчивости СМТО. На данном этапе произво-

дится расчет комплексных характеристик, отражающих устойчивость выбранных направлений функционирования СМТО. Для расчета средневзвешенных арифметических групповых показателей предлагается использовать метод сумм. Достоинства данного метода в том, что использование весовых коэффициентов позволяет повысить точность интегральной оценки.

Групповой (как итоговый интегральный) показатель определяется суммированием значений показателей, умноженных на их весовые коэффициенты. При этом используются нормированные значения весов, сумма которых должна быть равна единице:

$$J_i = \sum_{i=1}^n K_i a_i, \text{ при } \sum_{i=1}^n a_i = 1,$$

где K_i — групповой (единичный) показатель по оцениваемым объектам;

a_i — показатель значимости (веса) i -го группового (единичного) показателя;

n — число групповых (единичных) показателей, $i = 1, \dots, n$.

Групповой показатель по оцениваемым объектам K_i определяется на основе балльной оценки в относительных величинах, присвоенных показателю экспертным методом.

Показатели значимости (веса) определяются одним из экспертных методов — методом парных сравнений. При использовании данного метода в начале составляется квадратная матрица k_{ij} парного сравнения критериев, в которой число столбцов и строк равно числу параметров.

Матрица парного сравнения критериев заполняется коэффициентами k_{ij} , исходя из следующего условия:

$$k_{ij} = \begin{cases} 1,5, \text{ если критерий } K_i \text{ более важен,} \\ \text{чем критерий } K_j; \\ 0,5, \text{ если критерий } K_i \text{ менее важен,} \\ \text{чем критерий } K_j; \\ 0, \text{ если критерии } K_i \text{ и } K_j \text{ имеют} \\ \text{одинаковую важность.} \end{cases}$$

При этом обязательно соблюдение следующего условия:

$$k_{ij} + k_{ji} = 2 \text{ при } i \neq j.$$

Ранг каждого показателя определяется исходя из суммы значений в каждой строке матрицы. Первое место присваивается критерию с наиболее высокой суммой значений. Так, для производственной компоненты им является критерий — материальные ресурсы, производимые в новом регионе. Затем последовательно присваиваются места каждому из критериев, и производится расчет весовых коэффициентов для каждого из критериев.

С учетом рассчитанных весовых коэффициентов получаем формулу для расчета группового показателя производственной устойчивости СМТО (при расчете используются единичные показатели динамики):

$$R_{ПУ} = K_1 R_{MP} + K_2 R_{ПМ} + K_3 R_{ВМР} + K_4 R_{ТР},$$

где R_{MP} — динамический индекс материальных ресурсов, производимых в регионе;

$R_{ПМ}$ — динамический индекс производственных мощностей предприятий и резервов технологического оборудования нового региона;

$R_{ВМР}$ — динамический индекс количества производственных предприятий по видам материальных ресурсов (продовольствие, вещевое имущество, ГСМ);

$R_{ТР}$ — динамический индекс производительности труда трудовых ресурсов.

Аналогичный расчет проводится по остальным группам показателей. В результате получаем следующие расчетные индексы.

Групповой показатель транспортно-логистической устойчивости:

$$R_{ТЛУ} = K_1 R_{ВТС} + K_2 R_{ВТД} + K_3 R_{СП} + K_4 R_{ТК},$$

где $R_{ВТС}$ — динамический индекс количества ведомственных транспортных средств органов обеспечения служб тыла;

$R_{ВТД}$ — динамический индекс количества транспортных средств других собственников;

$R_{СП}$ — динамический индекс терминально-складской инфраструктуры района;

$R_{ТК}$ — динамический индекс наличия транспортных коммуникаций видов транспорта.

Групповой показатель ресурсной устойчивости:

$$R_{РТУ} = K_1 R_{РОТ} + K_2 R_{РМЭБ} + K_3 R_{ПР},$$

где $R_{\text{РОТ}}$ — динамический индекс ресурсных возможностей органов тыла;

$R_{\text{РМЭБ}}$ — динамический индекс ресурсных возможностей местной экономической базы;

$R_{\text{ПР}}$ — динамический индекс прочих ресурсных возможностей.

Групповой показатель бюджетной устойчивости:

$$R_{\text{БУ}} = K_1 R_{\text{БФ}} + K_2 R_{\text{Пиф}},$$

где $R_{\text{БФ}}$ — динамический индекс бюджетного финансирования;

$R_{\text{Пиф}}$ — динамический индекс прочих источников финансирования.

Групповой показатель организационной устойчивости:

$$R_{\text{ОУ}} = K_1 R_{\text{УВОТ}} + K_2 R_{\text{Дрш}} + K_3 R_{\text{Дрпи}},$$

где $R_{\text{УВОТ}}$ — динамический индекс уровня взаимодействия органов управления тылом с органами управления территориально-административных единиц;

$R_{\text{Дрш}}$ — динамический индекс показателя доступности ресурсов из штатных источников;

$R_{\text{Дрпи}}$ — динамический индекс показателя доступности ресурсов из прочих источников.

Для пятого этапа проводим расчет интегрального показателя военно-экономической устойчивости. Итоговый интегральный пока-

затель военно-экономической устойчивости СМТО определяется по формуле:

$$R_{\text{ВЭУ}} = R_{\text{ПУ}} + R_{\text{ТЛУ}} + R_{\text{РУ}} + R_{\text{БУ}} + R_{\text{ОУ}}.$$

В данной формуле предполагается, что все направления выполнения задач организации материально-технического обеспечения равнозначны для сбалансированного устойчивого развития, поэтому весовые коэффициенты принимаются равными единице.

Вместе с тем, достижение военно-экономической эффективности на основе использования разработанной методики основывается на выборе следующих показателей (табл. 2).

На основе показателей, табл. 2, проводится вычислительный эксперимент с завершением планирования системы и расчетом военно-экономического эффекта.

Для определения результата использования предложенной методики воспользуемся оценкой военно-экономического эффекта и показателем военно-экономической эффективности.

Расчет военно-экономического эффекта:

$$\text{МЭЭ} = a\text{ЭЭ} + b\text{МЭ} = a \sum_{i=1}^n E_i + b \sum_{k=1}^p M_k,$$

где ЭЭ — показатель экономического эффекта;

МЭ — показатель военного эффекта;

a — вес экономического эффекта;

b — вес военного эффекта;

Таблица 2

Показатели военно-экономической эффективности

№ показателя	Название показателя	Направленность показателя	Размерность
Военные показатели			
K_1	Ресурсные возможности органов тыла и местной экономической базы	max	ед. изд.
K_2	Отклонение в сроках выполнения поставки по причине транспортно-логистической инфраструктуры	min	дн.
K_3	Количество невыполненных поставок по причине недостаточной координации между владельцами ресурсов	min	кол-во
Экономические показатели			
K_4	Объемы производства ресурсов (производственная устойчивость)	max	тыс. руб.
K_5	Полнота выделения бюджетных средств	max	тыс. руб.
K_6	Затраты на обеспечение ресурсами по двум моделям (с и без потенциала ВЭР)	min	тыс. руб.

n — число параметров, используемых для расчета величины экономического эффекта;

E_i — значение i -го параметра экономического эффекта;

p — число параметров, используемых для расчета величины военного эффекта;

M_k — значение k -го параметра военного эффекта.

Относительный показатель военно-экономической эффективности может быть рассчитан:

$$EME = ME / C,$$

где ME — военный эффект;

C — затраты на функционирование СМТО при использовании потенциала нового региона.

В свою очередь величина военного эффекта рассчитывается:

$$ME = Q - Q_n,$$

где Q — интегральный показатель поставок ресурсов в существующей системе материального обеспечения, за определенный период, с требуемыми параметрами (табл. 2);

Q_n — поставки ресурсов в соответствии с требованиями по параметрам, табл. 2.

Таким образом, научная новизна данной статьи заключается в новом подходе к оценке устойчивости системы материально-технического обеспечения группировки войск (сил) на новых территориях, основу которого составляет поэтапная логистически-интеграционная оценка, которая предполагает выбор и обоснование системы комплексных показателей для оценки каждой функциональной составляющей военно-экономической устойчивости системы материально-технического обеспечения, а также уровня развития производственно-логистической инфраструктуры и местной экономической базы конкретного нового региона.

Разработанная логистически-интеграционная оценка устойчивости системы материально-технического обеспечения группировки войск (сил) на новых территориях, основанная на интегральном критерии оценки, может стать эффективным инструментом управления процессами обеспечения группировки войск (сил) на новых территориях материальными ресурсами из различных источников. Динамика рассчитанных групповых коэффициентов военно-экономической устойчивости по различным функциональным составляющим обеспечения войск ресурсами позволила сделать выводы о характере его развития за рассматриваемый период. Предлагаемый методический подход логистически-интеграционной оценки дает комплексное представление о текущем состоянии и динамике эффективности деятельности СМТО, позволяет отследить угрозы, влияющие на военно-экономическую устойчивость, и принять своевременные меры по их преодолению, создает информационную основу для принятия управленческих решений и разработки стратегических планов развития СМТО.

мической устойчивости по различным функциональным составляющим обеспечения войск ресурсами позволила сделать выводы о характере его развития за рассматриваемый период. Предлагаемый методический подход логистически-интеграционной оценки дает комплексное представление о текущем состоянии и динамике эффективности деятельности СМТО, позволяет отследить угрозы, влияющие на военно-экономическую устойчивость, и принять своевременные меры по их преодолению, создает информационную основу для принятия управленческих решений и разработки стратегических планов развития СМТО.

Список источников

1. Васильева Р.И., Дорошенко С.В. Анализ перспектив интеграции новых регионов России в национальное экономическое пространство // Россия: тенденции и перспективы развития. 2023. № 18–2. С. 56–65.
2. ВЭД24: Оценка экономического потенциала регионов, вошедших в состав Российской Федерации в 2022 году. [Электронный ресурс]. URL: <http://ved24.com/analytics/articles/2022-12-06/ocenka-ekonomicheskogo-potenciala-regionov-voshedshikh-v-sostav> (дата обращения: 20.09.2024).
3. БизнесOnline: Минэкономразвития оценило экономический потенциал присоединенных территорий. [Электронный ресурс]. URL: <http://m.business-gazeta.ru/news/565987> (дата обращения: 20.09.2024).
4. Дружинин А.Г. Новые субъекты Российской Федерации: специфика, тренды, потенциал развития // Научная мысль Кавказа. 2022. № 4. С. 62–74.
5. Информер: Херсонская область: социально-экономический портрет региона. [Электронный ресурс]. URL: <http://ruinformer.com/page/hersonskaja-oblast-socialno-ekonomicheskij-portret-regiona> (дата обращения: 20.09.2024).
6. РБК: Интеграция новых территорий в состав России продлится до 2026 года. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rbc.ru/politics/02/10/2022/633979ea9a79477dd6c5f2ab?ysclid=m05hmzxvky293385729> (дата обращения: 20.09.2024).
7. Регнум: ДНР и ЛНР: путь к экономической интеграции с Россией. [Электронный ресурс]. URL: <http://regnum.ru/article/3543427?ys>

clid=m05iw4g9zn286824840 (дата обращения: 20.09.2024).

8. Севастьянов Д.В. Оценка экономического потенциала регионов, вошедших в состав Российской Федерации в 2022 году // В сборнике: Приоритеты устойчивого развития экономики России на современном этапе / Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Саратов, 2022. С. 179–186.

9. ТАСС: Основные сведения о республиках Донбасса, Запорожской и Херсонской областях. [Электронный ресурс]. URL: <http://tass.ru/info/15842977> (дата обращения: 20.09.2024).

10. Стулов С.В., Тришкин В.В. Методические подходы к обоснованию военно-экономической эффективности материального обеспечения войск (сил) на основе внедрения интегрированной технологии управления логистическим сервисом // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2020. № 1–2 (139–140). С. 16–25.

11. Курбанов А.Х., Литвиненко А.Н., Шут К.В. Условия и факторы эффективности функционирования системы материального обеспечения региональной группировки войск (сил) // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2024. № 1 (29). С. 10–18.

References

1. Vasilyeva R.I., Doroshenko S.V. Analysis of prospects for the integration of new regions of Russia into the national economic space // Russia: trends and prospects of development. 2023. No 18–2. Pp. 56–65.

2. FEA24: Assessment of the economic potential of the regions that became part of the Russian Federation in 2022. [Electronic resource]. URL: <http://ved24.com/analytics/articles/2022-12-06/ocenka-ekonomicheskogo-potenciala-regionov-voshedshikh-v-sostav> (date of application: 09/20/2024).

3. Businessonline: The Ministry of Economic Development assessed the economic potential of the annexed territories. [Electronic resource]. URL:

<http://m.business-gazeta.ru/news/565987> (date of reference: 09/20/2024).

4. Druzhinin A.G. New subjects of the Russian Federation: specifics, trends, development potential // Scientific thought of the Caucasus. 2022. No 4. Pp. 62–74.

5. Informer: Kherson region: socio-economic portrait of the region. [Electronic resource]. URL: <http://ruinformer.com/page/hersonskaja-oblast-socialno-ekonomicheskij-portret-regiona> (date of reference: 09/20/2024).

6. RBC: The integration of new territories into Russia will last until 2026. [electronic resource]. URL: <http://www.rbc.ru/politics/02/10/2022/633979ea9a79477dd6c5f2ab?ysclid=m05hmzxvky293385729> (accessed: 09/20/2024).

7. Regnum: The DPR and the LPR: the path to economic integration with Russia. [Electronic resource]. URL: <http://regnum.ru/article/3543427?ysclid=m05iw4g9zn286824840> (accessed: 09/20/2024).

8. Sevastyanov D.V. Assessment of the economic potential of the regions that became part of the Russian Federation in 2022 // In the collection: Priorities of sustainable development of the Russian economy at the present stage. Materials of the All-Russian scientific and practical conference. Saratov, 2022. Pp. 179–186.

9. TASS: Basic information about the republics of Donbass, Zaporizhia and Kherson regions. [Electronic resource]. URL: <http://tass.ru/info/15842977> (date of reference: 09/20/2024).

10. Stulov S.V., Trishkin V.V. Methodological approaches to substantiating the military-economic efficiency of material support for troops (forces) based on the introduction of integrated logistics service management technology // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2020. No 1–2 (139–140). Pp. 16–25.

11. Kurbanov A.H., Litvinenko A.N., Shut K.V. Conditions and factors of the effectiveness of the functioning of the material support system of the regional grouping of troops (forces) // Actual problems of military scientific research. 2024. No 1 (29). Pp. 10–18.

УДК 681.5

doi: 10.53816/23061456_2025_1-2_11

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНО-ОГНЕВОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ
ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ВОЕННЫХ КОНФЛИКТОВ**

**FORECASTING FUNCTIONING PARAMETERS OF THE RECONNAISSANCE
AND FIRE SYSTEM IN HIGH-TECH MILITARY CONFLICTS CONDITIONS**

Канд. техн. наук Р.В. Куклин

Ph.D. R.V. Kuklin

Михайловская военная артиллерийская академия

В статье предлагается математический аппарат, адаптированный для прогнозирования условий функционирования элементов разведывательно-огневой системы ракетных войск и артиллерии в условиях современных высокотехнологичных военных конфликтов. Основная идея предложенного подхода базируется на предположении сохранения закона изменения прогнозируемого параметра (переменной), выявленного на ретроспективном участке, на определенном интервале времени в будущем. Данный подход обеспечивает более точный прогноз значений параметров функционирования разведывательно-огневой системы ракетных войск и артиллерии. Основной особенностью предложенных положений является учет частого изменения противником тактики действий. Он обеспечивается путем применения математического аппарата дисконтирования ретроспективных данных, который позволяет по-разному учитывать и оценивать новые данные и устаревшую к настоящему моменту информацию.

Ключевые слова: прогнозирование параметров функционирования, метод экспоненциального сглаживания, дисконтирование ретроспективных данных.

The article proposes a mathematical apparatus adapted to predict the operating conditions of the elements of the reconnaissance and fire system of missile forces and artillery in modern high-tech military conflicts. The main idea of the proposed approach is based on the assumption that the law of change in the predicted parameter (variable) identified in the retrospective section will remain for a certain period of time in the future. This approach provides a more accurate forecast of the functioning parameters of the reconnaissance and fire system of missile forces and artillery. The main feature of the proposed provisions is to take into account the frequent change in the opponent's tactics of action. It is provided by the use of a mathematical apparatus for discounting retrospective data, which allows you to differently take into account and evaluate new data and information that is outdated to date.

Keywords: forecasting functioning parameters, exponential smoothing method, discounting retrospective data.

В современных высокотехнологичных военных конфликтах быстро меняется не только обстановка, но и тактика ведения боевых действий [1]. Поэтому традиционные способы про-

гнозирования, основанные на статистических методах корреляции и регрессии [2], основанные на анализе всех накопленных данных о параметрах функционирования разведывательно-огне-

вой системы (РОС), в условиях высокотехнологичных военных конфликтов не всегда будут обладать требуемой точностью [3]. А в некоторых случаях даже будут играть на руку противнику, вынуждая наши войска действовать шаблонно. Для решения данной проблемы предлагается методика прогнозирования, учитывающая устаревание ретроспективных данных.

Основная идея прогнозирования базируется на предположении сохранения закона изменения прогнозируемого параметра (переменной), выявленного на ретроспективном участке, на определенном интервале времени в будущем. На практике обычно выясняется, что вид и характеристики закона изменения параметра функционирования РОС существенно зависят от интервала времени (затрагиваемого этапа организации или ведения боевых действий) ретроспекции, на котором они определялись. Это приводит к чередованию участков эволюционного и революционного (скачкообразного) изменения процесса, или же изменение закона развития процесса может протекать относительно плавно. Поэтому возникает необходимость непрерывной коррекции экстраполяционной формулы по мере поступления новых данных о фактических значениях параметров функционирования РОС [6–8].

Это заставляет по-разному учитывать и оценивать новейшие данные и устаревшую к настоящему моменту информацию. Реализовать данный принцип в прогнозировании предлагается путем использования различных способов дисконтирования информации по мере удаления времени ее получения в прошлое. Соответственно, под дисконтированием понимается уменьшение информативности ретроспективных значений переменной объекта прогнозирования по мере удаления моментов их измерений в прошлое. Наиболее известными способами введения дисконтирования являются методы движущейся средней и экспоненциального сглаживания [4]. Коэффициенты дисконтирования могут использоваться также и в методе наименьших квадратов [2, 4], который в данном случае может рассматриваться как один из вариантов экспоненциального сглаживания.

Метод движущейся средней предлагает в качестве дисконтирующей функции использовать единичную ступенчатую функцию вида

$$\omega(t_0) = \begin{cases} 1 & \text{для } t_0 - t_p \leq t \leq t_0; \\ 0 & \text{для } t < t_0 - t_p, \end{cases}$$

где t_0 — последний момент времени ретроспективного участка;

t_p — момент времени начала ретроспекции, после которого ретроспективные данные принимаются во внимание.

При определении параметров функционирования РОС ретроспективные значения функции умножаются на $\omega(t_0)$ и, следовательно, вид экстраполирующей функции определяется каждый раз по некоторому числу «последних» точек ряда, попадающих в интервал $t_0 - t_p$. При этом t_p целесообразно определять на основе анализа динамики изменения тактики боевых действий противником в ходе предыдущего опыта боевых действий.

В качестве оценки детерминированной части параметра функционирования РОС целесообразно использовать его математическое ожидание, рассчитанное по нескольким конечным точкам [4]:

$$M(t_0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i.$$

Роль дисконтирующей функции здесь выполняет выбор числа точек N , по которому определяется математическое ожидание. Чем больше N , тем меньше быстродействие модуля отслеживания уровня a , однако тем меньше дисперсия ошибки:

$$D(a) = \frac{D_n}{N}.$$

Процесс оценки a представляет собой динамический пошаговый процесс с шагом 1, при

$$M(t_0) = \frac{M(t_0 - 1) + [y(t_0) - y(t_0 - N)]}{N}.$$

Считая, что оценкой среднего уровня всех предыдущих N точек является $M(t_0 - 1)$, и подставив его вместо $y(t_0 - N)$, получим

$$\hat{M}(t_0) = \frac{1}{N} y(t_0) + \left(1 - \frac{1}{N}\right) M(t_0 - 1).$$

Эта рекуррентная формула является частным случаем формулы экспоненциального сглаживания, которая в общем виде имеет вид [4]:

$$S(t_0) = \alpha y(t_0) + (1 - \alpha)S(t_0 - 1), \quad (1)$$

где α — постоянная сглаживания.

Для получения функции сглаживания 2-го, 3-го и т.д. порядков применяют операцию сглаживания повторно к уже сглаженным значениям функции y .

$$\begin{aligned} S^{(2)}(t_0) &= \alpha S(t_0) + (1 - \alpha)S^{(2)}(t_0 - 1); \\ S^{(3)}(t_0) &= \alpha S^{(2)}(t_0) + (1 - \alpha)S^{(3)}(t_0 - 1); \\ \dots\dots\dots \\ S^{(n)}(t_0) &= \alpha S^{(n-1)}(t_0) + (1 - \alpha)S^{(n)}(t_0 - 1). \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда, подставив в формулу (1) выражения оценок сглаживающей функции в предыдущих точках ряда, получим выражение

$$S(t_0) = \alpha \sum_{k=0}^{t_0-1} (1 - \alpha)^k y(t_0 - k) + (1 - \alpha)^{t_0} y(0).$$

В случае использования в целях прогнозирования экспоненциального сглаживания задаются описанием тренда в наиболее общей форме степенного полинома. Согласно теореме Брауна [5] коэффициенты α_i , этого полинома могут быть выражены через функции сглаживания различного порядка исходного числового ряда. Тогда задача сводится к расчету значений функции сглаживания $S^{(i)}$ ($i = 1, 2, \dots, n + 1$) и через их линейные комбинации — к определению коэффициентов полинома.

Функция сглаживания p -го порядка в момент времени t будет представлена выражением

$$S^{(p)}(t) = \sum_{k=0}^n (-1)^k \frac{y^{(k)}(t) \alpha^p}{k!(p-1)!} \sum_{j=0}^{\infty} j^k \beta^j \frac{(p-1+j)!}{j!},$$

где $y^{(k)}(t) = d^k y / dt^k$ — производная процесса, вычисленная в момент времени t ;

α — постоянная сглаживания.

На практике редко используют полиномы с высокими степенями разложения, ограничиваясь обычно степенью не выше $n = 2$. Для них выражения для коэффициентов приводятся в [5].

1. Для полинома нулевого порядка $f(a, T) = a_0(t)$:

$$\hat{a}_0(t) = S^{(1)}(t).$$

2. Для полинома первого порядка $f(a, T) = a_0(t) + a_1(t)T$:

$$\hat{a}_0(t) = 2S^{(1)}(t) - S^{(2)}(t);$$

$$\hat{a}_1(t) = \frac{\alpha}{\beta} [S^{(1)}(t) - S^{(2)}(t)].$$

3. Для полинома второго порядка $f(a, T) = a_0(t) + a_1(t)T + 1/2 a_2(t)T^2$:

$$\hat{a}_0(t) = 3S^{(1)}(t) - 3S^{(2)}(t) + S^{(3)}(t);$$

$$\hat{a}_1(t) = \frac{\alpha}{2\beta^2} \left[\begin{aligned} &(6 - 5\alpha)S^{(1)}(t) - \\ &-2(5 - 4\alpha)S^{(2)}(t) + \\ &+(4 - 3\alpha)S^{(3)}(t) \end{aligned} \right];$$

$$\hat{a}_2(t) = \frac{\alpha^2}{\beta^2} [S^{(1)}(t) - 2S^{(2)}(t) + S^{(3)}(t)].$$

Значения сглаживающих функций рассчитываются посредством рекуррентной процедуры (2). Для начала расчета необходимо установить начальные условия $S^{(1)}(0)$, $S^{(2)}(0)$ и т.д.

В простейшем случае принимают

$$S^{(1)}(0) = S^{(2)}(0) = S^{(3)}(0) = y(0),$$

где $y(0)$ — начальная точка исходного статистического ряда. В другом случае задаются начальными значениями коэффициентов $a_0(0), a_1(0), a_2(0)$ и по известным формулам [4] пересчитывают через них начальные значения функций сглаживания.

Для полинома второй степени $n = 2$ расчет сводится к следующим шагам:

$$1. S^{(1)}(0) = S^{(2)}(0) = S^{(3)}(0) = y(0);$$

$$2. S^{(1)}(1) = \alpha y(1) + (1 - \alpha)S^{(1)}(0);$$

$$S^{(2)}(1) = \alpha S^{(1)}(1) + (1 - \alpha)S^{(2)}(0);$$

$$S^{(3)}(1) = \alpha S^{(2)}(1) + (1 - \alpha)S^{(3)}(0).$$

3. По формулам (2) рассчитывают текущие значения коэффициентов $a_0(1), a_1(1), a_2(1)$.

4. Повторяются вторая и третья процедуры для точки 2 исходного ряда, затем для точки 3 и

так до последней n -й точки ряда, соответствующей t_0 -му моменту поступления последних данных.

5. Формируется описание полинома по последним значениям коэффициентов $a_0(t_0), a_1(t_0), a_2(t_0)$:

$$y(t_0 + t) = a_0(t_0) + a_1(t_0)t + \frac{a_2(t_0)}{2}t^2,$$

подставляется заданное время упреждения прогноза t и получается результат прогнозирования $y(t_0 + t)$.

Применение предложенной методики прогнозирования параметров функционирования РОС, на основе метода движущейся средней и экспоненциального сглаживания, обеспечивает удовлетворительные результаты при относительно небольших случайных колебаниях исходного ряда. Данная особенность позволяет более точно прогнозировать значения параметров функционирования РОС в условиях частого изменения противником тактики действий. Однако стоит учитывать, что при значительных случайных помехах доверительные интервалы прогнозов в этих процедурах существенно расширяются [9, 10].

Список источников

1. Макаренко С.И., Иванов М.С. Сетецентрическая война — принципы, технологии, примеры и перспективы: монография. СПб.: Научно-емкие технологии, 2018. 898 с.

2. Паршин С., Кожанов Ю. Современные тенденции в совершенствовании системы управления вооруженными силами ведущих зарубежных стран в информационную эпоху // Зарубежное военное обозрение. 2009. № 7. С. 3–9.

3. Чимаров С.Ю. К вопросу о сетецентрическом формате гибридной войны XXI века // Управленческое консультирование. 2016. № 2. С. 97–102.

4. Берикашвили В.Ш., Оськин С.П. Статистическая обработка данных, планирование эксперимента и случайные процессы: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2021. 163 с.

5. Трухаев Р.И. Модели принятия решений в условиях неопределенности. М.: Наука, 1981. 184 с.

6. Воробьев И.Н., Киселев В.А. От современной тактики к тактике сетецентрических действий // Военная мысль. 2020. № 13. С. 365–399.

7. Чернышев А.А., Тыщенко А.И. Проблемы и перспективы, современное состояние и развитие ракетных войск и артиллерии // Военная мысль. 2020. № 7. С. 85–89.

8. Саркисян С.А., Каспин В.И., Лисичкин В.А. и др. Теория прогнозирования и принятия решений: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1977. 351 с.

9. Энддоус М., Стэнсфилд Р. Методы принятия решений. М.: Аудит ЮНИТИ, 1997. 590 с.

10. Чуев Ю.В., Михайлов Ю.Б., Кузьмин В.И. Прогнозирование количественных характеристик процессов. М.: Советское радио, 1975. 398 с.

References

1. Makarenko S.I., Ivanov M.S. Network Centric Warfare — Principles, Technologies, Examples and Perspectives: monograph. SPb.: Naukoymkie tochnologii, 2018. 898 p.

2. Parshin S., Kozanov U. Current trends in improving the management system of the armed forces of leading foreign countries in the information era // Zarubeznoe voennoe obozrenie. 2009. No 7. Pp. 3–9.

3. Chimarov S.U. On the question of the network-centric format of the hybrid war of the XXI century // Upravlencheskoe konsultirovanie. 2016. No 2. Pp. 97–102.

4. Berikashvili V.Sh., Oskin S.P. Statistical data processing, experiment planning and random processes: a textbook for universities. M.: Uraight, 2021. 163 p.

5. Truhaev R.I. Decision models under uncertainty. M.: Nauka, 1981. 184 p.

6. Vorobyov I.N., Kiselev V.A. From modern tactics to tactics of network-centric actions // Voennaya mysl. 2020. No 13. Pp. 365–399.

7. Chernyshev A.A., Tyshenko A.I. Problems and prospects, current state and development of missile forces and artillery // Voennaya mysl. 2020. No 7. Pp. 85–89.

8. Sarkisyan S.A., Kaspin V.I., Lisichkin V.A. et al. Prediction and decision theory: a tutorial. M.: Vysshaya shkola, 1977. 351 p.

9. Enddous M., Stansfild R. Decision-making methods. M.: Audit UNITY, 1997. 590 p.

10. Chuev U.V., Mikhailov U.B., Kuzmin V.I. Process Quantity Prediction. M.: Sovetskoe radio, 1975. 398 p.

УДК 519.8

doi: 10.53816/23061456_2025_1–2_15

**ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ
К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**GENETIC ALGORITHM FOR SUBSTANTIATION OF REQUIREMENTS
TO THE CHARACTERISTICS OF TECHNICAL SYSTEMS**

*Канд. техн. наук А.Е. Привалов, канд. воен. наук П.Ю. Бугайченко,
канд. техн. наук М.А. Александров*

Ph.D. A.E. Privalov, Ph.D. P.Yu. Bugaichenko, Ph.D. M.A. Aleksandrov

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

В статье предлагается генетический алгоритм обоснования требований к характеристикам сложных технических систем, основанный на алгоритме многокритериальной оптимизации SPEA2. Базовый алгоритм модифицирован для решения обратной задачи параметрического синтеза. Для обеспечения равномерности получаемого фронта Парето используется подход, основанный на методе кластеризации k -means, сущность которого заключается в объединении нескольких близко расположенных решений в один кластер с последующей заменой их одним решением, расположенным в центре кластера. В статье приводится численный пример обоснования характеристик многоспутниковой орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли. Предлагаемый алгоритм может быть использован на этапе разработки технического задания на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию сложных технических систем при оформлении раздела «Технические требования к изделию».

Ключевые слова: сложная техническая система, генетический алгоритм, фронт Парето, технические требования, техническое задание.

The article proposes a genetic algorithm for substantiating requirements for the characteristics of complex technical systems, based on the multicriteria optimization algorithm SPEA2. The basic algorithm is modified to solve the inverse problem of parametric synthesis. To ensure the uniformity of the resulting Pareto front, an approach is used based on the k -means clustering method, the essence of which is to combine several closely located solutions into one cluster and then replace them with one solution located in the center of the cluster. The article provides a numerical example of substantiating the characteristics of a multi-satellite orbital constellation for remote sensing of the Earth. The proposed algorithm can be used at the stage of developing technical specifications for carrying out research and development work to create complex technical systems when preparing the section «Technical requirements for the product».

Keywords: complex technical system, genetic algorithm, Pareto front, technical requirements, technical task.

Введение

Одной из важнейших задач, возникающих при разработке технических заданий на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке сложных технических систем (СТС), является разработка раздела «Технические требования к изделию», в который входят характеристики (параметры), обеспечивающие выполнение изделием своих функций в заданных условиях применения, технические характеристики (параметры) изделия, обеспечивающие выполнение возложенных на него задач, вероятностно-временные и другие характеристики и показатели, определяющие целевое использование создаваемого изделия, а также требования к стойкости, надежности и другим эксплуатационно-техническим характеристикам [1]. Числовые значения этих характеристик обуславливаются особенностями применения СТС и определяются в процессе внешнего проектирования, в ходе которого выявляются показатели и критерии качества (эффективности функционирования) СТС, разрабатывается агрегированная модель и выполняется параметрический синтез СТС. Результатом последнего являются числовые значения требований к СТС и процессу ее функционирования, обеспечивающие выполнение критериев, названных выше [2]. Следует отметить следующие особенности внешнего проектирования современных СТС.

1. Показатель качества (эффективности функционирования) СТС, как правило, является векторным, а задача оценивания качества (эффективности) — многокритериальной. В связи с этим, решением задачи параметрического синтеза является множество векторов значений характеристик, обладающих одинаковым качеством (множество Парето).

2. Агрегированные модели СТС, построенные с использованием современных методов моделирования систем, являются сложными нелинейными объектами. В связи с этим, известные методы исследования операций зачастую неприменимы из-за высокой размерности задачи и нелинейности модели. В связи с этим, для решения задач исследования агрегированных моделей СТС применяются различного рода эвристические алгоритмы.

В статье предлагается подход к обоснованию требований к СТС, основанный на генетическом алгоритме SPEA2. Оригинальный алгоритм, опубликованный в [3], был модифицирован для решения обратной задачи параметрического синтеза, а также дополнен алгоритмом фильтрации популяции, основанным на методе кластеризации k -means, который обеспечивает равномерность фронта Парето.

Постановка задачи

Пусть определены:

1. Множество характеристик СТС:

$$S = \{s_l | l = \overline{1, l}\};$$

2. Множество значений характеристик СТС:

$$R = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_l,$$

где R_l — множество значений l -й характеристики;

3. Множество значений показателей качества СТС (или эффективности процесса ее функционирования):

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 \times \mathcal{E}_2 \times \dots \times \mathcal{E}_q,$$

где $\mathcal{E}_q | q = \overline{1, q}$ — множество значений q -го показателя;

4. Критерии оценивания качества (эффективности функционирования) СТС:

$$\mathcal{E}^* = \mathcal{E}_1^* \times \mathcal{E}_2^* \times \dots \times \mathcal{E}_q^*,$$

где $\mathcal{E}_q^* \subset \mathcal{E}_q$ — критерий оценивания q -го показателя, представляющий собой множество требуемых заказчиком (или пользователем СТС) значений соответствующего показателя;

5. Агрегированная модель СТС, разработанная в ходе внешнего проектирования:

$$f : R \rightarrow \mathcal{E};$$

6. Направления поиска характеристик:

$$h : S \rightarrow \{\min, \max\}.$$

Особенность постановки задачи состоит в том, что требуется найти ограничения

на значения характеристик (требование), выход за пределы которых приведет к несоблюдению критериев \mathcal{E}^* . Следовательно, направление поиска следует определять из условия, что необходимо найти совокупность «наихудших» значений характеристик, при которых выполняются ожидания заказчика. Например, если одна из характеристик s_i — прочность, то $h(s_i) = \min$, то есть необходимо найти минимальную прочность, при которой выполняются критерии \mathcal{E}^* .

Вектор характеристик r_j превосходит по Парето (доминирует) вектор r_i , $r_j \succ r_i$ если существует характеристика, по которой r_j превосходит с учетом направления поиска r_i , а для остальных характеристик r_i не превосходит r_j [4]:

$$r_j \succ r_i \Rightarrow \exists l_1 \in \overline{1, l}: r_{j, l_1} \overset{h}{>} r_{i, l_1} \wedge r_{j, l_2} \geq r_{i, l_2}, \\ l_2 = \overline{1, l}, \quad l_2 \neq l_1.$$

Логический оператор «превосходит с учетом направления» определяется следующим образом:

$$r_{jl} \overset{h}{>} r_{il} \Leftarrow \begin{cases} r_{jl} > r_{il}, & \text{если } h(s_i) = \max \\ r_{jl} < r_{il} & \text{если } h(s_i) = \min \end{cases}$$

Необходимо определить множество Парето-оптимальных векторов характеристик СТС (фронт Парето), для которых выполняются критерии \mathcal{E}^* :

$$R^* = \left\{ r^* : \left\{ \begin{array}{l} f(r^*) \in \mathcal{E}^* \\ \{r : r \succ r^*\} = \emptyset \end{array} \right. \middle| r, r^* \in R^{\text{УЦД}} \right\}.$$

Этапы генетического алгоритма

Предлагаемый алгоритм основан на известном генетическом алгоритме поиска Парето-оптимальных решений SPEA2 и состоит из семи этапов [3].

1. Инициализация.

1.1. Определение размеров начальной популяции N и архива \bar{N} .

1.2. Генерирование начальной популяции $W(t=0)$ и архива $\bar{W}(t=0) = \emptyset$ (здесь t — номер шага алгоритма):

$$W(t=0) = \{ \tilde{r} \mid \tilde{r} \in R \wedge f(\tilde{r}) \in \mathcal{E}^* \}.$$

2. Расчет параметров пригодности (фитнесс-функции) для каждого элемента (особи) множеств (решения) $W(t)$ и $\bar{W}(t)$.

2.1. Расчет «силы» решения — количества решений из множеств $W(t)$ и $\bar{W}(t)$, которые она доминирует:

$$\text{power}(r_i) = \\ = \text{card} \left(\{ r_j \mid r_j \in W(t) \cup \bar{W}(t) \wedge r_i \succ r_j \} \right).$$

2.2. Расчет «слабости» — суммарная сила всех решений, доминирующих данное:

$$\text{weakness}(r_i) = \sum_{\substack{r_j \in W(t) \cup \bar{W}(t), \\ r_j \succ r_i}} \text{power}(r_j).$$

2.3. Расчет плотности решения:

$$\text{density}(r_i) = \frac{1}{f^\Delta(r_i, r_n) + 2},$$

где r_i, r_n — расстояние до n -го соседа (в [9] предложено $n = \sqrt{N + \bar{N}}$), $f^\Delta(r_i, r_n)$ — функция расстояния между объектами r_i и r_n в l -мерном пространстве. В качестве расстояния предлагается евклидово расстояние между точками в нормированном пространстве:

$$f^\Delta(r_i, r_n) = \sqrt{\sum_{l=1}^l \left(\frac{r_{jl} - r_{nl}}{r_l^{\max} - r_l^{\min}} \right)^2} \bigg| r_l^{\max} = \\ = \max R_l, r_l^{\min} = \min R_l.$$

2.4. Расчет фитнес-функции

$$\text{fitness}(r_i) = \text{density}(r_i) + \text{weakness}(r_i).$$

3. Отбор популяции.

3.1. Копирование всех недоминируемых решений (то есть тех, у которых фитнес-функция меньше 1) в архив следующего шага

$$\bar{W}(t+1) = \{ r \mid r \in W(t) \cup \bar{W}(t) \wedge \text{fitness}(r) < 1 \}.$$

3.2. Если количество недоминируемых решений совпадает с размером архива, то есть

$$\text{card}(\bar{W}(t+1)) = \bar{N},$$

то отбор популяции закончен (переход к п. 4).

3.3. Если количество недоминируемых решений мало:

$$\text{card}(\bar{W}(t+1)) < \bar{N},$$

то лучшие $\bar{N} - \text{card}(\bar{W}(t+1))$ доминируемых решений из множества $W(t) \cup \bar{W}(t)$ копируются в новый архив. Для этого множество доминируемых решений

$$\{w \mid w \in W(t) \cup \bar{W}(t) \wedge \text{fitness}(w) \geq 1\}$$

сортируется в соответствии с фитнес-функцией и копируются первые $\bar{N} - \text{card}(\bar{W}(t+1))$ решений с $\text{fitness}(W) \geq 1$ в $\bar{W}(t+1)$.

3.4. Если количество недоминируемых решений больше архива, запускается процедура фильтрации архива. Сущность фильтрации архива заключается в поиске наиболее близко расположенных решений, объединении их в кластер и замене всего множества решений центроидом данного кластера. В отличие от изначальной версии алгоритма [3], предлагается альтернативная процедура фильтрации с применением метода кластеризации k -means [5]. Применение данной процедуры обеспечивает равномерность фронта Парето и сходимость алгоритма.

3.4.1. Генерирование \bar{N} центров кластеров, в качестве которых используются первые \bar{N} недоминируемых решений, входящих в $W(t) \cup \bar{W}(t)$:

$$\bar{W}_{m=0} = \left\{ \begin{array}{l} \tilde{r}_i : \tilde{r}_i = r_i, i = \overline{1, \bar{N}}, \\ r_i \in W(t) \cup \bar{W}(t) \wedge \text{fitness}(r) < 1 \end{array} \right\},$$

где \tilde{r}_i — центр i -го кластера;

m — номер шага кластеризации.

3.4.2. Отнесение всех недоминируемых решений множества $W(t) \cup \bar{W}(t)$ к кластерам:

$$\left\{ \bar{R}_i = \left\{ \begin{array}{l} r_j : j = \arg \min_{j=i, \bar{N}} (f^\Delta(r_j, \tilde{r}_i)) \\ r_j \in W(t) \cup \bar{W}(t) \wedge \text{fitness}(r) < 1 \end{array} \right\} \right\}.$$

3.4.3. Расчет новых центров кластеров

$$\bar{W}_{m+1} = \{ \tilde{r}_i = f^A(\bar{R}_i) \},$$

где $f^A(\bar{R}_i)$ — функция расчета средних значений

$$f^A(\bar{R}_i) = \left(\sum_{j=1}^{\text{card}(\bar{R}_i)} r_{jl} / \text{card}(\bar{R}_i) \mid l = \overline{1, l} \right).$$

3.4.4. Вычисление признака остановки кластеризации

$$\bigwedge_{i=1}^{\bar{N}} (f^\Delta(\tilde{r}_{i,m}, \tilde{r}_{i,m+1}) < \delta) \mid \tilde{r}_{i,m} \in \bar{W}_m, \tilde{r}_{i,m+1} \in \bar{W}_{m+1}.$$

3.4.5. Наполнение архива усредненными значениями (центрами кластеров)

$$\bar{W}(t+1) = \bar{W}.$$

4. Если не выполняется условие останова $t > T^{STOP}$, осуществляется переход к этапу 5, в противном случае — вывод искомого решения

$$R^* = \bar{W}(t+1).$$

5. Выбор потомков для размножения на основании метода случайного отбора из множества $\bar{W}(t+1)$.

6. Применение процедуры размножения и мутации. Закон мутации генов использовался следующий [6]:

$$\tilde{r}_{il} = r_{il} + (-1)^{\tilde{b}} (r_i^{\max} - r_i^{\min}) \cdot \sum_{k=1}^K \tilde{a} \cdot 2^{-k},$$

где K — положительное число (точность мутации);

\tilde{a} , \tilde{b} — вероятностные коэффициенты:

$$\tilde{a} = \begin{cases} 0, & \text{с вероятностью } (K-1)/K; \\ 1, & \text{с вероятностью } 1/K. \end{cases}$$

$$\tilde{b} = \begin{cases} 0, & \text{с вероятностью } 0,5; \\ 1, & \text{с вероятностью } 0,5. \end{cases}$$

7. Удаление неверных решений, то есть решений, для которых $f(r) \notin \mathcal{E}^*$. Повторение шага 6 для удаленных решений.

8. Помещение результирующей популяции в $W(t+1)$. Увеличение времени на единицу и переход к шагу 2.

**Результаты численных исследований
генетического алгоритма**

Рассмотрим пример применения генетического алгоритма для обоснования требований к характеристикам процесса управления многоспутниковой орбитальной группировкой (ОГ) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Пусть даны агрегированные характеристики ОГ, а также процесса ее применения (характеристики входного потока заявок на получение данных ДЗЗ и процесса контроля результатов выполнения заявок):

$$S^y = \{\lambda^x, \tau^x, I, \mu^y, \tau^y, p^y, \tau^f, \tau^o, p^a, p^b\},$$

где λ^x — интенсивность входного потока заявок;
 τ^x — требуемая оперативность выполнения заявки;

I — количество космических аппаратов (КА) в ОГ;

μ^y — пропускная способность ОГ, среднее количество заявок, которое может выполнить ОГ в единицу времени;

τ^y — характеристика оперативности ОГ, средняя длительность выполнения заявки (без учета загруженности ОГ);

p^y — вероятность получения требуемой информации при условии выполнения заявки ОГ;

τ^f — среднее время возникновения нештатной ситуации (под нештатной понимается любая ситуация, требующая вмешательства системы управления — отказ бортового оборудования, отклонение параметров движения КА от прогнозных значений, отклонение бортовой шкалы времени и т.д.);

τ^o — длительность контроля результатов выполнения заявки (заявка полагается выполненной, если получено изображение с требуемым разрешением, отсутствием смаза изображения, отсутствием облачности и т.д.);

p^a — вероятность ошибки первого рода при контроле результатов выполнения заявки;

p^b — вероятность ошибки второго рода при контроле результатов выполнения заявки.

Требуется обосновать характеристики процесса управления ОГ (физический смысл данных характеристик раскрыт в [7, 8])

$$S^y = \{d, \pi, \tau^z, \tau^u\},$$

где d — достоверность данных о состоянии ОГ;

π — полнота данных о состоянии ОГ;

τ^z — длительность анализа данных о состоянии ОГ;

τ^u — длительность выработки управляющих воздействий.

Агрегированная модель оценивания эффективности функционирования ОГ разработана на основании непрерывной марковской модели, предложенной в [9]. Граф состояний ОГ и интенсивности переходов представлены на рис. 1.

На рис. 1 обозначены: S_0 — начало планирования выполнения заявки на получение данных ДЗЗ, S_1 — начало выполнения заявки, S_2 — состояние, соответствующее выполнению заявки, S_3 — состояние, соответствующее невыполнению заявки, S_4 — нештатная ситуация при обработке заявки, S_5 — состояние, соответствующее принятию правильного решения о выполнении заявки, S_6 — состояние, соответствующее принятию неправильного решения о выполне-

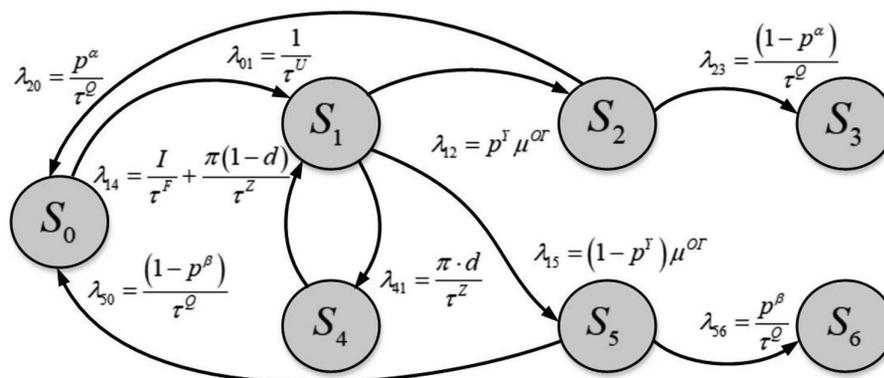


Рис. 1. Граф состояний ОГ ДЗЗ при выполнении заявки

нии заявки, μ^{OG} — интенсивность выполнения заявки ОГ:

$$\mu^{OG} = \begin{cases} \frac{\mu^Y}{\tau^Y \lambda^{BX}}, & \frac{\lambda^{BX}}{\tau^Y} > 1; \\ \frac{1}{\tau^Y}, & \frac{\lambda^{BX}}{\tau^Y} \leq 1. \end{cases} \lambda^{BX} =$$

$$= \lambda^X + \lambda^X (1 - p^Y) (1 - p^B) + \lambda^X \cdot p^Y \cdot p^A.$$

Динамика изменения вероятностей описывается системой дифференциальных уравнений, построенных по правилу А.Н. Колмогорова:

$$\begin{cases} \dot{p}_0(t) = p_2(t)\lambda_{20} + p_5(t)\lambda_{50} - p_0(t)\lambda_{01}; \\ \dot{p}_1(t) = p_0(t)\lambda_{01} + p_4(t)\lambda_{41} - \\ - p_1(t)(\lambda_{12} + \lambda_{15} + \lambda_{14}); \\ \dot{p}_2(t) = p_1(t)\lambda_{12} - p_2(t)(\lambda_{20} + \lambda_{23}); \\ \dot{p}_3(t) = p_2(t)\lambda_{23}; \\ \dot{p}_4(t) = p_1(t)\lambda_{14} - p_4(t)\lambda_{41}; \\ \dot{p}_5(t) = p_1(t)\lambda_{15} - p_5(t)(\lambda_{50} + \lambda_{56}); \\ \dot{p}_6(t) = p_5(t)\lambda_{56}. \end{cases}$$

Цель процесса функционирования ОГ заключается в переходе в невозвратное состояние S_3 за время τ^X . В качестве показателя эффективности функционирования ОГ выберем вероятность данного события, следовательно, $\Theta = [0,1]$. Агрегированную модель процесса функционирования ОГ можно представить в виде

$$\Theta = f(S^Y) = p_3(\tau^X, S^{\bar{Y}}, S^Y).$$

Критерий оценивания эффективности можно сформулировать как множество $\Theta^* = \{\Theta | \Theta \in \Theta, \Theta \geq \Theta^*\}$, где Θ^* — требуемое значение эффективности.

Для проведения численных исследований работоспособности генетического алгоритма и адекватности методики разработан программный модуль, реализующий генетический алгоритм [10]. Численные значения характеристик модели приведены в [9].

Исследования проводились для требований к эффективности $\Theta^* = 0,85$, $\Theta^* = 0,87$, $\Theta^* = 0,9$, $\Theta^* = 0,95$.

Выходными данными программного модуля является множество Парето-оптимальных векторов S^Y в пространстве характеристик процесса управления (фронт Парето). Каждый вектор представляет собой комбинацию характеристик, при которых выполняется ограничение $f(S^Y) \in \Theta^*$, обеспечивающих выполнение требований (табл.).

Для иллюстрации результатов работы генетического алгоритма были исследованы пары d, π (при значениях $\tau^U = 0,1$ ч и $\tau^Z = 0,5$ ч) и τ^U, τ^Z (при значениях $d = 0,95$ и $\pi = 0,7$). Результаты расчетов возможных вариантов характеристик представлены на рис. 2 и 3.

Проведенные эксперименты показали сходимость результатов уже после 10 шагов генетического алгоритма.

Заключение

Таким образом, предложен генетический алгоритм обоснования требований к характеристикам технических систем, основанный на алгоритме многокритериальной оптимизации SPEA2. Базовый алгоритм модифицирован для решения обратной задачи параметрического синтеза и дополнен алгоритмом фильтрации популяции, основанным на методе кластеризации k -means, который обеспечивает равномерность фронта Парето. Разработанный алгоритм может быть использован на этапе разработки

Таблица

Структура выходных данных программного модуля

Критерий	№ варианта	Требования к характеристикам S^Y				Θ
		τ^U	d	π	τ^Z	
$\Theta^* = 0,85$		0,26841	0,91973	0,80389	3,30805	0,86236
		0,01292	0,99902	0,80663	8,85426	0,85505

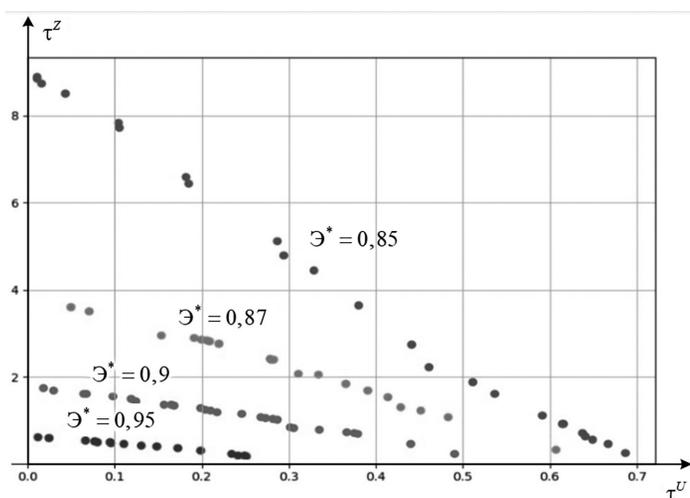


Рис. 2. Фронт Парето для τ^U , τ^Z

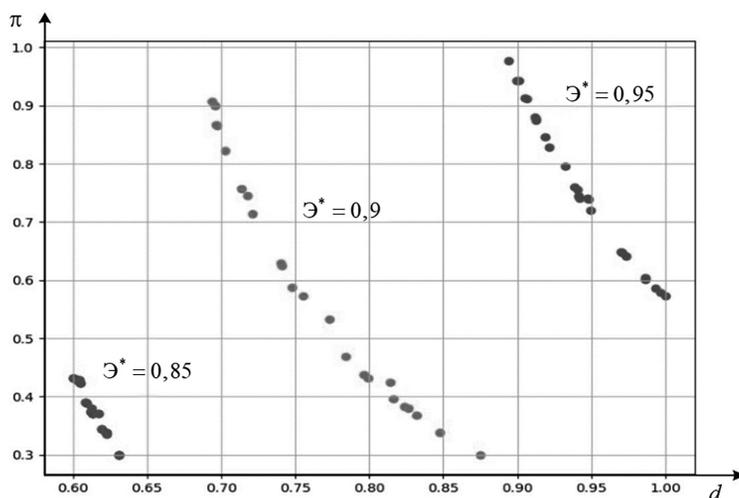


Рис. 3. Фронт Парето для d и π

ТЗ на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию СТС при оформлении раздела «Технические требования к изделию». В результате применения алгоритма формируется не одно, а множество Парето-оптимальных решений, которое предоставляет определенную свободу выбора при принятии технических решений в ходе проектирования СТС.

Для проверки алгоритма разработан программный модуль, с применением которого проведены численные исследования по обоснованию характеристик процесса управления многоспутниковой ОГ ДЗЗ, которые подтверждают работоспособность алгоритма и сходимость результатов.

Литература

1. ГОСТ 15.016–2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению. М.: Стандартинформ, 2017. 30 с.
2. Петухов Г.Б., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М.: АСТ, 2006. 504 с.
3. Zitzler E., Laumanns M., Thiele L. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm // TIK Report. 2001. Vol. 103.
4. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка переговоров при согласовании управленческих решений. М.: Синтез, 2003. 284 с.

5. Барсегян А.А., Куприянов М.С., Холлод И.И. и др. Анализ данных и процессов: учеб. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 512 с.

6. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: учеб.-метод. пособие; под ред. Ю.Ю. Тарасевича. Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. 87 с.

7. Данилюк Б.А., Минаков Е.П., Привалов А.Е., Александров М.А. Аналитический метод оценивания эффективности управления киберфизическими системами с учетом характеристик их цифровых двойников // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2023. № 4. С. 79–89.

8. Минаков Е.П., Привалов А.Е., Бугайченко П.Ю. Метод оценивания характеристик цифровых моделей киберфизических систем на основе множественного регрессионного анализа результатов их применения // Труды МАИ. 2023. № 131. 29 с.

9. Минаков Е.П., Привалов А.Е., Бугайченко П.Ю. Модель оценивания эффективности управления многоспутниковыми орбитальными системами // Труды МАИ. 2022. № 125. 26 с.

10. Программный модуль поиска Парето-оптимальных решений на основе генетического алгоритма SPEA2: свидетельство о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2024619573; № 2024618491 заявл. 13.04.2024; опубл. 24.04.2024.

References

1. GOST 15.016–2016. System for development and launching products into production. Technical specifications. Requirements for content and design. Moscow: Standartinform, 2017. 30 p.

2. Petukhov G.B., Yakunin V.I. Improving the strength Pareto evolutionary algorithm [Methodological Foundations of External Design of Purposeful Processes and Purposeful Systems]. Moscow, AST, 2006, 504 p.

3. Zitzler E., Laumanns M., Thiele L. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm // TIK Report. 2001. Vol. 103.

4. Trakhtengerts E.A. Computer support for negotiations in coordinating management decisions. M.: Sinteg. 2003. 284 p.

5. Barsegyan A.A., Kupriyanov M.S., Khodlod I.I. et al. Analysis of data and processes: textbook. 3rd ed., revised and enlarged. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2009. 512 p.

6. Panchenko T.V. Genetic algorithms: a teaching aid; ed. by Yu. Yu. Tarasevich. Astrakhan: Publishing House «Astrakhan University», 2007. 87 p.

7. Danilyuk B.A., Minakov E.P., Privalov A.E., Alexandrov M.A. Analytical method for assessing the efficiency of cyber-physical systems control taking into account the characteristics of their digital twins // Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. 2023. № 4. Pp. 79–89.

8. Minakov E.P., Privalov A.E., Bugaychenko P.Yu. Method for assessing the characteristics of digital models of cyber-physical systems based on multiple regression analysis of the results of their application // Proceedings of MAI. 2023. № 131. 29 p.

9. Minakov E.P., Privalov A.E., Bugaychenko P.Yu. Model for assessing the efficiency of multi-satellite orbital systems control // Proceedings of MAI. 2022. № 125. 26 p.

10. Software module for searching for Pareto-optimal solutions based on the SPEA2 genetic algorithm: certificate of state registration of computer programs № 2024619573; № 2024618491 declared 13.04.2024; published 24.04.2024.

УДК 355/359.07

doi: 10.53816/23061456_2025_1-2_23

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА
РЕМОНТНЫХ ОРГАНОВ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РЕМОНТА
ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ**

**THE METHOD OF DETERMINING THE RATIONAL NUMBER
OF REPAIR ORGANS TO PERFORM REPAIRS**

Канд. воен. наук А.Н. Каптюх, канд. техн. наук А.М. Мишаков

Ph.D. A.N. Kaptyukh, Ph.D. A.M. Mishakov

Военная академия материально-технического обеспечения им. А.В. Хрулева

В статье обоснованы технические инструменты решения актуальной задачи пропускной способности ремонтного органа в системе восстановления военной техники и раскрыты более подробно шаги определения достаточного количества ремонтных отделений, располагаемых на различных уровнях. При малом количестве отделений уровень пропускной способности ремонтного органа не позволит восстановить всю поступающую военную технику в течение очередного цикла накопления (сутки боевых действий), что приводит к возрастающей загрузке ремонтного органа. Ключевым направлением для оперативного принятия решения на ремонт поврежденных образцов военной техники является расчет необходимого количества ремонтных отделений для ремонта различных образцов военной техники, но также, в зависимости от их загрузки, определение места их размещения в ремонтном органе различных уровней.

Ключевые слова: пропускная способность, ремонтный орган, система, загрузка, военная техника.

The article substantiates the technical tools for solving the urgent problem of the capacity of the repair body in the military equipment restoration system and reveals in more detail the steps for determining a sufficient number of repair departments located at various levels. With a small number of departments, the level of capacity of the repair body will not allow restoring all incoming military equipment during the next accumulation cycle (day of hostilities), which leads to an increasing workload of the repair body. The key direction for the prompt decision-making on the repair of damaged samples of military equipment is the calculation of the required number of repair departments for the repair of various samples of military equipment, but also, depending on their workload, determining the location of their placement in the repair body of various levels.

Keywords: throughput, repair body, system, workload, military equipment.

Система восстановления военной техники имеет сложную пространственную структуру, основными элементами которой являются ремонтные отделения и подразделения. Существующая

система восстановления поврежденной военной техники предполагает передачу не восстанавливаемых в подразделениях образцов военной техники в вышестоящие ремонтные органы. В течение

ние временного интервала продолжительностью T на сборном пункте поврежденных машин накапливаются поврежденные образцы, подлежащие ремонту в ремонтном органе. По окончании рассматриваемого временного интервала осуществляется групповое транспортирование (передача в указанных районах) поврежденных образцов военной техники в ремонтный орган, где проводится их ремонт. После этого все образцы возвращаются в штатные части и подразделения. Наиболее важным показателем, определяющим пропускную способность ремонтного органа, является количество располагаемых в нем ремонтных отделений. При малом количестве отделений уровень пропускной способности ремонтного органа не позволит восстановить всю поступающую военную технику в течение очередного цикла накопления (сутки боевых действий), что приведет к возрастающей от цикла к циклу загруженности ремонтного органа. В таких условиях актуальной является задача определения достаточного количества ремонтных отделений, располагаемых на различных уровнях [1–4, 8–11].

Ниже представлена методика расчета требуемого количества разнотипных ремонтных отделений в ремонтном органе.

Предположим, что время функционирования образцов военной техники является случайной величиной с экспоненциальным распределением ($\lambda_s, s = \overline{1, S}$ — интенсивность потока отказов образцов s -го типа, S — общее количество типов восстанавливаемых образцов).

Также имеется H типов ремонтных отделений. При этом $M_h, h = \overline{1, H}$ — количество ремонтных отделений h -го типа, располагаемых ремонтных органов.

Условно определим, что номенклатура образцов военной техники, составляющих подгруппы, восстанавливаемых в каждом ремонтном органе, известна. При этом восстановление в вышестоящем ремонтном органе является однофазным, то есть образец полностью восстанавливается в одном ремонтном органе (*рем. взвод, рвб, орвб*), при необходимости ремонтными отделениями. Образцы одной группы являются однородными по восстановлению, то есть случайная величина — время восстановления в ремонтном органе образцов одной группы — имеет одинаковое распределение. Предположим,

что указанная случайная величина распределена экспоненциально с различной для разных подгрупп военной техники интенсивностью восстановления $\mu_h, h = \overline{1, H}$. Обозначим t_{3s} — продолжительность транспортирования (эвакуации) в вышестоящий ремонтный орган s -го образца находящегося в j -м ремонтном органе низшего звена (дивизион — *рвб, рвб-орвб*). Время пребывания в ремонтных органах группы всех поступивших образцов военной техники обозначим τ .

Необходимо определить такие значения $M_h^*, h = \overline{1, H}$, которые с заданной вероятностью P_3 обеспечивали бы восстановление группы всех поступивших в вышестоящий ремонтный орган отказавших образцов военной техники за время T к моменту поступления следующей группы (следующие сутки боевых действий):

$$P\{\tau < T\} = P_3. \quad (1)$$

После прихода группы образцов военной техники в *рвб (орвб)* она разбивается на подгруппы, которые обслуживаются независимо ремонтными отделениями соответствующих h -х типов. Тогда для вероятности $P\{\tau < T\}$ имеем:

$$P\{\tau < T\} = P\left\{\bigwedge_{h=1}^H (\tau < T)\right\} = \prod_{h=1}^H P\{\tau_h < T\}, \quad (2)$$

где τ_h — время восстановления подгруппы поступивших в вышестоящий ремонтный орган образцов h -х ремонтных отделений. С учетом выражения (2) неравенство (1) преобразуем к виду:

$$\prod_{h=1}^H P\{\tau_h < T\} \geq P_3,$$

которое заведомо выполняется, если

$$\forall h = \overline{1, H} : P\{\tau_h < T\} \geq P_3^{1/H}. \quad (3)$$

Таким образом, поставленная задача декомпозируется на ряд независимых задач определения количества ремонтных отделений одного типа исходя из условий (3). Поэтому для простоты рассуждений рассмотрим ремонтный орган одного типа, на котором восстанавливается вся номенклатура поступающих образцов военной техники.

Обозначим $l_j, j = \overline{1, J}$ — количество образцов, поступающих в вышестоящий ремонтный

орган с j -го ремонтного органа в момент времени t_j (от начала нового цикла накопления); $g_s, s = \overline{1, S}$ — количество образцов s -го типа, накопленных во всех ремонтных органах за время T ; R — общее количество образцов, накопленных за время T во всех ремонтных органах и поступающих в вышестоящий ремонтный орган; P_r — вероятность того, что размер поступившей группы отказавших образцов равен $r = 0, 1, \dots, R$; τ_r — время восстановления в ремонтном органе группы из r образцов; $P_s^m(t), s \geq 0, 0 \leq m \leq s$ — вероятность того, что к моменту t в ремонтном отделении будет восстановлено ровно m образцов при условии, что в начальный момент времени их было ровно s и на отрезке $(0, t)$ другие образцы не поступали.

С учетом введенных обозначений P_r определяется по формуле:

$$P_r = \sum_{g_1 + \dots + g_s = r} \prod_{s=1}^S \binom{n_s}{g_s} (1 - e^{-\lambda_s T})^{g_s} e^{-\lambda_s T(n_s - g_s)}, \quad (4)$$

где $\binom{n_s}{g_s}$ — число сочетаний из n по g

($\forall n, g: n \geq 0, 0 \leq g \leq n$). Запись суммы в выражении (4) означает, что в нее включаются только те члены, для которых выполняется следующее условие:

$$\sum_{s=1}^S g_s = r.$$

Для расчета времени восстановления одного конкретного образца вооружения $n_s = g_s = 1$, введем понятие коэффициента эвакуации K_3 , который позволит скорректировать при дальнейших расчетах необходимые производственные возможности ремонтных органов и на их основании определить уровень ремонтного органа, в котором будет осуществляться ремонт образца в установленные сроки.

С учетом выражения (4), значение коэффициента будет рассчитываться:

$$K_3 = (1 - e^{-T(1-\Delta T)})^{t_3},$$

где T — время, имеющееся для восстановления образца военной техники;

ΔT — время за период восстановления, затрачиваемое на ожидание эвакуации;

t_3 — продолжительность эвакуации до ремонтного органа.

Используя формулу полной вероятности (2), для $P\{\tau < T\}$ получим выражение:

$$P\{\tau < T\} = \sum_{r=1}^R P_r P\{\tau_r < T\}.$$

При этом $P\{\tau < T\}$ находим по формуле:

$$P\{\tau < T\} = \sum_{l_1 + \dots + l_j = r} \left(\sum_{m_1=0}^{S_1} P_{S_1}^{m_1}(a_1) \sum_{m_2=0}^{S_2} P_{S_2}^{m_2}(a_2) \times \dots \times \right. \\ \left. \times \sum_{m_{j-1}=0}^{S_{j-1}} P_{S_{j-1}}^{m_{j-1}}(a_{j-1}) P_{S_j}^{m_j}(a_j) \right),$$

где для сокращения записи приняты следующие обозначения:

$$a_1 = t_j; a_j = t_j - t_{j-1}, j = \overline{2, J-1};$$

$$a_j = T - t_j; S_1 = l_1; S_j = \sum_{i=1}^j l_i - \sum_{i=1}^{j-1} m_i, j = \overline{2, J}.$$

Таким образом, для вычисления вероятности $P\{\tau < T\}$ необходимо определять $P_s^m(t)$ для различных значений s и m .

Рассмотрим следующие варианты:

1. $s \leq m$. В этом случае все s имеющихся в ремонтном органе поврежденных образцов военной техники поступает на обслуживание:

$$P_s^m(t) = \binom{s}{m} (1 - e^{-\mu t})^m e^{-\mu t(s-m)}.$$

2. $S > M$. При таком варианте все ремонтные отделения остаются занятыми до тех пор, пока не будут восстановлены поврежденные образцы $V = S - M$. Поток восстановлений является пуассоновским с интенсивностью μM , а $P_s^m(t)$ определяется по формуле [5, 6]:

$$P_s^m(t) = \frac{(\mu M t)^m}{m!} e^{-\mu M t}.$$

Если $m > S - M$, то для функции распределения момента окончания восстановления V -й составляющей образца имеем:

$$F_v(t) = P\{\tau_v < t\} = \sum_{i=V}^{+\infty} \frac{(\mu M t)^i}{i!} e^{-\mu M t},$$

а функция плотности распределения указанного момента определяется следующим образом:

Список источников

$$f_v(t) = \frac{\partial F_v(t)}{\partial t} = \frac{(\mu M)^v}{(V-1)!} t^{(V-1)} e^{-\mu M t}.$$

Дифференциал $\partial P_s^m(x)$ записывается исходя из того, что к моменту x будет восстановлено $V = S - M$ поврежденных образцов, а за время $(t - x)$ — оставшиеся $m - V$ образцов.

$$\partial P_s^m(x) = \frac{(\mu M)^V}{(V-1)!} x^{V-1} e^{-\mu M x} \partial x (1 - e^{-\mu(t-x)})^{(m-V)} \times e^{-\mu(t-x)(s-m)}.$$

Тогда для $P_s^m(t)$ окончательно имеем:

$$P_s^m(t) = \int_0^t \frac{(\mu M)^V}{(V-1)!} x^{V-1} e^{-\mu M x} (1 - e^{-\mu(t-x)})^{(m-V)} \times e^{-\mu(t-x)(s-m)} \partial x. \quad (5)$$

Таким образом, для каждого заданного M с использованием выражений (3), (5) определяется значение вероятности $P\{\tau < t\}$.

Задача решается при последовательном вычислении достаточного количества ремонтных отделений h -го типа M_h^* для $h = 1, H$. При этом каждое M_h^* определяется как минимальное из тех значений M_h , для которых выполняется условие (3):

$$M_h^* = \min(M_h = 1, 2, \dots / P\{\tau_s < T\} \geq P_s^{V/H}).$$

Данная методика позволяет рассчитать не только необходимое количество ремонтных отделений для ремонта различных образцов военной техники, но также в зависимости от их загруженности определить место их размещения в ремонтном органе различных уровней. Применяв количественное значение P_r , в дальнейшем при расчете производственных возможностей используется как коэффициент увеличения напряженности работы ремонтного органа и соответственно определяется место проведения ремонта образца.

Применение данной методики с использованием ПЭВМ позволит оперативно принимать решение на ремонт поврежденных образцов военной техники в ремонтном органе различных уровней, а также обосновывать состав выездных ремонтных групп для восстановления комплексов образцов военной техники, с известными трудоемкостями проводимых работ [8–11].

1. Бабенков В.И., Гасюк Д.П., Дубовский В.А. Метод оценивания рисков на этапах жизненного цикла образцов вооружения и военной техники // Вооружение и экономика. 2020. № 3 (53). С. 59–66.

2. Бабенков В.И., Романчиков С.А. Направления повышения эксплуатационно-технических характеристик технических средств материально-технического обеспечения воинских подразделений в Арктической зоне // Научный вестник Вольского военного института материального обеспечения. 2019. № 3 (51). С. 16–19.

3. Бабенков В.И. Военно-экономическое обоснование показателей Государственной программы вооружения по созданию инновационных технических средств служб материально-технического обеспечения / Научные проблемы материально-технического обеспечения ВС РФ: сб. науч. тр. СПб.: ВАМТО. 2020. № 2 (16). С. 7–16.

4. Буланов С.В., Бабенков В.И. Метод оценки ремонтпригодности теплогенерирующих устройств технических средств продовольственной службы / Комплексы и системы военного назначения: сб. науч. статей по материалам межведомственной научно-практической конференции (18 ноября 2022 г.). Пермь: ПВИ войск национальной гвардии, 2022. С. 9–14.

5. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1980. 208 с.

6. Выводы из оценки возможного масштаба и характера действий воздушного противника по войскам и объектам МВО. М.: Управление войсковой ПВО МВО. 2002. 24 с.

7. Гаврилов А.Д. Проблемы управления огнем зенитных формирований войсковой ПВО и методология их решения на базе использования технологии искусственного интеллекта: монография. Смоленск: Воен. университет войск ПВО, 2002. 146 с.

8. Горбачев Д.В. Обоснование технологии ремонта изделий боевых средств ЗРС фронтового звена за счет оптимизации структуры системы ТО и ремонта: дис. канд. техн. наук: 20.02.17. СПб.: СПбВЗРКУ, 1997. 216 с.

9. Гусев А.Б. Военно-экономическое обоснование целесообразности совершенствования системы восстановления вооружения и военной

техники. Смоленск: Военная академия войск ПВО, 2007. 12 с.

10. Гусев А.Б. О некоторых недостатках моделирования процесса функционирования системы ремонта вооружения // Современные проблемы спец. и техн. обеспечения РВиА в операции: сб. материалов науч. тр. межвуз. науч.-техн. семинара. СПб., МВАА, 2006. С. 194–195.

11. Гусев А.Б. О подходе к моделированию процесса функционирования системы ремонта вооружения // Современные проблемы спец. и техн. обеспечения РВиА в операции: сб. материалов науч. тр. межвуз. науч.-техн. семинара СПб., МВАА, 2006. С. 166–197.

References

1. Babenkov V.I., Gasyuk D.P., Dubovsky V.A. Method of risk assessment at the stages of the life cycle of weapons and military equipment // *Arms and Economy*, 2020. No 3 (53). Pp. 59–66.

2. Babenkov V.I., Romanchikov S.A. Directions for improving the operational and technical characteristics of technical means of material and technical support of military units in the Arctic zone // *Scientific Bulletin of the Volsk Military Institute of Material Support*. 2019. No 3 (51). Pp. 16–19.

3. Babenkov V.I. Military-economic substantiation of the indicators of the State armament program for the creation of innovative technical means of material and technical support services. SPb.: VAMTO, Collection of scientific papers «Scientific problems of material and technical support of the RF Armed Forces». 2020. No 2 (16). Pp. 7–16.

4. Bulanov S.V., Babenkov V.I. Method for assessing the maintainability of heat-generating devices of technical means of the food service // *Military complexes and systems: a collection of scientific articles based on the materials of the inter-departmental scientific and practical conference (November 18, 2022)*. Perm: PVI of the National Guard Troops, 2022. Pp. 9–14.

5. Ventzel E.S. *Operations Research: Objectives, Principles, Methodology*. Moscow: Nauka, 1980. 208 p.

6. *Conclusions from the Assessment of the Possible Scale and Nature of Actions of an Air Enemy Against Troops and Facilities of the Moscow Military District*. Moscow: Air Defense Directorate of the Moscow Military District. 2002. 24 p.

7. Gavrillov A.D. *Problems of Fire Control of Anti-Aircraft Formations of the Air Defense Forces and the Methodology of Their Solution Based on the Use of Artificial Intelligence Technology: monograph*. Smolensk, Military University of the Air Defense Forces of the Russian Federation, 2002. 146 p.

8. Gorbachev D.V. *Justification of the Technology for Repairing Front-Echelon Air Defense Missile Systems by Optimizing the Structure of the Maintenance and Repair System: Dis. Candidate of Technical Sciences: 20.02.17*. SPb.: SPbVZRKU, 1997. 216 p.

9. Gusev A.B. *Military-economic substantiation of the feasibility of improving the system for the restoration of weapons and military equipment*. Smolensk: Military Academy of the VPVO of the RF Armed Forces, 2007. 12 p.

10. Gusev A.B. On some shortcomings of modeling the functioning of the weapons repair system // *Modern problems of special. and technical support of missile and artillery in operations: collection of materials of scientific. Works of the inter-university scientific and technical seminar. Mikhailovskaya Military Art. Academy of SPb.*, 2006. Pp. 194–195.

11. Gusev A.B. On the approach to modeling the functioning of the weapons repair system // *Modern problems of special and technical. Providing Missile Forces and Artillery in Operations: Collection of Materials of Scientific Works of the Inter-University Scientific and Technical Seminar. Mikhailovskaya Military Art. Academy of SPb.*, MVAА, 2006. Pp. 166–197.

УДК 621.396

doi: 10.53816/23061456_2025_1-2_28

**МОДЕЛЬ СЕТИ РАДИОСВЯЗИ
КАК ОСНОВА ЧАСТОТНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ**
RADIO NETWORK MODEL AS A BASIS FOR FREQUENCY PLANNING

Д.И. Коньков

D.I. Kon'kov

Военная академия связи им. С.М. Буденного

Материалы статьи посвящены вопросу создания модели сети радиосвязи, которая позволяет учесть состав объекта исследования, проблемы электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, а также условия распространения и учет замираний радиоволн. Показаны постановка задачи, входные и выходные данные модели, а также алгоритм ее создания. Рассмотрен способ представления модели сети радиосвязи в виде набора радиосетей с массивом данных, дающим полное представление о рассматриваемом объекте с точки зрения управления радиочастотным спектром, а также расчета значения вероятности связи, как показателя электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: сеть радиосвязи, электромагнитная совместимость, радиочастотный спектр, частотное планирование, затухание и замирание радиоволн, вероятность связи.

The article is devoted to the issue of creating a radio communication network model that allows taking into account the composition of the object of study, problems of electromagnetic compatibility of radio electronic equipment, as well as the conditions of propagation and accounting for fading of radio waves. The statement of the problem, input and output data of the model, as well as the algorithm for its creation are shown. The method of representing the radio communication network model as a set of radio networks with an array of data that gives a complete idea of the object under consideration from the point of view of radio frequency spectrum management, as well as calculating the value of the probability of communication as an indicator of electromagnetic compatibility is considered.

Keywords: radio communication network, electromagnetic compatibility, radio frequency spectrum, frequency planning, attenuation and fading of radio waves, probability of communication.

Неотъемлемым условием качественного функционирования сети радиосвязи является разработка радиоданных, позволяющих обеспечить требуемый уровень помехоустойчивости. От того, с каким качеством и в какие сроки разрабатываются радиоданные, существенно зависят основные свойства радиосвязи.

Разработка радиоданных представляет собой достаточно сложный организационно-технический процесс, включающий в себя решение целого ряда разнообразных по своему характеру задач и требующий больших трудозатрат должностных лиц органов управления радиосвязью [1–4]. Рост количества применяемых ра-

диосредств и повышение требований к радиосвязи неизбежно вызывают усложнение данного процесса. Кроме того, необходимо учитывать воздействие непреднамеренных помех, которые по-прежнему оказывают значительное влияние на сети радиосвязи, что приводит к снижению помехоустойчивости в сложной электромагнитной обстановке.

Динамика развития современных радиоэлектронных средств (РЭС) показывает тенденцию построения архитектуры сетей радиосвязи в формате распределенных систем локальных сетей, объединенных опорными сетями, как показано на рис. 1.

При этом существующие методики распределения частот для сетей радиосвязи не обеспечивают требуемого уровня автоматизации как самого процесса, так и качества выходных данных. Это связано в первую очередь с разработкой новых средств и комплексов радиосвязи с новыми режимами работы и расширением используемого диапазона частот. Увеличение объема радиоэлектронных средств на ограниченной местности в совокупности с различными радиотехническими комплексами влечет за собой значительный рост уровня непреднамеренных помех и обострение проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС).

Все перечисленные особенности приводят к необходимости создания нового аппарата частотного распределения. Для качественного решения данной задачи необходимо создание модели сети радиосвязи. Блок-схема построения данной модели представлена на рис. 2.

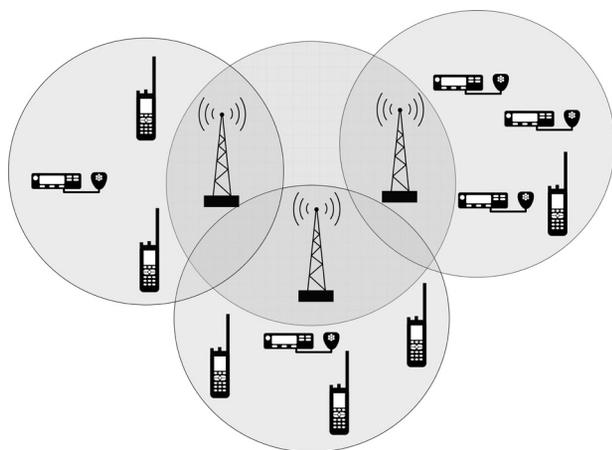


Рис. 1. Пример построения современной сети радиосвязи

Стоит заранее оговориться о том, что данная модель предполагает детерминированное распределение РЭС на карте местности. В связи с этим большое внимание при организации связи должно уделяться вопросу планирования. Оператор должен иметь представление о том, где на местности будут развернуты те или иные радиосети, а также знать какими именно средствами они будут образованы. Для каждого РЭС необходим набор данных, хранящихся в общей информационной базе, включающий в себя следующие сведения о применяемых радиосредствах:

- 1) диапазон рабочих частот РЭС Δf ;
- 2) массив самопораженных частот $f_{сп}$;
- 3) массив частот побочных излучений $f_{пи}$;
- 4) массив частот побочных каналов приема $f_{пк}$;

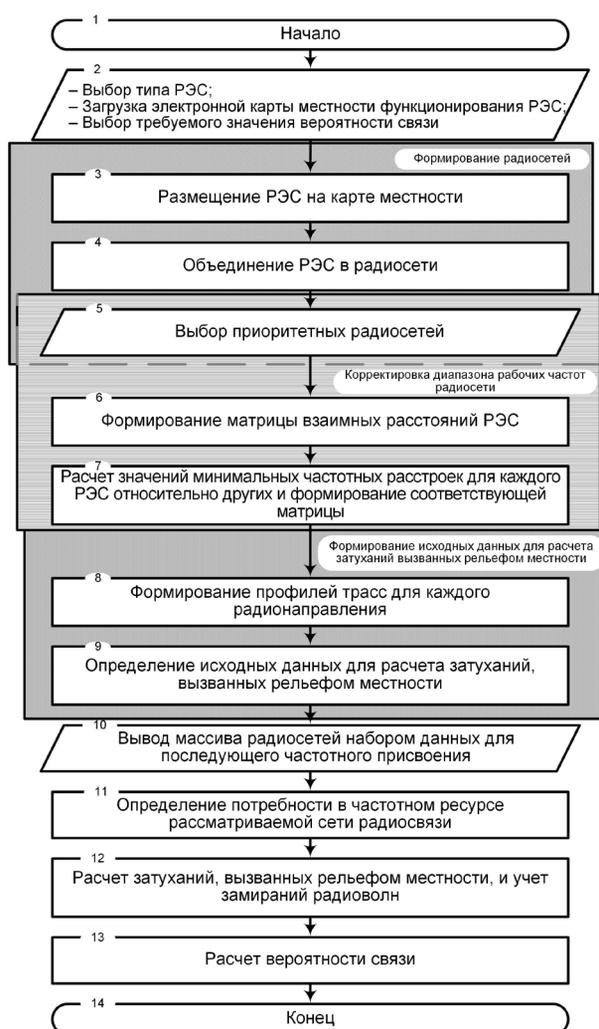


Рис. 2. Блок-схема построения модели сети радиосвязи

- 5) мощность на выходе усилителя P ;
- 6) коэффициент согласования по сопротивлению ξ_c ;
- 7) коэффициент согласования по поляризации ξ_n ;
- 8) коэффициент полезного действия фидера η_Φ ;
- 9) коэффициент прямоугольности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) приемника μ ;
- 10) дальность связи r_0 ;
- 11) требуемое значение вероятности связи $P_{\text{св тр}}$.

Также для определения коэффициента усиления G необходимо выбрать тип используемой совместно с РЭС антенны и место ее установки — для определения высоты подвеса. После расстановки радиостанций на электронной карте местности происходит формирование радиосетей, например: «Радиосеть № 27. Сеть ...». В случае необходимости радиосети присваивается приоритет. Расстановка приоритета актуальна только для сетей радиосвязи с режимами работы на фиксированной частоте и заключается в присвоении частот из нижнего диапазона с наибольшим значением вероятности связи, обеспечивающих лучшее распространение [5].

На следующем этапе для заданного размещения РЭС вычисляется матрица взаимных удалений $\|r_{ij}\|$ следующего вида (рис. 3), где, например, $r_{27.1/1.1}$ означает расстояние между первой радиостанцией радиосети 27 и первой радиостанцией радиосети 1. Далее на основе матрицы взаимных удалений с использованием выражения

$$\Delta f_{\text{доп } ij} = \begin{cases} \Delta f_0 \cdot \left(\frac{r_0^2}{r_{ij}^2} - 1 \right)^{\frac{\lg \mu}{3}} & \text{при } r_{ij} \leq r_0; \\ 0 & \text{при } r_{ij} > r_0, \end{cases}$$

формируется матрица допустимых частотных расстройк $\|\Delta f_{\text{доп } ij}\|$, $i, j = (\overline{1, N})$, $i \neq j$, обеспечивающих ЭМС для всех пар РЭС,

где Δf_0 — ширина полосы сигнала;

r_0 — расстояние взаимодействия РЭС при $f_{\text{доп}} = 0$ (под этим значением понимается максимальная дальность связи радиостанции);

r_{ij} — взаимное удаление РЭС (из матрицы взаимных удалений);

μ — коэффициент прямоугольности АЧХ приемника.

Следующая стадия заключается в формировании исходных данных для расчета затуханий радиосигнала, вызванных рельефом местности (рис. 4). Специфика радиосвязи при распространении земной волной в УКВ диапазоне состоит в том, что качество и сама возможность ведения связи сильно зависят от рельефа местности на трассе распространения радиоволн [6–8]. В связи с этим, необходимо учитывать эту особенность при распределении частот. Формирование исходных данных осуществляется в два шага:

- работа с электронной картой, снятие профилей местности с учетом высот подвеса антенн;
- определение необходимых параметров, представленных в табл. 1.

В конечном итоге сеть радиосвязи, представленную на рис. 1, можно представить в виде модели, изображенной на рис. 5.

Выходными данными представленной модели будет являться массив радиосетей, представленный набором как шаблонных, так и уникальных данных, позволяющих получить полное представление об объекте исследования с точки зрения вопроса распределения и назначения частот. Пример такого информационного массива представлен в табл. 2–4.

	P/ст _{1,1}	P/ст _{1,2}	...	P/ст _{27,1}	P/ст _{27,2}	...	P/ст _{N,n}
P/ст _{1,1}	$r_{1,1/1,1}$	$r_{1,1/1,2}$	...	$r_{1,1/27,1}$	$r_{1,1/27,2}$	...	$r_{1,1/N,n}$
P/ст _{1,2}	$r_{1,2/1,1}$	$r_{1,2/1,2}$	...	$r_{1,2/27,1}$	$r_{1,2/27,2}$	...	$r_{1,2/N,n}$
⋮				⋮			
P/ст _{27,1}	$r_{27,1/1,1}$	$r_{27,1/1,2}$	...	$r_{27,1/27,1}$	$r_{27,1/27,2}$	...	$r_{27,1/N,n}$
P/ст _{27,2}	$r_{27,2/1,1}$	$r_{27,2/1,2}$	...	$r_{27,2/27,1}$	$r_{27,2/27,2}$	...	$r_{27,2/N,n}$
⋮				⋮			
P/ст _{N,n}	$r_{N,n/1,1}$	$r_{N,n/1,2}$	...	$r_{N,n/27,1}$	$r_{N,n/27,2}$	...	$r_{N,n/N,n}$

Рис. 3. Матрица взаимных удалений

	P/ст _{1,2}	...	P/ст _{27,1}	P/ст _{27,2}	...	P/ст _{N,n}
	–	...	$\Delta f_{\text{доп } 1,1/27,1}$	$\Delta f_{\text{доп } 1,1/27,2}$	...	$\Delta f_{\text{доп } 1,1/N,n}$
	–	...	$\Delta f_{\text{доп } 1,2/27,1}$	$\Delta f_{\text{доп } 1,2/27,2}$	...	$\Delta f_{\text{доп } 1,2/N,n}$
			⋮			
1,1	$\Delta f_{\text{доп } 27,1/1,2}$	...	–	–	...	$\Delta f_{\text{доп } 27,1/N,n}$
1,1	$\Delta f_{\text{доп } 27,2/1,2}$	...	–	–	...	$\Delta f_{\text{доп } 27,2/N,n}$
			⋮			
1,1	$\Delta f_{\text{доп } N,n/1,2}$	...	$\Delta f_{\text{доп } N,n/27,1}$	$\Delta f_{\text{доп } N,n/27,2}$	...	–

Рис. 4. Матрица минимальных частотных расстройк

Массив профилей сетей радиосвязи рассматриваемой модели

Номер профиля	Вид РЭС (табл. 3)	Пары РЭС образующие радионаправления (табл. 4)	Вид сети	Режим работы	Приоритет
...
Радиосеть 27 «Сеть ...»	Р/ст 27.1 – Р-187П1	Р/ст 27.1 – Р/ст 27.2	Сеть прямой связи	ППРЧ	Да/нет (определяется для профилей с ФЧ)
	Р/ст 27.2 – Р-187П1				
	...	Р/ст 27.1 – Р/ст 27.3			
...	Р/ст 27.N – Р-187П1	...	...	...	...

Под шаблонными понимаются данные, остающиеся без изменений при различных вариантах построения радиосетей, к ним, например, можно отнести ТТХ РЭС.

Уникальные — напрямую зависят от положения приемопередающего устройства на карте местности, ввиду чего всегда принимают различные значения (номиналы минимальных частотных расстроек и др.).

Взяв за основу выходные данные модели и значение частотного номинала, рассматриваемого для назначения конкретной радиосети, производится расчет затуханий и учет замираний радиосигнала согласно блок-схеме на рис. 6. Блок $H \geq H_0$ означает, что реальный просвет над точкой отражения радиосигнала от рельефа местности (H , м) больше или равен величине критического просвета над точкой отражения (H_0 , м). Данное неравенство означает, что профиль местности представлен открытой трассой. Формула расчета затуханий радиосигнала W_{P_i} на открытой трассе имеет вид:

$$W_{P_i} = 10 \lg \left[1 + \Phi_3^2 - 2\Phi_3 \cos \left(\frac{\pi}{3} h_0^2 \right) \right],$$

где Φ_3 — модуль эффективного коэффициента отражения;

h_0 , м — относительный просвет над точкой отражения [10].

$$h_0 = H/H_0,$$

где H , м — реальный просвет над точкой отражения (определяется из чертежа профиля местности);

H_0 , м — величина критического просвета над точкой отражения.

$$H_0 = \sqrt{\frac{R\lambda k(1-k)}{3}}, \quad (1)$$

где R , км — расстояние между РЭС абонентов;
 λ , м — длина волны рассматриваемого номинала частоты;
 k — относительная координата точки отражения.

Далее проверяется выполнение условия:

$$\Delta h_{\max} \geq \Delta h, \quad (2)$$

где Δh_{\max} , м — максимально допустимая высота неровностей, при которой отражение можно считать зеркальным:

$$\Delta h_{\max} \cong 0,75 \frac{H_0}{h_0}. \quad (3)$$

Если условие (2) выполняется, то происходит зеркальное отражение радиоволны от препятствия и в таком случае $\Phi_3 = 1$.

Если условие (2) не выполняется, то в зависимости от подстилающей поверхности и пересеченности местности находят величину Φ_{30} (табл. 5) и полагают, что $\Phi_3 = \Phi_{30}$ — при аппроксимации области отражения плоскостью (участок местности представляет собой протяженный плоский участок).

В случае, когда область отражения радиосигнала аппроксимируется сферой (участок местности является выпуклым) по формуле (3) определяют величину Δh_{\max} и проверяют выполнение условия (2).

Если условие (2) выполняется, то поверхность отражающего участка считается гладкой, то есть $\Phi_{30} = 1$ и $\Phi_3 = D$.

Таблица 3

Параметры, получаемые исходя из вида РЭС

Вид РЭС	Вид антенны	Место размещения	Δf	$f_{\text{ср}}$	$f_{\text{ин}}$	P	$\xi_{\text{с}}$	$\xi_{\text{н}}$	$\eta_{\text{ф}}$	μ	r_0	Матрица взаимных расстояний	Матрица минимальных частотных расстроек
P-187П1	АШ-27/520-Н	В руках											
	АШ-100/520-ПН	Крыша здания (5 м)											
	АШ-136/520-П												
											
	АВК												

Таблица 4

Параметры, получаемые из профиля трассы

Пары РЭС образующие радионаправление	Параметры профиля местности																
	открытая трасса							полуоткрытая трасса							закрытая трасса		
	вид аппроксимации	R	R_0	H	h	R	R_n	H	u	R	R_n	H	R	R_n	H	I_n	u
P/ст 27.1 – P/ст 27.2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
...

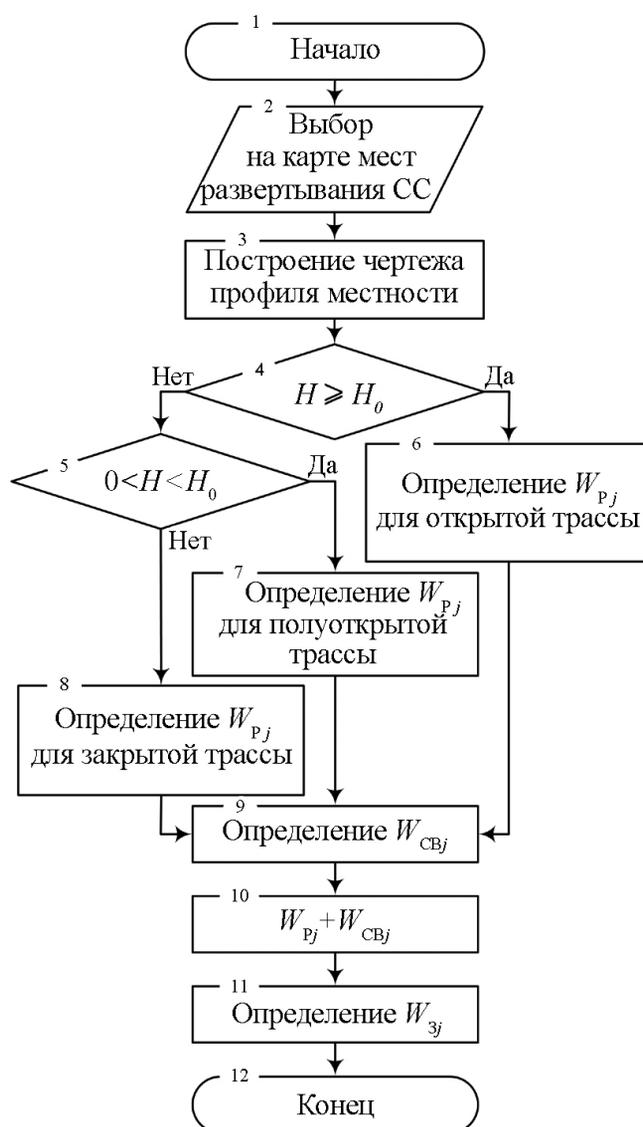


Рис. 6. Блок-схема расчета затуханий и учета замираний радиоволн

Таблица 5

Значения эффективного коэффициента отражения для различных типов подстилающей поверхности

Вид подстилающей поверхности	Степень шероховатости	Длина волны, м	
		1-0,5	0,2
Малопересеченная равнина, пойменные луга, солончаки	$\Delta h_{\max} < \Delta h < H_0$	0,95	0,9
Малопересеченная равнина, покрытая лесом	$\Delta h_{\max} < \Delta h < H_0$	0,9	0,7
Среднепересеченная открытая местность	$\Delta h > H_0$	0,7	0,5
Среднепересеченная местность, покрытая лесом	$\Delta h > H_0$	0,6	0,3

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4k^2(1-k)^2 R^2}{aH}}},$$

где D — величина коэффициента расходимости, учитывающего уменьшение модуля коэффициента отражения за счет расхождения пучка при отражении от сферической поверхности Земли;

a — радиус кривизны сферы, аппроксимирующей участок отражения:

$$a = \frac{l_0^2}{8\Delta y},$$

где Δy — высота хорды сегмента аппроксимирующей сферы.

$$l_0 = R \frac{\sqrt{1+h_0^2}}{1 + \frac{h_0^2}{4k(1-k)}}.$$

Если выполняется условие $\Delta h_{\max} < \Delta h < H_0$, то $\Phi_3 = \Phi_{30} \cdot D$, где Φ_{30} выбирается из табл. 5.

При условии аппроксимации области отражения радиосигнала окружностью земной поверхности, в ситуации когда величина неровностей $\Delta h = 0$, происходит зеркальное отражение от земной поверхности, следовательно, $\Phi_3 = D$. Если в пределы участка отражения попадают неровности, то их рассматривают как отклонение от сферической поверхности с радиусом a_3 (эквивалентный радиус Земли). Далее проверяется выполнение условия (1) и в зависимости от его выполнения, пересеченности местности и типа подстилающей поверхности определяется Φ_{30} (табл. 5). Затем аналогично случаю аппроксимации области отражения сферой определяется Φ_3 .

При наличии двух участков отражения определяются затухания для каждого участка W_{p1} и W_{p2} . При условии, когда знаки затуханий одинаковы и их сумма $(\Phi_{31}^2 + \Phi_{32}^2) \leq 1$, то величина затуханий составит $W_{pi} = W_{p2} + W_{p1}$. Если же $(\Phi_{31}^2 + \Phi_{32}^2) > 1$, то $\Phi_3 = 1$, и учитывается большее по величине затухание (W_{p1} или W_{p2}).

Если исходя из профиля местности имеет место неравенство вида $0 < H < H_0$, то в данном случае расчет затуханий радиоволн следует производить для полукрытых трасс:

$$W_{pi} = \left[6 + \frac{16,4}{\sqrt{1/\rho}(1+0,8\sqrt{1/\rho})} \right] (1-h_0), \quad (4)$$

где ρ — относительный радиус кривизны препятствия, определяется как:

$$\rho = \frac{S_0}{R_{pg1}} + \frac{S_0}{R_{pg2}},$$

где S_0 — масштаб относительных расстояний;

R_{pg1} и R_{pg2} — реальные расстояния до точек радиогоризонтов.

$$S_0 = \sqrt[3]{\frac{a^2 \lambda}{\pi}};$$

$$R_{pg1} \cong R_1 + \frac{aH}{R_1}; \quad R_{pg2} \cong R_2 + \frac{aH}{R_2}.$$

В ситуации когда на профиле местности несколько препятствий и расстояние между их вершинами $< 0,1R$, по формуле (4) вычисляются затухания на каждом препятствии и общее затухание будет равно $W_p = W_{p1} + W_{p2}$. Если же расстояние между вершинами препятствий $> 0,1R$ проверяется возможность их объединения одним эквивалентным препятствием. Для этого вычисляется значение порогового коэффициента $k_{пор}$:

$$k_{пор} = \frac{0,9 + |0,5 - \max(k_n, k_n)|^{1,8}}{3,2},$$

где $k_n = R_n / R$ — относительная характеристика левого препятствия;

$k_n = R_n / R$ — относительная характеристика правого препятствия. Если $k_n + k_n \geq k_{пор}$, то два препятствия объединяются.

Для закрытых трасс характерно неравенство вида $H \leq H_0$. В данном случае, когда значение относительного просвета над точкой отражения $h_0 \geq -3$ затухание рассчитывают по формуле (4), в противоположном случае, при $h_0 < -3$, расчет значения затухания радиоволн производится с использованием выражения:

$$W = W(u) + W(p) + W(t),$$

где $W(u)$ — затухание на полуплоскости, вычисляемое по формуле оптической дифракции Фриделя;

$W(\rho)$ — затухание, обусловленное закругленностью вершины препятствия;

$W(t)$ — затухание, вызванное протяженностью закругленной вершины.

Указанные затухания вычисляются по следующим формулам:

$$W(u) = 6,4 + 20 \lg \left[\sqrt{(0,816|h_0|)^2 + 1} + 0,816|h_0| \right];$$

$$W(\rho) = 7,2\sqrt{\rho} - 2\rho + 3,6\sqrt{\rho^3} - 0,8\rho^2;$$

$$W(t) = \begin{cases} 12t & \text{при } 0 \leq t \leq 4; \\ 17,1t - 6,2 - 20 \lg t & \text{при } t > 4, \end{cases}$$

где $t = l_{\text{верш}} / S_0$ — относительная протяженность вершины препятствия;

$l_{\text{верш}} \approx a|H| / Rk(1 - k)$ — протяженность вершины препятствия.

В случае, когда на трассе распространения радиоволн два препятствия и для одного из препятствий справедливо неравенство вида $Hn \geq H_0(n)$, то величина затухания для этого препятствия $W_{p1} = 0$. Для ситуаций, когда $0 < Hn < H_0(n)$, затухание рассчитывается по формуле (4).

Если прямая, соединяющая двух абонентов на профиле местности, пересекает сразу оба препятствия, то $l_{\text{верш}}$ рассчитывается на участке $(R - R_2^{(2)})$ — для первого препятствия и $(R - R_1^{(1)})$ — для второго, вместо протяженности трассы R . Здесь $R_2^{(2)}$ расстояние от правого края профиля местности до вершины второго препятствия, а $R_1^{(1)}$ — от левого края до вершины первого препятствия.

Далее, согласно блок-схеме на рис. 6, подставляя в формулу номинал рассматриваемой частоты, производится расчет затухания радиосигнала в свободном пространстве:

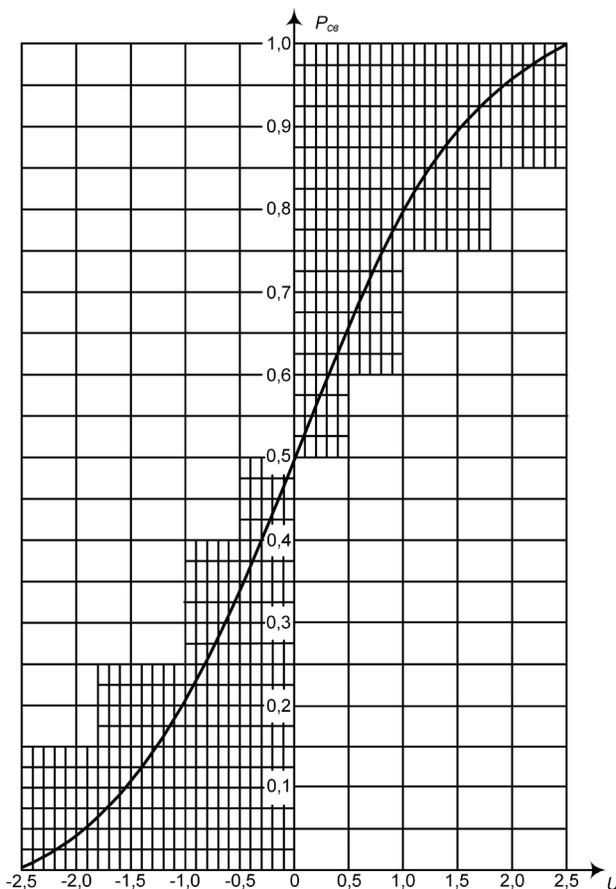


Рис. 7. Интегральная функция нормального распределения нормированной случайной величины

$$W_{\text{св}} = 10 \lg \left(\frac{4\pi R_i}{\lambda} \right)^2 = 122 + 20 \lg \frac{R_i}{\lambda}.$$

На следующем этапе происходит определение значения замирания радиосигнала [5]:

$$W_{3i} = z_2 + U\sigma_z,$$

где z_2 — дополнительное превышение уровня сигнала над уровнем помех, необходимое для обеспечения требуемого качества в условиях быстрых замираний;

U — некоторый расчетный параметр;

σ_z — среднеквадратическое отклонение превышения уровня сигнала над уровнем помех.

$$z_2 = z_{\text{тп}} - z_1,$$

где $z_{\text{тп}}$ — требуемое превышение уровня сигнала над уровнем помех на входе приемника;

z_1 — необходимое превышение медианных значений сигнала над помехой на входе приемника в канале связи без замираний (обычно определяется заводом-изготовителем РЭС).

В канале связи с быстрыми замираниями радиосигнала для достижения 95–98 % надежности связи необходимо обеспечить примерно следующие дополнительные превышения сигнала над помехой z_2 [3]:

– в декаметровом диапазоне волн при работе ионосферными волнами — 8–10 дБ;

– в диапазоне метровых волн при дальностях трасс, превышающих 25–30 км — 2–12 дБ.

В зависимости от требуемого значения вероятности связи $P_{\text{св тп}}$, по графику на рис. 7 можно найти соответствующее ей значение U .

Среднеквадратическое отклонение σ_z определяется разбросами параметров радиолиний (мощностей передатчиков и антенно-фидерных устройств (АФУ) и множителей ослабления на трассах. Для практических расчетов можно рекомендовать следующие ориентировочные значения σ_z [5]:

– декаметровый диапазон при связи ионосферными волнами — 10–16 дБ;

– метровый диапазон 5–8 дБ при дальностях, меньших или равных 30 км, 7–12 дБ при дальностях, больших 30 км.

Следующим этапом, согласно блок-схеме на рис. 6, является сложение значений, полученных в результате расчета затухания радиоволн за счет влияния рельефа местности, затухания в свободном пространстве.

Ввиду того, что распределение уровней сигнала и помех во времени подчиняются случайному закону, вероятность связи определяется выражением [4]:

$$P_{\text{св}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

В случае, когда значение вероятности связи неизвестно, расчетный параметр U находится по формуле:

$$U = (\bar{z} - z_{\text{тп}}) / \sigma_z,$$

где \bar{z} — отношение медианных значений мощности сигнала к мощности шумов и помех на входе приемника:

$$\bar{z} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}} + P_{\text{п}}} \right).$$

Мощность полезного сигнала на входе приемника определяется при помощи уравнения радиопередачи. При расчетах значение $P_{\text{с}}$ удобно выражать в децибелах относительно ватта.

$$P_{\text{с}} = P_{1\text{с}} + \eta_{\text{ф1с}} + G_{1\text{с}} + W_0 + W_{\text{т}} + |\zeta_{\text{п}}| + G_{2\text{с}} + \eta_{\text{ф2с}} + \zeta_{\text{с}}, \quad (5)$$

где подстрочная единица означает принадлежность к передающему тракту, а двойка — к приемному.

$$P_{\text{ш}} = k_{\text{б}} B (T_{\text{А}} + T_{\text{ПРМ}}),$$

где $k_{\text{б}} = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/(Гц·к) — постоянная Больцмана;

B — полоса частот;

$T_{\text{А}}$ — шумовая температура антенны;

$T_{\text{ПРМ}}$ — шумовая температура приемника.

Нахождение значений шумовых температур антенны и приемника подробно описаны в работе [3].

В случае, когда на вход приемника воздействуют преднамеренные или непреднамеренные помехи, их значения вычисляются аналогично

формуле (5), за исключением того, что все переменные, имеющие отношение к передающему тракту, берутся из ТТХ «мешающих» РЭС.

Таким образом разработанная модель сети радиосвязи, представленная в виде набора радиосетей с массивом данных, дающим полное представление о их составе и особенностях построения, позволяет получить все необходимые значения для расчета вероятности связи, как показателя электромагнитной совместимости, и в дальнейшем стать основой для реализации методики оптимального распределения частотного ресурса.

Список источников

1. ГОСТ 24375–80. Радиосвязь. Термины и определения. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1987. 61 с.

2. Силин Д.М. Задача назначения частот с условиями взаимных влияний общего вида // Успехи современной радиоэлектроники. 2018. № 1. С. 28–35.

3. Липатников В.А., Кулешов И.А. Управление радиочастотным спектром радиоэлектронных средств. СПб.: ВАС, 2011. 384 с.

4. Вахлаков В.Р., Рожков А.Г., Сосунов Б.В. и др. Основы обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств; под ред. Б.В. Сосунова. СПб.: ВАС, 1991. 207с.

5. Мешалкин В.А., Сосунов Б.В. Основы энергетического расчета радиоканалов. СПб.: ВАС, 1991. 110 с.

6. Шанин А.М. Методика управления ресурсами радиолинии, образованной от передающего радицентра // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 11–12 (185–186). С. 46–53.

7. Мешалкин В.А., Викторов В.А., Пилюгин А.А. Проблема электромагнитной совместимости — следствие научно-технического прогресса // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2019. № 12. С. 71–77.

8. Вихарев Е.В., Ерышев В.Г., Шабуня В.В. Динамическое распределение частотного ресурса между сетями радиосвязи // Труды II Всероссийской научно-практической конференции «Национальная экономика и вооруженные

силы: проблемы и перспективы». СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000.

9. Бабков В.Ю., Вознюк М.А. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. СПб.: СПб ГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2000. 224 с.

References

1. GOST 24375–80. Radio communication. Terms and definitions. Moscow: USSR State Committee on Standards, 1987. 61 p.

2. Silin D.M. The problem of assigning frequencies with general mutual influence conditions // Uspekhi sovremennoy radioelektroniki. 2018. No 1. Pp. 28–35.

3. Lipatnikov V.A., Kuleshov I.A. Radio frequency spectrum management of electronic equipment. St. Petersburg: VAS, 2011. 384 p.

4. Vakhlov V.R., Rozhkov A.G., Sosunov B.V. et al. Fundamentals of ensuring electromagnetic compatibility of electronic equipment edited by Sosunov B.V. St. Petersburg: VAS, 1991. 207 p.

5. Meshalkin V.A., Sosunov B.V. Fundamentals of energy calculation of radio channels. SPb.: VAS, 1991. 110 p.

6. Shanin A.M. Methodology for managing the resources of a radio link formed from a transmitting radio center // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 11–12 (185–186). Pp. 46–53.

7. Meshalkin V.A., Viktorov V.A., Pilyugin A.A. The problem of electromagnetic compatibility is a consequence of scientific and technological progress. Modern science: current problems of theory and practice. Series: Natural and technical sciences. 2019. No 12. Pp. 71–77.

8. Vikharev E.V., Eryshev V.G., Shabunya V.V. Dynamic distribution of frequency resource between radio communication networks // Proceedings of the II All-Russian scientific-practical conference: «National economy and armed forces: problems and prospects». SPb.: State Technical University, 2000.

9. Babkov V.Yu., Voznyuk M.A. Mobile communication networks. Frequency-territorial planning. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Telecommunications named after prof. M.A. Bonch-Bruevich, 2000. 224 p.

УДК 355/359

doi: 10.53816/23061456_2025_1–2_39

МЕХАНИЗМЫ КОРРЕКЦИИ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИСПОЛНИТЕЛЯ ТОПОГРАФО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ И КАРТОГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ

CORRECTION MECHANISMS AND METHODS FOR ASSESSING THE DYNAMICS OF CHANGES IN THE PERFORMANCE OF TOPOGRAPHIC, GEODETIC AND CARTOGRAPHIC WORK

*Д-р техн. наук С.А. Багрецов, д-р экон. наук Д.М. Петров,
канд. техн. наук А.В. Гаврилов, канд. воен. наук С.С. Петлик*

D.Sc. S.A. Bagretsov, D.Sc. D.M. Petrov, Ph.D. A.V. Gavrilov, Ph.D. S.S. Petlik

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

Рассматриваются факторы, влияющие на динамику изменения работоспособности исполнителя топографо-геодезических и картографических работ, модель динамики изменения работоспособности исполнителя топографо-геодезических и картографических работ, в которой анализируются факторы, оказывающие существенное влияние на работоспособность исполнителя топографо-геодезических и картографических работ. Определены значения утомления при воздействии на работоспособность исполнителя. Приведена модель динамики изменения работоспособности операторов человеко-машинных комплексов с учетом периодов реабилитации. Проведено рациональное физиологическое обоснование режимов деятельности операторов, как чередование периодов работы, периодов переключения на другую деятельность и на отдых. Представлены зависимости, позволяющие анализировать влияние различных параметров на работоспособность исполнителей топографо-геодезических и картографических работ, начиная от интенсивности и сложности их деятельности и заканчивая условиями труда.

Ключевые слова: динамика изменения работоспособности, исполнитель топографо-геодезических и картографических работ.

The factors influencing the dynamics of changes in the working capacity of the contractor of topographic, geodetic and cartographic works are considered, a model of the dynamics of changes in the performance of topographic, geodetic and cartographic work, which analyzes the factors that have a significant impact on the performance of topographic, geodetic and cartographic work. Determination of fatigue values when affecting the performance of the performer. Model is given of the dynamics of changes in the operability of human-machine complex operators, taking into account rehabilitation periods. Rational physiological justification of the operator's mode of operation, such as alternating work periods, periods of switching to other activities and rest. Dependencies that allow us to analyze the impact of various parameters on the performance of performers of topographic, geodetic and cartographic work, ranging from the intensity and complexity of their activities, and ending with working conditions.

Keywords: the dynamics of changes in working capacity, the performer of topographic, geodetic and cartographic work.

Введение

Утомление — закономерная реакция исполнителя топографо-геодезических и картографических работ. Утомление оказывает значительное влияние на динамику основных нервных процессов, а также на сенсомоторные функции исполнителя. Следовательно, под утомлением будем понимать состояние исполнителя топографо-геодезических и картографических работ, возникающее при интенсивной или длительной нагрузке и проявляющееся во временном нарушении состояния ряда функций организма, а также в снижении эффективности и качества выполнения поставленных задач. Основное внимание будет сконцентрировано на динамике работоспособности, характеристиках ее основных фаз, а также на выявлении тех факторов, от которых зависит их продолжительность.

Модель динамики изменения работоспособности исполнителя топографо-геодезических и картографических работ

Работоспособность исполнителя топографо-геодезических и картографических работ имеет характерные фазы. Различают следующие фазы: повышение работоспособности, когда происходит повышение концентрации внимания исполнителя и устанавливается динамический стереотип; период относительно устойчивой работоспособности, сонатроенности ритмов и темпов деятельности отдельных участков нервной системы; снижение работоспособности вследствие усталости и нервного напряжения.

К главным факторам, вызывающим усталость, целесообразно отнести три группы. Первая — это факторы, определяющие основу профессиональной деятельности исполнителя топографо-геодезических и картографических работ (повышенная нагрузка, оперативность решаемых задач, жесткий лимит времени). Вторая группа — это факторы, влияющие на скорость появления усталости (воздействие неблагоприятных факторов внешней среды, нервно-психическое напряжение). Третья группа — это факторы, предопределяющие состояние исполнителя. К ним следует отнести факторы режима труда и отдыха, поддержания и

повышения необходимого уровня профессионально-должностной и физической подготовки. Названные факторы проявляются в снижении функциональной пригодности исполнителя, в результате чего снижается надежность и достоверность выполняемых топографо-геодезических и картографических работ.

Таким образом, утомление следует рассматривать как важнейший фактор изменения физического состояния (ФС) исполнителя, определяющий базовое состояние его активационных компонент в рабочей доминанте, изменение которых вызвано длительными нагрузками. Следовательно, утомление определяет макродинамику изменения ФС исполнителя, на фоне которой развиваются более динамичные процессы изменения ФС, связанные со сложностью решаемых задач, интенсивностью их возникновения, с внешними условиями деятельности и другими факторами, определяющими динамику изменения психического и эмоционального напряжения исполнителя в оперативной деятельности.

В динамике работоспособности исполнителя топографо-геодезических и картографических работ, во-первых, присутствует фактор привыкания (настройки работоспособности), а во-вторых — фактор утомления, который снижает работоспособность и влечет за собой изменение базовых физиологических функций (нарушение рабочей доминанты в связи со снижением лабильности). Эти факторы оказывают противоположное воздействие.

Современные исследования в психометрике утомления (особенно умственного утомления) показывают, что наиболее перспективными индикаторами развития этого процесса в операторской деятельности являются не оценки динамики изменения элементарных когнитивных функций, а оценки дееспособности операциональных структур более высоких порядков.

Пусть в некоторый начальный момент времени t уровень работоспособности равен

$$\bar{P}_0 = P_0 / P_{\max},$$

где P_0 — абсолютное значение параметра эффективности деятельности исполнителя (вероятности безошибочного выполнения задач) в момент времени t ;

P_{\max} — максимальное значение параметра деятельности, достигаемое исполнителем в ходе обучения, контрольных проверок и т.п.

Из определения следует, что $0 < P_0 \leq 1$. Тогда уравнение, описывающее процесс $\Delta P(t_1)$ развития работоспособности исполнителя, будет иметь вид:

$$\frac{\partial \Delta P(t_1)}{\partial t} = (1 - \bar{P}_0)R_1 - \frac{\Delta P(t_1)}{T_1},$$

где t_1 — время текущей деятельности оператора;

$$\bar{P}_0 = P_0 / P_{\max};$$

R_1 — скорость поступления оперативных задач на обработку оператору;

T_1 — постоянная времени нарастания рабочей доминанты оператора.

В этом уравнении скорость становления и упрочения рабочей доминанты зависит от интенсивности труда оператора. Это подтверждается результатами исследований [1–3]. Решение уравнения дает следующий результат для определения процесса становления рабочей доминанты оператора при $R_1 = \text{const}$:

$$\Delta P(t) = [(1 - \bar{P}_0)R_1 T_1 e^{\tau_{11}} + A_1] e^{-\tau_{11}},$$

где $-\tau_{11} = t_1 / T_1$;

t_1 — время работы исполнителя на первом этапе деятельности;

$$A_1 = \text{const}.$$

Этап деятельности исполнителя состоит из периода непосредственной загрузки и периода отдыха.

Тогда с учетом начальных условий возможно получить:

$$\begin{aligned} \Delta P(t_1) &= (1 - \bar{P}_0)R_1 T_1 - (1 - \bar{P}_0)R_1 T_1 e^{-\tau_{11}} = \\ &= (1 - \bar{P}_0)R_1 T_1 (1 - e^{-\tau_{11}}). \end{aligned}$$

Абсолютное значение роста работоспособности исполнителя будет $P'(t) = P_0 + \Delta P(t)$. Нормируя, получим:

$$P'(t) = \bar{P}_0 + (1 - \bar{P}_0) \frac{R_1 T_1}{P_{\max}} (1 - e^{\tau_{11}}).$$

Вместе с процессом становления работоспособности происходит процесс ее нарушения, описываемый уравнением

$$\frac{\partial \Delta P(t_1)}{\partial t_1} = R_s, \quad (1)$$

где R_s — скорость нарушения работоспособности, определяющая процесс утомления исполнителя топографо-геодезических и картографических работ.

Утомление оказывает воздействие на работоспособность исполнителя только до определенных значений. Утомлению в организме противодействуют контрмеры, интенсивность которых прямо пропорциональна утомлению. Помимо этого, при снижении работоспособности вследствие утомления снижается нагрузка и объем выполняемых задач. Наличие жестких отрицательных обратных связей, компенсирующих процесс утомления, с одной стороны, свидетельствует о наличии гомеостатических свойств в системе регуляции производительности у исполнителя, которые во многом формируются в процессе подготовки исполнителя, а с другой — служит обоснованием справедливости выражения (1).

Учитывая изложенное, параметр R_s возможно трактовать следующим образом:

$$R_s = C_y \mu (P(t_1) - P_{\min}),$$

где C_y — интегральный психофизиологический уровень поддержания работоспособности в процессе производства;

μ — коэффициент пропорциональности;

$P(t_1)$ — текущее значение работоспособности;

P_{\min} — наихудший уровень развития работоспособности.

Принимая во внимание, что C_y в общем случае может рассматриваться как функция текущего состояния ведущих функциональных систем организма оператора, обеспечивающих деятельность данного типа, с их наилучшим альтернативным состоянием, определим

$$C_y = D_k^+ / (D_k^+ + D_k^-),$$

где D_k^+, D_k^- — соответственно расстояния между образом текущего состояния ведущих функциональных систем организма и их наилучшими и наихудшими альтернативными вариантами.

В случае их нечеткого определения параметр C_y также будет нечетким [4, 5].

Для оценки нечетких значений C_{yi} для каждого класса функциональных состояний $i = \overline{1,10}$ (то есть для определения функции принадлежности) воспользуемся методом двойной обратной трансформации (рис. 1).

Согласно этому методу на первом этапе на основе экспериментальных данных определяется нечеткое множество $\nu_1 = \langle C_y, \mu_i(C_y) \rangle$. На его основе определяется шкала размытой классификации ΦC , то есть определяются центры $(\nu_1(C_y): i = \overline{1,10})$ классов ФС, диагностируемых по параметру C_y . На втором этапе определяется множество функций принадлежности $(\mu_{C_y}(i); C_y \in [0,1])$ значений параметра C_y , соответствующих каждому классу ФС. Результаты расчетов нечетких значений ВПР операторов для множества их функциональных состояний приведены на рис. 2.

С учетом изложенного уравнение разрушения рабочей доминанты оператора в процессе деятельности может быть записано следующим образом:

$$\frac{\partial \Delta P(t_1)}{\partial t} = \mu_{C_y}(P(t_1) - P_{\min}).$$

Решением этого уравнения будет:

$$P(t_1) = P_{\min} + A_2 e^{-\mu_{C_y} t_1},$$



Рис. 1. Структурная схема определения значений параметров работоспособности оператора для различных его функциональных состояний $i = \overline{1,10}$

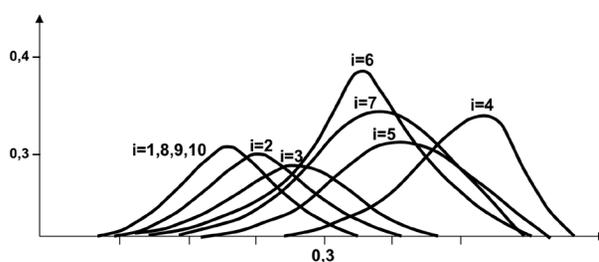


Рис. 2. Результаты расчетов нечетких значений параметров профессиональной работоспособности оператора

где $\tau_{12} = t_1 C_y$; $A_2 = P_0 - P_{\min}$.

Процессы становления и разрушения доминанты протекают одновременно. Тогда, предполагая их взаимно независимыми и противоположно направленными, получим следующее выражение для определения характера изменения рабочей доминанты оператора топографо-геодезических и картографических работ [6, 7] в процессе деятельности:

$$P(t_1) = \beta_1 \bar{P}_0 + \beta_1 (1 - \bar{P}_0) \frac{R_1 T_1}{P_{\max}} (1 - e^{-\tau_{11}}) - \beta_2 \bar{P}_0 + \beta_2 P_{\min} + \beta_2 (1 - \bar{P}_0) e^{-\mu_{C_y} t_1}. \quad (2)$$

Константы β_1 и β_2 могут быть найдены из начальных и конечных условий:

- а) $P(t_1) = P_0$, при $t_1 = 0$;
- б) $P(t_1) = P_{\min}$, при $t_1 \rightarrow \infty$.

Подставив в полученное выше уравнение (2) значения, соответствующие пунктам а и б, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \beta_1 \bar{P}_0 + \beta_2 \bar{P}_0 + \beta_2 \bar{P}_{\min} + \beta_2 \bar{P}_0 - \beta_2 \bar{P}_{\min} = \bar{P}_0; \\ \beta_1 \bar{P}_0 + \beta_1 (1 - \bar{P}_0) \frac{R_1 T_1}{P_{\max}} - \beta_2 P_{\min} + \beta_2 \bar{P}_{\min} = \bar{P}_{\min}. \end{cases}$$

Отсюда имеем: $\beta_1 = 1$;

$$\beta_2 = \frac{\bar{P}_0 - (1 - \bar{P}_0) \frac{R_1 T_1}{P_{\max}} - \bar{P}_{\min}}{P_0 - P_{\min}}.$$

Подставив найденные значения коэффициентов в (2), получим:

$$P(t_1) = \bar{P}_0 + (1 - \bar{P}_0) \frac{R_1 T_1}{P_{\max}} (1 - e^{-\tau_{11}}) - \left(\bar{P}_0 + \frac{R_1 T_1}{P_{\max}} (1 - \bar{P}_0) - P_{\min} \right) (1 - e^{-\mu \tau_{12}}). \quad (3)$$

Параметры, $\bar{P}_0 = \frac{P_0}{P_{\max}}$, $\frac{R_1 T_1}{P_{\max}}$ определяются прежде всего свойствами индивидуума и характером деятельности.

Как видно из выражения (3), интенсивность труда исполнителя, определяемая параметром R_1 , оказывает влияние как на фактор вхождения в работу исполнителя, так и на фактор его утомления. Чем выше R_1 , тем интенсивнее происходят процессы нарастания и разрушения его рабочей доминанты. В общем виде параметры T_1 , C_y , μ зависят от нагрузки исполнителя, то есть от R_1 .

Константы T_1 , C_y , R_1 определяются опытным путем для каждой фазы утомления оператора.

Если $P(t)$ выражает некоторую физиологическую функцию оператора (например, время его реакции), то коэффициент $\frac{R_1 T_1}{P_{\max}}$ будет выражать степень актуальности данной функции для выполнения исследуемого вида операторской деятельности.

Таким образом, формула (3) осуществляет анализ утомления исполнителя в процессе деятельности в зависимости от физических характеристик и характера решаемых задач, а также от профессиональных качеств и личной подготовлен-

ности, умений и фаз утомления. Она отличается, хотя и совпадает по внешнему виду, от описанных математических моделей утомления, полученных эмпирическим путем, обоснованностью включенных в состав модели физических параметров и их логикой, их взаимных связей, отражающей характер физиологических процессов утомления.

В частном случае при $P_{\min} = P_0 = 0$ формула (2) будет иметь вид:

$$P(t_1) = \frac{R_1 T_1}{P_{\max}} (e^{-\mu \tau_{12}} - e^{-\tau_{11}}). \quad (4)$$

Выражение (3) совпадает с точностью до коэффициентов с формулой динамики изменения ключевой физиологической функции оператора, полученной эмпирическим путем.

Максимум выражения (4) выполняется при

$$t_1^* = \frac{1 - \mu T_1 C_y}{T_1} \ln \frac{1}{\mu T_1 C_y}.$$

Как видно, условием существования максимума рабочей доминанты оператора в конкретном виде деятельности является выполнение неравенства $\mu T_1 C_y < 1$.

Практические исследования динамики изменения работоспособности оператора в различных видах деятельности показывают [8], что для значительного числа видов операторской деятельности это неравенство выполняется, и максимум эффективности деятельности действительно имеет место. Сравнительный анализ реальных и моделируемых процессов изменения эффективности по t -критерию на выборке из 15 операторов подтвердил допустимость применения рассмотренной выше модели при уровне значимости $\alpha_3 = 0,05$.

Модель динамики изменения работоспособности операторов человеко-машинных комплексов с учетом периодов реабилитации

Рассмотренный выше процесс деятельности оператора считался непрерывным. Реальная деятельность оператора чередуется с периодами отдыха (смены деятельности), в процессе которых происходит восстановление затраченных сил и осуществляется фиксация рабочей доминанты

оператора на некотором (дежурном) уровне, позволяющем ему начать в любой момент выполнять функциональные обязанности в системе. Причем как процесс утомления, то есть разрушения рабочей доминанты оператора в процессе деятельности, так и процесс ее восстановления во время отдыха протекают с различными значениями постоянной времени и предельного параметра восстановления $P_{B\max}$ (реабилитации) рабочей доминанты. Так как процесс восстановления функциональных возможностей оператора протекает в условиях активно действующего охранительного торможения, то, как и в случае анализа утомления, для изучения процесса восстановления $P(t_2)$ справедлива линейная модель:

$$\frac{\partial \Delta P(t_2)}{\partial t_2} = -R_z, \quad (5)$$

где t_2 — время восстановления;

R_z — скорость восстановления рабочей доминанты P оператора в процессе отдыха.

Как и в анализе процессов утомления, примем

$$R_z = \frac{\mu_B}{T_B} (P_0 - P(t_2)),$$

где μ_B — коэффициент восстановления затраченных сил оператором в период отдыха;

T_B — соответствующая этому процессу постоянная времени восстановления, зависящая от методологического и технического оснащения подсистемы реабилитации операторов.

Решение уравнения (5) имеет вид:

$$P(t_2) = P_0 + A_3 e^{-\mu_B t_2 / T_B},$$

где $\tau_B = t_2 / T_B$; $A_3 = \text{const}$.

Константа A_3 находится из условия $P(t_2) = P(t_1)$ при $t_2 = 0$. Отсюда получим: $A_3 = P(t_1) - P_0$. Тогда

$$P(t_2) = P_0 - (P_0 - P(t_1)) - \mu_B T_B \tau_B. \quad (6)$$

Нормируя, представим выражение (6) в следующем виде:

$$\bar{P}(t_2) = \bar{P}_0 (1 - e_1) + E_1 e_1,$$

где $\bar{P}(t_2) = \frac{P(t_2)}{P_{\max}}$; $\bar{P}_0 = \frac{P_0}{P_{\max}}$;

$$e_1 = e^{-\mu_B \tau_{1B}}; E_1 = P(t_{11}); \tau_{1B} = \frac{t_{21}}{T_{21}};$$

t_{11}, t_{21} — текущие времена работы и отдыха оператора в первом цикле дежурства;

$$t_1 = t_{11} + t_{21};$$

T_{21} — постоянная времени восстановления (реабилитации) оператора в первом цикле дежурства;

$P(t_{11})$ — безразмерное выражение количественного значения параметра деятельности оператора, выражающего уровень развития рабочей доминанты оператора в конце первого периода деятельности t_{11} . Из предыдущего раздела ясно, что

$$\begin{aligned} \bar{P}(t_{11}) &= \bar{P}_0 + (1 - \bar{P}_0) \frac{R_1 T_{11}}{P_{\max}} (1 - e^{-\tau_{11}}) - \\ &- \left(\bar{P}_0 + \frac{R_1 T_{11}}{P_{\max}} (1 - \bar{P}_0) - \bar{P}_{\min} \right) (1 - e^{-\mu_y \tau_{12}}); \quad (7) \\ \tau_{11} &= \frac{t_{11}}{T_{11}}; T_{12} = \frac{t_{11}}{T_{21}}, \end{aligned}$$

где R_1 — скорость поступления оперативных задач на обработку оператору;

T_{11} — постоянная нарастания рабочей доминанты оператора;

μ_y — коэффициент утомления оператора.

С учетом выражения (6) получим:

$$E = \bar{P}(t_{11}) = E_{11} + \bar{P}_0 E_{21}; \quad (8)$$

$$E_{11} = \bar{P}_{\min} (1 - e^{-\mu_y \tau_{12}}) + \frac{R_1 T_{11}}{P_{\max}} (e^{-\mu_y \tau_{12}} - e^{-\tau_{11}}),$$

$$\text{где } E_{21} = 1 - \frac{R_1 T_{11}}{P_{\max}} (e^{-\mu_y \tau_{12}} - e^{-\tau_{11}}) (1 - e^{-\mu_y \tau_{12}}).$$

В общем случае для непрерывного процесса деятельности оператора, складывающегося из непрерывной последовательности следующих друг за другом периодов работы и отдыха, параметры T_{11}, T_{21}, μ_y от цикла к циклу изменяются, что определяется, в первую очередь, нарастающим утомлением оператора [9, 10, 11].

Рассмотрим n -й цикл деятельности оператора. Из (7) и (8) получим:

$$P_{0n} = P(t_{2n}) = P_0 (1 - e_n) + E_n e_n,$$

где $E_n = E_{1n} - P_{0(n-1)}E_{2n}$;

$$P_{0(n-1)} = P(t_{2(n-1)}) = P_0(1 - e_{n-1}) + E_{n-1}e_{n-1} \text{ и т.д.}$$

Если принять $e_n \approx e_{n-1} \approx e_{n-2} \dots \ll e_1$, то после несложных преобразований получим:

$$P_{0n} = \bar{P}_0 + \sum_{j=1}^n e^{j-1} (E_{n-(j-1)}(\bar{P}_0) - P_0) \prod_{i=1}^{j-1} E_{2(n+1-j)}, \quad (9)$$

где $E_{n-(j-1)}(\bar{P}_0) = E_{1(n+1-j)} - \bar{P}_0 E_{2(n+1-j)}$.

Уравнение (9) позволяет вычислить для любого номера цикла деятельности оператора значение показателя его работоспособности. Таким образом, используя данную методику, представляется возможным оценить допустимую длительность периодической деятельности оператора человеко-машинных комплексов (ЧМК) (например, число циклов дежурство — отдых при вахтовом методе обслуживания и эксплуатации ЧМК), определить эффективность организации его отдыха (или активной реабилитации) и в целом обосновать режим его деятельности. В данном случае под рациональным, физиологически обоснованным режимом деятельности операторов ЧМК подразумевается такое чередование периодов работы, периодов переключения на другую деятельность и на отдых, при котором достигается большая эффективность совместного труда операторов и обеспечивается высокий уровень их работоспособности.

Формула (9) записана для общего случая, в отдельных частных условиях применения вид упрощается. Так, постоянные времени утомления в каждом цикле деятельности работа — отдых могут быть приняты отличающимися друг от друга в ξ раз, то есть:

$$T_{2n} = \frac{T_{2(n-1)}}{\tau_{12}}; \quad \mu = \xi \mu_{n-1}.$$

В ряде случаев могут быть приняты равенства

$$E_{n-(j-1)}(P_0) = E(P_0), \text{ при } \forall j$$

и

$$E_{2(n+1-i)} = E_{2n}, \text{ при } \forall i.$$

Справедливость последних равенств определяется тем, что, как правило, распределение вре-

мени в циклах деятельности операторов между работой и отдыхом (сменой деятельности) строго регламентировано и изменяется сравнительно редко. В этом случае формула (9) примет вид:

$$P_{0n} = \bar{P}_0 + e(E(\bar{P}_0) - \bar{P}_0) \sum_{j=1}^n (eE_{2n})^{j-1},$$

или, переходя от ряда, представляющего геометрическую прогрессию, к его сумме, получим:

$$P_{0n} = \bar{P}_0 + e(E(\bar{P}_0) - \bar{P}_0) \frac{1 - (eE_{2n})^n}{1 - eE_{2n}}.$$

В общем случае модель дает отклик как на изменения обстановки и подготовленности исполнителя, так и на их психологические характеристики и результаты деятельности.

Приведенные зависимости позволяют анализировать влияние различных параметров на работоспособность исполнителей топографо-геодезических и картографических работ, начиная от интенсивности и сложности их деятельности и заканчивая условиями труда, эффективностью средств реабилитации и оптимальностью принятых организационных решений.

Заключение

Для оценки достоверности рассмотренных выше моделей динамики изменения ФС операторов в деятельности были использованы данные экспериментов, полученных ранее.

Сравнение прогнозируемых ФС операторов с их реальными значениями осуществлялось с учетом всего спектра нечеткого определения ФС в отдельные фиксированные промежутки времени (через 1, 4 и 7 суток дежурства).

Для статического анализа использовался модифицированный t -критерий. Результаты оценки по выборке из 35 операторов, несущих дежурство, показали, что в целом экспертно-моделирующий комплекс обеспечивает достоверность прогноза состояний операторов в режиме дежурства на уровне значимости $P = 0,05 \dots 0,1$.

Список источников

1. Петров Д.М., Бирюков А.Н., Гаврилов А.В., Петлик С.С. Методика определения объема внутренних ресурсов организации тре-

буемых для обеспечения выпуска топографо-геодезической продукции в условиях риска // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2024. № 11–12. С. 3–8.

2. Багрецов С.А., Колганов С.К., Львов В.М. Диагностика и прогнозирование функциональных состояний операторов в деятельности. Вопросы проектирования и применения: монография. М.: Радио и связь, 2000. 192 с.

3. Багрецов С.А., Везилов В.Н., Львов В.М. и др. Трансформация синтеза организационных структур сложных систем управления: монография. М.: ГУП «ВИМИ», 1998. 224 с.

4. Шевцов Г.С. Линейная алгебра: теория и прикладные аспекты: учеб. пособие; 3-е изд. испр. и доп. М.: Магистр: ИНФРА-М., 2003. 576 с.

5. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

6. Единые нормы времени и выработки (времени) на геодезические и топографические работы. Ч. 1. Полевые работы. М.: ЦНИИГАиК, 2002. 167 с.

7. Единые нормы времени и выработки (времени) на геодезические и топографические работы. Ч. 2. Камеральные работы. М.: ЦНИИГАиК, 2003. 145 с.

8. Петров Д.М., Гаврилов А.В., Гарифуллин Н.Б. Методический подход при планировании специальных работ по заблаговременной подготовке территорий в топогеодезическом отношении в условиях ограниченного количества ресурсов // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 11–12. С. 3–7.

9. Васильев И.В., Коробов А.В., Побединский Г.Г. Стратегические направления развития топографо-геодезического и картографического обеспечения Российской Федерации // Вестник СГУГиТ. 2015. № 2. С. 5–23.

10. Власов А.Н. Риск-менеджмент: система управления потенциальными потерями // Бизнес. 2013. № 5. С. 25–32.

11. Риск-менеджмент инвестиционного проекта: учебник для студентов вузов, обучающихся по экономическим специальностям; под ред. М.В. Грачевой, А.Б. Сакерина. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2009. 544 с.

References

1. Petrov D.M., Biryukov A.N., Gavrilov A.V., Petlik S.S. Methodology for determining the amount of internal resources of an organization required to ensure the production of topographic and geodetic products in conditions of risk // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2024. No 11–12. Pp. 3–8.

2. Bagretsov S.A., Kolganov S.K., Lvov V.M. Diagnostics and forecasting of functional states of operators in their activities. Issues of design and application: A monograph. Moscow: Radio and Communications, 2000. 192 p.

3. Bagretsov S.A., Vezirov V.N., L'vov V.M. et al. Transformation of the synthesis of organizational structures of complex management systems: Monograph. Moscow: SUE «VIMI». 1998. 224 p.

4. Shevtsov G.S. Linear algebra: theory and applied aspects: textbook. manual; 3rd ed. ispr. and add. M.: Master: INFRA-M., 2003. 576 p.

5. Saati T. Decision-making. Method of hierarchy analysis. Moscow: Radio and Communications, 1993. 278 p.

6. Uniform standards of time and production (time) for geodetic and topographic work. Part 1. Field work. Moscow: TsNIIGAiK, 2002. 167 p.

7. Uniform standards of time and production (time) for geodetic and topographic work. Part 2. Desk work. Moscow: TsNIIGAiK, 2003. 145 p.

8. Petrov D.M., Gavrilov A.V., Garifullin N.B. A methodological approach to planning special work on the advance preparation of territories in topogeodetic terms in conditions of limited resources // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2022. № 11–12. Pp. 3–7.

9. Vasiliev I.V., Korobov A.V., Pobedinsky G.G. Strategic directions for the development of topographic, geodetic and cartographic support of the Russian Federation // Bulletin of the State University of Economics, 2015. No 2. Pp. 5–23.

10. Vlasov A.N. Risk management: a system for managing potential losses // Business. 2013. No 5. Pp. 25–32.

11. Risk management of an investment project: a textbook for university students studying economics; edited by M.V. Gracheva, A.B. Sakerin. Moscow: UNITY-DANA, 2009. 544 p.

УДК 355/359

doi: 10.53816/23061456_2025_1-2_47

**МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ
ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ БОЕВОГО ОХРАНЕНИЯ АВТОКОЛОННЫ ПРИ
НАПАДЕНИИ ДИВЕРСИОННО-РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНОЙ ГРУППЫ**

**A MODEL FOR DETERMINING THE OPTIMAL COUNTERACTION TIME OF
THE CONVOY'S COMBAT GUARD DURING AN ATTACK BY A SABOTAGE
AND RECONNAISSANCE GROUP**

Д-р техн. наук С.Н. Курков¹, д-р техн. наук Д.С. Курков², Д.В. Моргунов³

D.Sc. S.N. Kurkov, D.Sc. D.S. Kurkov, D.V. Morgunov

¹*Пензенский артиллерийский инженерный институт (филиал) ВА МТО,*

²*Военный учебный центр «Пензенский государственный университет»,*

³*Вольский военный институт материального обеспечения (филиал) ВА МТО*

Получена зависимость, позволяющая определить оптимальное время противодействия боевого охранения (БО) автоколонны при нападении диверсионно-разведывательной группы (ДРГ). Время противодействия зависит как от характеристик поражающего действия и функционирования вооружения БО, так и от обобщенной характеристики противодействия ДРГ (надежности подавления БО противником — π). Задавая конкретное значение уровня надежности подавления, можно рассчитать допустимое время стрельбы БО. Величина π может определяться как с использованием соотношений теории боевой эффективности, так и на основе обработки статистических данных опыта войны и опроса экспертов. Данная зависимость может быть применена для обоснования тактики сопровождения средств материально-технического обеспечения в районе ведения боевых действий, а также для определения рациональных тактико-технических характеристик вооружения.

Ключевые слова: автоколонна, боевое охранение, диверсионно-разведывательная группа (ДРГ), математическое ожидание (МОЖ), среднее квадратическое отклонение.

A dependence has been obtained that makes it possible to determine the optimal time to counter the convoy's combat guard (CG) during an attack by a sabotage and reconnaissance group (SRG). The counteraction time depends both on the characteristics of the damaging effect and the functioning of the CG weapons, and on the generalized characteristic of the DRG counteraction (the readiness of the CG suppression by the enemy — π). By setting a specific value for the level of suppression reliability, it is possible to calculate the permissible firing time of the CG. The value of π can be determined both using the relations of the theory of combat effectiveness, and based on the processing of statistical data from the experience of war and a survey of experts. This dependence can be used to justify the tactics of escorting logistics assets in the area of combat operations, as well as to determine the rational tactical and technical characteristics of weapons.

Keywords: convoy, combat guard, sabotage and reconnaissance group (SRG), mathematical expectation, standard deviation.

Ранее была разработана математическая модель определения вероятностей нахождения боевого охранения (БО) в состояниях противодействия с диверсионно-разведывательной группой (ДРГ) при ее нападении на автоколонну с материально-техническими средствами (МТС) на марше, опубликованная в [1], которая позволила получить аналитические выражения для расчета нахождения БО

в состояниях: S_1 — колонна с МТС и ее БО находятся в неразведанном состоянии, S_2 — колонна с МТС и ее БО разведаны противником, S_3 — нахождение колонны с МТС и ее БО под огнем противника, S_4 — колонна с МТС и ее БО подавлены на некоторое время, S_5 — колонна с МТО и ее БО боеспособны и осуществляют подготовку к выполнению задачи следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \left\{ 1 + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{23} + \lambda_{25}} \left[1 + \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{34} + \lambda_{35}} \left(1 + \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{45}} \right) \right] + \frac{\lambda_{12} + \lambda_{15}}{\lambda_{51}} \right\}^{-1}; \\ P_2 &= \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{23} + \lambda_{25}} P_1; P_3 = \frac{\lambda_{12} \lambda_{23}}{(\lambda_{23} + \lambda_{25})(\lambda_{34} + \lambda_{35})} P_1; \\ P_4 &= \frac{\lambda_{12} \lambda_{23} \lambda_{34}}{(\lambda_{23} + \lambda_{25})(\lambda_{34} + \lambda_{35}) \lambda_{45}} P_1; P_5 = \frac{\lambda_{12} + \lambda_{15}}{\lambda_{51}} P_1. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Наибольший интерес среди найденных вероятностей состояний представляет вероятность нахождения БО в подавленном состоянии P_4 как характеристика противодействия ДРГ [4, 7, 8].

Используя соотношения по определению плотности вероятности перехода БО из i -го в j -е состояние [2, 5]

$$\lambda_{ij} = \tilde{\lambda}_{ij} p_{ij},$$

где $\tilde{\lambda}_{ij}$ — интенсивность перехода БО из i -го в j -е состояние соответственно;

p_{ij} — вероятность перехода БО из i -го в j -е состояние соответственно.

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\lambda}_{12} &= \frac{1}{\bar{t}_p}; \tilde{\lambda}_{15} = \frac{1}{\bar{t}_c}; \tilde{\lambda}_{23} = \frac{1}{\bar{t}_p + \bar{t}_n}; \tilde{\lambda}_{25} = \frac{1}{\bar{t}_o}; \\ \tilde{\lambda}_{34} &= \frac{1}{\bar{t}^*}; \tilde{\lambda}_{35} = \frac{(\bar{t}_p + \bar{t}_c)(\bar{t}_n + \bar{t}_k)}{\bar{t}_c^3}; \tilde{\lambda}_{45} = \frac{1}{\bar{t}_o}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В формулах (2) черта над переменными означает математическое ожидание (МОЖ) соответствующих случайных величин (СВ):

- \bar{t}_p — МОЖ времени разведки БО ДРГ;
- \bar{t}_n — МОЖ времени подготовки БО к стрельбе;
- \bar{t}_c — МОЖ времени стрельбы БО;
- τ_o — МОЖ времени подавления БО (восстановления);

\bar{t}^* — МОЖ времени нахождения БО под обстрелом ДРГ;

\bar{t}_o — МОЖ времени огневого воздействия ДРГ, а также

$$\begin{aligned} p_{12} &= \text{Вер}(t_p < t_c) = \int_0^{\infty} f(t_c) F(t_p / t_c) dt_c = \\ &= \int_0^{\infty} \frac{1}{\bar{t}_c} e^{-\frac{t_c}{\bar{t}_c}} \left(1 - e^{-\frac{t_c}{\bar{t}_n}} \right) dt_c = \frac{\bar{t}_c}{\bar{t}_p + \bar{t}_c}; \end{aligned}$$

$$p_{15} = 1 - \text{Вер}(t_p \geq t_c) = 1 - p_{12} = \frac{\bar{t}_o}{\bar{t}_p + \bar{t}_c};$$

$$p_{23} = \text{Вер}(t_p + t_n < t_c) = \frac{\bar{t}_c^2}{(\bar{t}_c + \bar{t}_p)(\bar{t}_c + \bar{t}_n)};$$

$$p_{25} = 1 - p_{23} = 1 - \frac{\bar{t}_c^2}{(\bar{t}_c + \bar{t}_p)(\bar{t}_c + \bar{t}_n)};$$

$$p_{35} = \text{Вер}(t_o < t^*) = 1 - \frac{\bar{t}_c^3}{(\bar{t}_c + \bar{t}_p)(\bar{t}_c + \bar{t}_n)(\bar{t}_c + \bar{t}^*)};$$

$$p_{34} = 1 - p_{35} = \frac{\bar{t}_c^3}{(\bar{t}_c + \bar{t}_p)(\bar{t}_c + \bar{t}_n)(\bar{t}_c + \bar{t}^*)}.$$

и

$$P_{45} = P_{51} = 1.$$

После преобразований для величины P_4 будем иметь:

$$P_4 = \frac{\bar{\tau}_o \bar{t}_c P_1}{A_1 A_2 A_3}, \quad (3)$$

где

$$P_1 = \left\{ 1 + \frac{\bar{t}_c^2 A}{\bar{t}_p (\bar{t}_c + \bar{t}_p) A_3} + \frac{(\bar{t}_c^2 + \bar{t}_p^2)(\bar{t}_{дв} + \bar{t}_{ож})}{\bar{t}_p \bar{t}_c (\bar{t}_c + \bar{t}_p)} \right\}^{-1};$$

$$A = 1 + \frac{\bar{t}_c^2 \bar{t}^*}{(\bar{t}_c + \bar{t}_p)(\bar{t}_c + \bar{t}_n)(\bar{t}_p + \bar{t}_n) A_2} \times \left[1 + \frac{\bar{\tau}_o \bar{t}_c^3}{\bar{t}^* (\bar{t}_c + \bar{t}_p)(\bar{t}_c + \bar{t}_n)(\bar{t}_c + \bar{t}^*)} \right];$$

$$A_1 = (\bar{t}_c + \bar{t}_p)^3 (\bar{t}_c + \bar{t}_n)^2 (\bar{t}_c + \bar{t}^*) (\bar{t}_p + \bar{t}_n) \bar{t}_p;$$

$$A_2 = \left[1 + \frac{\bar{t}^*}{\bar{t}^* + \bar{t}_c} - \frac{\bar{t}_c^3}{(\bar{t}_c + \bar{t}_p)(\bar{t}_c + \bar{t}_n)(\bar{t}_c + \bar{t}^*)} \right];$$

$$A_3 = \left[1 + \frac{\bar{t}_c^3}{(\bar{t}_c + \bar{t}_p)(\bar{t}_c + \bar{t}_n)(\bar{t}_p + \bar{t}_n)} - \frac{\bar{t}_c^2}{(\bar{t}_c + \bar{t}_p)(\bar{t}_c + \bar{t}_n)} \right].$$

Для дальнейшего анализа полученных величин сделаем допущения, что

$$\begin{aligned} \bar{t}_c + \bar{t}_p &\cong \bar{t}_c; & \bar{t}_o + \bar{t}_n &\cong \bar{t}_c; \\ \bar{t}_c + \bar{t}^* &\cong \bar{t}_c; & \bar{\tau}_o + \bar{t}^* &\cong \bar{\tau}_o. \end{aligned}$$

Тогда после преобразования уравнения (3) выражение для вероятности нахождения БО в подавленном состоянии запишется в виде

$$P_4 = \frac{\bar{\tau}_o \bar{t}_c}{\tau_2 + \bar{\tau}_o \bar{t}_c}, \quad (4)$$

где

$$\tau_2 = (2\bar{t}_p + \bar{t}_n + \bar{t}_{дв} + \bar{t}_{ож}) \bar{t}^*.$$

Анализ зависимости (4) для различных частных случаев показывает, что она правильно отражает физический смысл рассматриваемого явления. В частности,

$$\begin{aligned} P_4 &\rightarrow 0 \text{ при } \bar{t}_c \rightarrow 0, \text{ или } \bar{t}_p \rightarrow \infty, \\ &\text{или } \bar{t}_n \rightarrow \infty, \text{ или } \bar{\tau}_o \rightarrow 0; \end{aligned}$$

$$P_4 \rightarrow 1 \text{ при } \bar{t}_c \rightarrow \infty, \text{ или } \bar{\tau}_o \rightarrow \infty.$$

Полученная формула (4) может быть использована для определения оптимального времени ведения огня БО автоколонны при нападении ДРГ.

Если обозначить R — вероятность выполнения огневой задачи в процессе функционирования БО, то можно записать

$$R = (1 - P_4) P_{пор}, \quad (5)$$

где $(1 - P_4)$ — вероятность нахождения БО в неподдавленном состоянии;

$P_{пор}$ — вероятность поражения ДРГ [3, 6];

$$P_{пор} = \frac{n\lambda \bar{t}_c}{\alpha + n\lambda \bar{t}_c}; \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{19E_x E_y}{S}; \quad (7)$$

n, λ — количество огневых средств в БО и их средняя скорострельность, соответственно;

$E_x = E_d, E_y = E_g$ — срединные ошибки подготовки по дальности и направлению, соответственно;

S — приведенная зона поражения.

Подставив в выражение (5) зависимости (4), (6), получим

$$R = \frac{\tau_2}{(\tau_2 + \bar{\tau}_o \bar{t}_c)} \cdot \frac{n\lambda \bar{t}_c}{(\alpha + n\lambda \bar{t}_c)}.$$

Вычислив производную $\frac{dR}{d\bar{t}_c}$ и решив уравнение

$$\frac{dR}{d\bar{t}_c} = 0,$$

после преобразований и подстановки выражения (7) для величины α найдем

$$\bar{t}_{c\text{ опт}} = \sqrt{\frac{19E_x E_y (2\bar{t}_p + \bar{t}_n + \bar{t}_{дв} + \bar{t}_{ож}) \bar{t}^*}{Sn\lambda \bar{\tau}_o}}. \quad (8)$$

По формуле (8) рассчитывается МОЖ времени стрельбы БО за цикл функционирования. Эта величина может использоваться и при проведении других исследований по обоснованию тактико-технических характеристик вооружения БО.

Легко убедиться, что формула (8) дает максимальное значение вероятности выполнения задачи: анализ величины $d^2R/d\bar{t}_c^2$ показывает, что она отрицательна в точке $t - \bar{t}_{c\text{ опт}}$.

Оценку отклонений величины $\bar{t}_{c\text{ опт}}$ от ее МОЖ (8) можно произвести, используя выражение для среднеквадратического отклонения (СКО) σ функции не корреляционных случайных величин [3, 6]:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)^2} \sigma_{x_i}^2, \quad (9)$$

где φ — функция случайных аргументов x_1, x_2, \dots, x_n , $\varphi = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$;

σ_{x_i} — СКО случайного аргумента x_i ($i = 1, 2, \dots, n$).

Дифференцирование выражения (8) дает:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{t}_p} = B \frac{\bar{t}^*}{\bar{\tau}_o} \left[\frac{(2\bar{t}_p + \bar{t}_n + \bar{t}_{\text{дв}} + \bar{t}_{\text{ож}}) \bar{t}^*}{\bar{\tau}_o} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{t}_n} = \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{t}_{\text{дв}}} = \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{t}_{\text{ож}}} = \frac{1}{2} B \frac{\bar{t}^*}{\bar{\tau}_o} \left[\frac{(2\bar{t}_p + \bar{t}_n + \bar{t}_{\text{дв}} + \bar{t}_{\text{ож}}) \bar{t}^*}{\bar{\tau}_o} \right]^{-\frac{1}{2}}; \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{t}^*} = \frac{1}{2} B \frac{\bar{t}^*}{\bar{\tau}_o} \left[\frac{(2\bar{t}_p + \bar{t}_n + \bar{t}_{\text{дв}} + \bar{t}_{\text{ож}}) \bar{t}^*}{\bar{\tau}_o} \right]^{-\frac{1}{2}} \times \frac{(2\bar{t}_p + \bar{t}_n + \bar{t}_{\text{дв}} + \bar{t}_{\text{ож}}) \bar{t}^*}{\bar{\tau}_o^2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где $B = \sqrt{\frac{19E_x E_y}{S n \lambda}}$.

Для СКО σ_{t_c} времени стрельбы, используя зависимости (9), (10) и учитывая, что при пока-

зательном законе распределения МОЖ и СКО совпадают, получим

$$\sigma_{t_c} = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial \bar{t}} \right)_{\bar{t}_p}^2 \bar{t}_p^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \bar{t}} \right)_{\bar{t}_n}^2 \bar{t}_n^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \bar{t}} \right)_{\bar{t}_{\text{дв}}}^2 \bar{t}_{\text{дв}}^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \bar{t}} \right)_{\bar{t}_{\text{ож}}}^2 \bar{t}_{\text{ож}}^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \bar{\tau}_o} \right)_{\bar{\tau}_o}^2 \bar{\tau}_o^2}$$

В выражение (8) входит отношение $\bar{t}^2 / \bar{\tau}_o$ времен пребывания БО в неподавленном и подавленном состояниях за время обстрела ДРГ.

Введем величину

$$\pi = \frac{\bar{\tau}_o}{\bar{\tau}_o + \bar{t}^*} = \frac{1}{1 + \beta}, \quad 0 \leq \pi \leq 1, \quad (11)$$

где $\beta = \frac{\bar{t}^*}{\bar{\tau}_o}$.

Поскольку сумма $\bar{\tau}_o + \bar{t}^*$ есть полное время огневого воздействия ДРГ по БО, зависящее от интенсивности обстрела, типа и количества привлекаемых средств, то величину π можно интерпретировать как вероятность нахождения БО в подавленном состоянии за время огневого воздействия ДРГ или надежность подавления БО огнем противника.

Решив уравнение (11) относительно величины β и подставив ее в формулу (8), окончательно получим

$$\bar{t}_{c\text{ опт}} = \sqrt{\frac{19E_x E_y}{S \lambda n} (2\bar{t}_p + \bar{t}_n + \bar{t}_{\text{дв}} + \bar{t}_{\text{ож}}) \frac{(1 - \pi)}{\pi}}. \quad (12)$$

Таким образом, оптимальное время стрельбы БО при нападении ДРГ на автоколонну, которое зависит как от характеристик поражающего действия и функционирования образцов вооружения БО, так и от обобщенной характеристики противодействия ДРГ (надежности подавления БО противником — π).

Задавая конкретное значение уровня надежности подавления, можно рассчитать допустимое время стрельбы БО.

Величина π может определяться как с использованием соотношений теории боевой эффективности, так и на основе обработки статистических данных опыта войны и опроса экспертов.

Предложенный подход остается справедливым и в случае иных законов распределения [8, 9],

составляющих времени цикла функционирования БО. Хотя возникающие при этом сложности не позволяют получать решение в аналитическом виде и приходится использовать ЭВМ, но качественные результаты остаются аналогичными.

Получено выражение (12) для определения оптимального времени стрельбы БО, которое может найти применение при обосновании тактики сопровождения средств материально-технического обеспечения в район ведения боевых действий и рациональных технических характеристик образцов вооружения.

Список источников

1. Курков С.Н., Искоркин Д.В., Моргунов Д.В. Модель определения вероятностей нахождения боевого охранения автоколонны в состояниях противодействия с диверсионно-разведывательной группой // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2024. № 11–12 (197–198). С. 92–98.

2. Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1980. 208 с.

3. Фендриков Н.М., Яковлев В.И. Методы расчетов боевой эффективности вооружения. М.: Воениздат, 1971. 224 с.

4. Курков С.Н., Голованов О.А., Курков Д.С., Плющ А.А. Применение марковских случайных процессов в решении военно-технических задач: монография. Пенза: Изд-во ПГУ, 2018. 400 с.

5. Курков Д.С., Тобольченко П.И. К вопросу совершенствования информационного обеспечения системы управления техническим состоянием, надежностью и безопасностью боеприпасов при хранении в мирное время // Вооружение и экономика: сб. науч. ст. XII Межведомственной НТК. М.: ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России, 2019. С. 407–413.

6. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Высшая школа, 2000. 383 с.

7. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Задачи и упражнения по теории вероятностей: учеб. пособие. 5-е изд. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 440 с.

8. Логвин А.М., Мнацаканов Ю.Н., Паршин Ж.П. Теория вероятностей в применении к артиллерийской инженерной практике. Сборник задач. Ч. II.: Пенза: ВАИУ, 1986. 95 с.

9. Севостьянов Б.А. Ветвящиеся процессы. М.: ЛЕНАНД. 2019. 440 с.

References

1. Kurkov S.N., Iskorkin D.V., Morgunov D.V. A model for determining the probabilities of finding a convoy's combat guard in states of counteraction with a sabotage and reconnaissance group // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2024. No 11–12 (197–198). Pp. 92–98.

2. Wentzel E.S. Operations research. Tasks, principles, methodology. M.: Nauka, 1980. 208 p.

3. Fendrikov N.M., Yakovlev V.I. Methods of calculating the combat effectiveness of weapons. M.: Voenizdat, 1971. 224 p.

4. Kurkov S.N., Golovanov O.A., Kurkov D.S., Plyushch A.A. The use of Markov random processes in solving military-technical problems: monograph. Penza: Publishing House of PSU, 2018. 400 p.

5. Kurkov D.S., Tobolchenko P.I. On the issue of improving information support for the management system of the technical condition, reliability and safety of ammunition during storage in peacetime // Armament and Economics: collection of scientific articles of the XII Interdepartmental Scientific Committee. M.: FSBI «46 Central Research Institute» of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 2019. Pp. 407–413.

6. Wentzel E.S., Ovcharov L.A. Theory of random processes and its engineering applications. M.: Higher School, 2000. 383 p.

7. Wentzel E.S., Ovcharov L.A. Problems and exercises in probability theory. Study guide. 5th ed. Moscow: Publishing center «Academy», 2004. 440 p.

8. Logvin A.M., Mnatsakanov Yu.N., Parshin J.P. Probability theory as applied to artillery engineering practice. Collection of tasks. Part II.: Penza: VAI, 1986. 95 p.

9. Sevostyanov B.A. Branching processes. M.: LENAND. 2019. 440 p.

УДК 621.391

doi: 10.53816/23061456_2025_1-2_52

**ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ОПТИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ
СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
НА ФОНЕ НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**
**APPLICATION OF A SPECIAL-PURPOSE OPTICAL TRANSPORT NETWORK
MODEL UNDER UNAUTHORIZED INFLUENCES**

Канд. техн. наук А.П. Бойко¹, канд. техн. наук П.И. Кузин², канд. техн. наук А.А. Шевченко¹

Ph.D. A.P. Boyko, Ph.D. P.I. Kuzin, Ph.D. A.A. Shevchenko

¹Военная академия связи им. С.М. Буденного,

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова

Благодаря переходу на гибкую сетку частот и стремительное развитие технологий коммутации и маршрутизации спектра в оптических сетях, стала доступна новая телекоммуникационная услуга физического уровня — аренда спектра, представляющая собой обобщение и развитие другой услуги — аренды длин волн. Ряд достоинств, связанных с возможностью гибкого управления канальной структурой в условиях изменения требований к пропускной способности направлений связи делает аренду спектра привлекательным решением для построения оптических транспортных сетей специального назначения, однако требует дополнительных исследований возможных рисков, связанных с множественным доступом пользователей к элементам инфраструктуры операторов связи. В статье рассматривается применение разработанной модели на основе нового вида телекоммуникационных услуг, функционирующей в условиях возможных несанкционированных воздействий.

Ключевые слова: оптические транспортные сети специального назначения, аренда спектра, спектральный ресурс, несанкционированные воздействия.

Thanks to transition to flexible frequency grid and rapid development of spectrum switching and routing technologies in optical networks, a new physical layer telecommunication service — spectrum leasing — became available, which is a generalization and development of another service — wavelength leasing. A number of advantages associated with the possibility of flexible channel structure management in the conditions of changing requirements to the bandwidth capacity of communication directions makes spectrum leasing an attractive solution for the construction of optical transport networks for special purposes, but requires additional research of possible risks associated with multiple access of users to the elements of the infrastructure of telecom operators. The article considers the application of the developed model on the basis of a new type of telecommunication services operating under conditions of possible unauthorized impacts.

Keywords: special purpose optical transport networks, spectrum lease, spectrum resource, unauthorized impacts.

Введение

Современные оптические транспортные сети специального назначения (ОТС СН) формируются на основе доверенной активной телекоммуникационной инфраструктуры операторов связи Единой сети электросвязи Российской Федерации (ЕСЭ РФ), представляющей собой выделенные физические линейные ресурсы: оптические кабели, отдельные пары оптических волокон, длины волн [1–4].

Подход к аренде телекоммуникационных ресурсов на физическом уровне имеет ряд достоинств, заключающихся в:

- снижении рисков нарушения безопасности и устойчивости ОТС СН, за счет минимизации использования активного телекоммуникационного оборудования операторов связи ЕСЭ РФ;

- увеличении гибкости и масштабируемости сети за счет возможности изменения пропускной способности каналов и линий в соответствии с изменениями потребностей в скоростях передачи между корреспондирующими узлами сети;

- уменьшении экономических затрат за счет оптимизации арендуемых ресурсов и использования собственного оборудования;

- повышении управляемости за счет доступа к контролю основных (собственных) активных элементов ОТС СН.

Коммерческие операторы и провайдеры связи по всему миру непрерывно совершенствуют виды предоставляемых телекоммуникационных услуг. С развитием технологий эластичных (гибких) оптических сетей [5, 6] появилась новая телекоммуникационная услуга — аренда спектра в оптических сетях, позволяющая арендаторам использовать определенные частотные диапазоны в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) операторов для формирования спектральных каналов на основе собственного, доверенного оборудования [7, 8]. При этом пользователи данной услуги способны варьировать характеристиками и показателями образуемых спектральных каналов: пропускной способностью, качеством передачи, шириной спектра, а также показателями устойчивости и безопасности, в условиях возможных несанкционированных воздействий на физическом уровне.

Несмотря на совершенствование и развитие подходов к использованию арендуемых те-

лекоммуникационных ресурсов сетей связи общего пользования (СС ОП), сети связи специального назначения (СС СН) продолжают критически зависеть от протоколов и технологий, применяемых в гражданской сфере связи и телекоммуникаций. Таким образом, СС ОП будут и впредь играть роль вспомогательного компонента при построении СС СН, а их телекоммуникационные ресурсы будут восполнять недостаток собственных ресурсов, необходимых для построения СС СН. При этом существенное отставание развития СС СН от СС ОП будет способствовать тому, что наиболее ожидаемым сценарием развития СС СН будет являться переход на технологии, применяемые в гражданской сфере связи и телекоммуникаций. Многолетний опыт взаимодействия СС СН с СС ОП показывает, что технологическое превосходство последних будет способствовать тому, что при построении СС СН будут применяться готовые технологии гражданской связи, которые необходимо адаптировать к возможным несанкционированным воздействиям, в особенности преднамеренного характера.

Для проведения исследований и экспериментов с целью получения информации о важнейших свойствах ОТС СН на основе современных телекоммуникационных ресурсов, проектирования, а также эффективного управления ими в условиях несанкционированных воздействий, необходима разработка адекватных, полных и непротиворечивых моделей. Целью данной статьи является разработка и применение модели ОТС СН, сформированной на основе выделенного спектрального ресурса и функционирующей в условиях несанкционированных воздействий. Далее по тексту под ОТС СН будут пониматься ОТС СН, сформированные на основе арендованного (выделенного) спектрального ресурса.

Принципы формирования ОТС СН

Существующие ОТС СН характеризуются, как правило, следующими особенностями:

- формируются на основе гибридных волоконно-оптических трасс, использующих как собственные ВОЛС, так и ВОЛС различных операторов связи;

- используют ВОЛС с различной структурой (с компенсаторами дисперсии и без, с линейными

оптическими усилителями и распределенными волоконными усилителями) и различными типами оптических волокон;

– функционируют в условиях возможных несанкционированных воздействий противника;

– имеют потребность в информационно-технологической совместимости и возможности сопряжения с интеллектуальной сетью связи (ИСС) и сетями связи общего пользования.

Модель перспективной ОТС СН основана на семействе технологий эластичных (гибких) оптических сетей. Как и в существующих оптических сетях, формирование каналов осуществляется на основе технологий спектрального уплотнения в определенной (выделенной) полосе частот ВОЛС. Однако назначение частот и выбор видов передаваемых сигналов осуществляется более «свободно» в соответствии с правилами гибкой сетки частот. Кроме того, коммутация оптических сигналов в узлах сети осуществляется программно и без преобразования сигналов в электрический вид. ОТС СН имеет трехуровневую архитектуру:

– магистральный (глобальный) уровень представляет собой ядро сети и предназначен для передачи (распространения) разнородного трафика между различными региональными ОТС СН;

– региональный (зоновый) уровень агрегации трафика ОТС СН предназначен для распределения трафика между объектами внутри региона и передачи трафика на первый — магистральный уровень;

– местный уровень (сетей доступа) предназначен для обеспечения доступа к узлам связи ОТС СН.

Канальная структура ОТС СН реализуется полностью оптическими соединениями между двумя корреспондирующими узлами, позволяющими передавать оптические сигналы без оптоэлектрооптического (ОЭО) преобразования в транзитных узлах. Образованные отдельными спектральными каналами между двумя соседними узлами, данные оптические соединения являют собой составные оптические каналы и носят название световых путей. Отсутствие ОЭО-преобразования в процессе коммутации, мультиплексирования и ретрансляции оптических сигналов способствует тому, что оптические сети на основе световых путей имеют ряд достоинств: низкую сквозную задержку передачи

данных, дополнительный уровень безопасности, повышенную стабильность оптического и цифрового синхронизма, а самое главное возможность оптимизировать канальную структуру сети под конкретные требования.

Модель ОТС СН на основе выделенного спектрального ресурса

Для того чтобы предлагаемая модель охватывала не только образ конкретной ОТС СН, а целый класс ОТС СН (модель в широком смысле), воспользуемся при разработке модели понятиями, описанными в [11, с. 24].

Класс моделируемых объектов (прототипов, прообразов) представляет собой магистральные и региональные ОТС СН, сформированные на основе выделенного спектрального ресурса, под которым понимаются диапазоны частот в ВОЛС, доступные для передачи оптических сигналов. Архитектура ОТС СН представляется единством физической и протокольной структур. Физическая структура сети определяет вещественную основу организации сети. К элементам физической структуры сети относятся узлы и соединяющие их линии [12]. Узлы представляют собой объединение реконфигурируемых оптических мультиплексоров ввода/вывода (РОМВВ) на основе селективных переключателей длины волны с переменной полосой пропускания и транспондеров (мультиплексоров) с переключаемыми форматами сигналов (рис. 1). В узлах поддерживаются функции коммутации фрагментов спектра линейных групповых сигналов, а также формирование оптических сигналов с переменной скоростью, соответствующей оптической транспортной иерархии, а также шириной спектра и центральной частотой, определенными в рекомендациях Международного союза электросвязи (МСЭ) для гибкой сетки частот.

Линии представляют собой выделенный спектральный ресурс в ВОЛС, поддиапазоны частот, доступные для передачи оптических сигналов между узлами (рис. 2). Поддиапазоны характеризуются количеством элементарных частотных интервалов (ЭЧИ) слотов, значениями нижних и верхних частот.

Протокольная структура ОТС СН представляет собой свод правил взаимодействия между

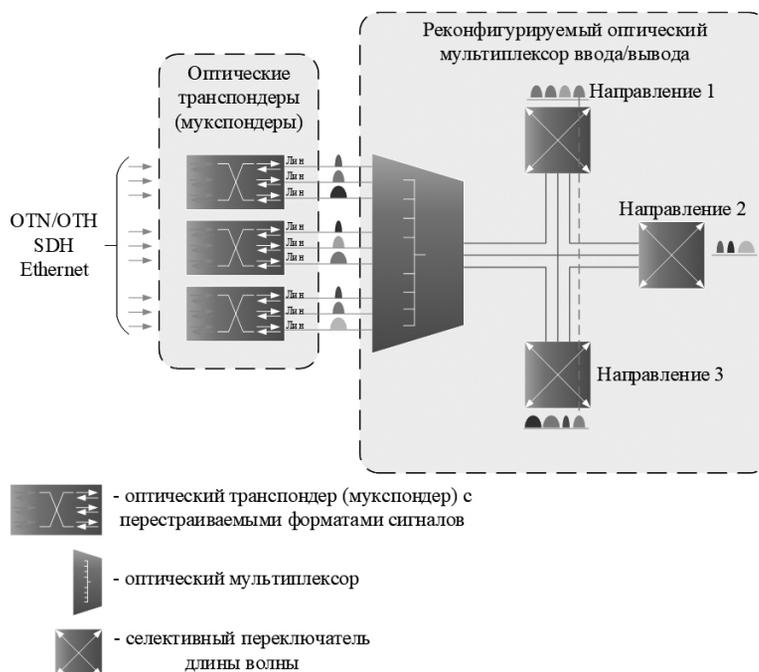


Рис. 1. Структура узла оптической транспортной сети специального назначения

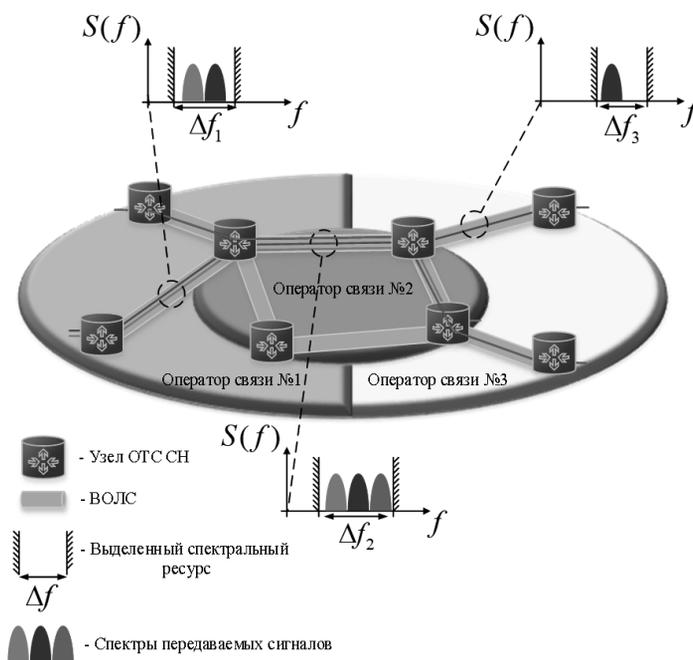


Рис. 2. Выделенный спектральный ресурс в волоконно-оптической линии связи

программными и аппаратными средствами сети и основывается на совокупности применяемых технологий. Аппаратура спектрального уплотнения реализуется на основе технологии плотного мультиплексирования с разделением по длине волны DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Центральные частоты и полосы

пропускания спектральных каналов определяются планом гибкой сетки частот (Flex Grid). Сигналы в оптических транспондерах (мультиплексорах) формируются с использованием известных форматов модуляции (и типов линейного кодирования), скорости передачи соответствуют цифровым групповым сигналам оптической

транспортной иерархии ОТН (Optical Transport Hierarchy).

Класс формальных конструкций, описывающих образы моделируемых объектов (ОТС СН) представляет собой совокупность канальных структур, заданных множествами световых путей и передаваемыми в них оптическими сигналами. Под световым путем в модели понимается составной оптический канал, сформированный на основе диапазонов частот в последовательности ВОЛС и обеспечивающий распространение оптического сигнала в заданной полосе частот между двумя узлами без ОЭО-преобразования [13].

С помощью функции моделирования каждой ОТС СН (объекту моделирования) может быть поставлена в соответствие канальная структура (объект-образ). При этом вход и выход модели представляют собой сложные конструкции — физическую и канальную структуры ОТС СН соответственно, а функция моделирования является оператором. В качестве правил отображения выступают способы и методы выбора видов модуляции и/или типов сигналов в оптических

транспондерах (мультиплексах), а также маршрутизации и назначения спектра для световых путей при заданных ограничениях, определяемых физической структурой.

Каждому образу моделируемой ОТС СН также ставится в соответствие набор значений исследуемых параметров: пропускная способность ОТС СН, максимальный поток в информационном направлении, качество передачи в световых путях, качество цифровых каналов и групповых трактов, экономические показатели и др. [14]. Требования к перечисленным параметрам определяются суперсистемой (надсистемой). Основной целью ОТС СН является перенос и распределение трафика между сетями доступа пунктов управления, являющихся элементами системы управления. Представляя собой суперсистему для ОТС СН, система управления определяет требования к значениям параметров ОТС СН.

Необходимо также заметить, что каждый образ ОТС СН может интерпретироваться различными прототипами ОТС СН. Это означает, что для ОТС СН, различающихся физической струк-

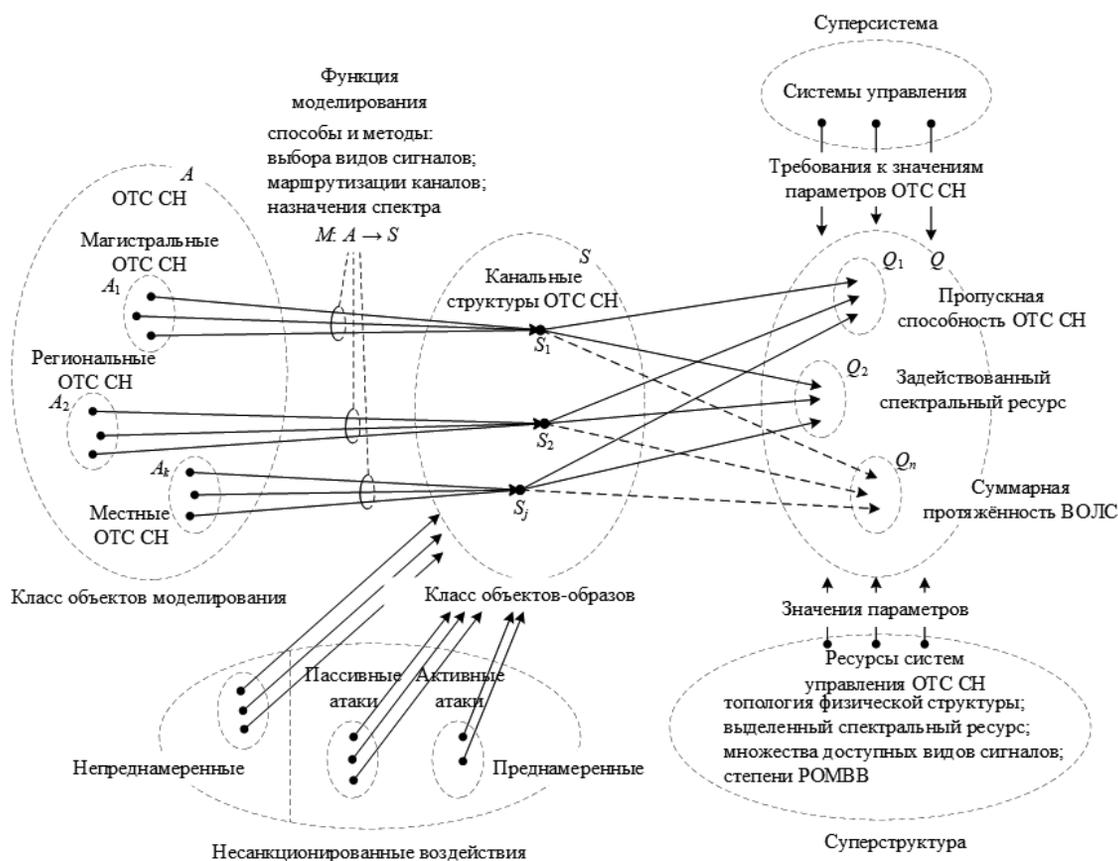


Рис. 3. Понятия, используемые при моделировании оптической транспортной сети специального назначения

турой (топологией, структурой узлов и линий), может быть сформирована канальная структура с «приблизительно одинаковыми» параметрами. Функция интерпретации, являющаяся обратной для функции моделирования, в данном случае также является оператором и позволяет решать задачу синтеза физической структуры сети при заданной канальной структуре.

Для описания возможностей подсистемы управления ОТС СН по управлению канальной структурой целесообразно ввести понятие суперструктуры ОТС СН [1]. Представляя собой ресурсы системы управления ОТС СН: заданную топологию физической структуры, структуру ВОЛС, выделенный спектральный ресурс в ВОЛС, множества доступных видов сигналов, формируемых в узлах сети, количество поддерживаемых направлений и коммутационная способность РОМВВ, суперструктура также, как и суперсистема оказывает воздействие на назначение параметров ОТС СН.

Важнейшим фактором, влияющим на множество канальных структур ОТС СН, доступных для реализации, являются несанкционированные воздействия, которые могут носить преднамеренный и непреднамеренный характер. Особое внимание в данной статье уделяется преднамеренным воздействиям на ОТС СН, которые реализуются потенциальным противником.

На рис. 3 отображены понятия, задействованные в применении модели ОТС СН на основе выделенного спектрального ресурса в условиях несанкционированных воздействий.

Модель воздействия противника на ОТС СН

Принцип построения ОТС СН на основе выделенных спектральных ресурсов предполагает множественный доступ к ВОЛС для формирования каналов и передачи оптических сигналов в интересах органов государственной власти. При этом спектральные диапазоны ВОЛС, доступные для передачи сигналов в интересах отдельных пользователей, граничат друг с другом и представляют собой непересекающиеся области спектра. Реализация множественного доступа возможна на основе различных сценариев:

– спектральный ресурс ВОЛС делится между государственными органами и организациями;

– спектральный ресурс ВОЛС делится между структурными подразделениями одного государственного органа (организации);

– спектральный ресурс ВОЛС делится между гражданскими операторами и государственными органами и организациями;

– спектральные каналы для построения ОТС СН формируются на основе гибридного способа, обобщающего три предыдущих.

При реализации множественного доступа к спектральному ресурсу ВОЛС на основе указанных сценариев одним из пользователей может стать потенциальный противник, целью которого является несанкционированное воздействие на ОТС СН. При этом спектральный ресурс ВОЛС представляет собой в определенном смысле эфир и является конфликтной средой с различными вариантами возможных угроз. Имея доступ к ресурсам оптической сети, потенциальным противником возможна реализация двух типов угроз:

– пассивные атаки, предполагающие несанкционированный доступ к спектральным каналам ОТС СН с целью перехвата передаваемой информации;

– активные атаки, заключающиеся во внедрении в сеть вредоносных сигналов, вызывающих ухудшение качества передачи в спектральных каналах ОТС СН.

Атаки на спектральные каналы реализуются путем физического подключения к оптическому волокну или сетевым элементам ОТС СН, например, к портам мониторинга оптических усилителей в составе ВОЛС или РОМВВ. Физическое подключение к оптическому волокну — непростая задача, требующая вскрытия защитного материала и оболочки, что легко может привести к поломке.

Подключение к портам мониторинга сетевых элементов, в свою очередь, требует непосредственного доступа в специализированные помещения ОТС СН с размещенным в них оборудованием.

Другой класс атак в волоконно-оптических системах передачи со спектральным разделением реализуется на основе доступа к определенному диапазону частот ВОЛС за счет утечки мощности оптических сигналов из одних диапазонов частот в другие в результате межканальных перекрестных помех.

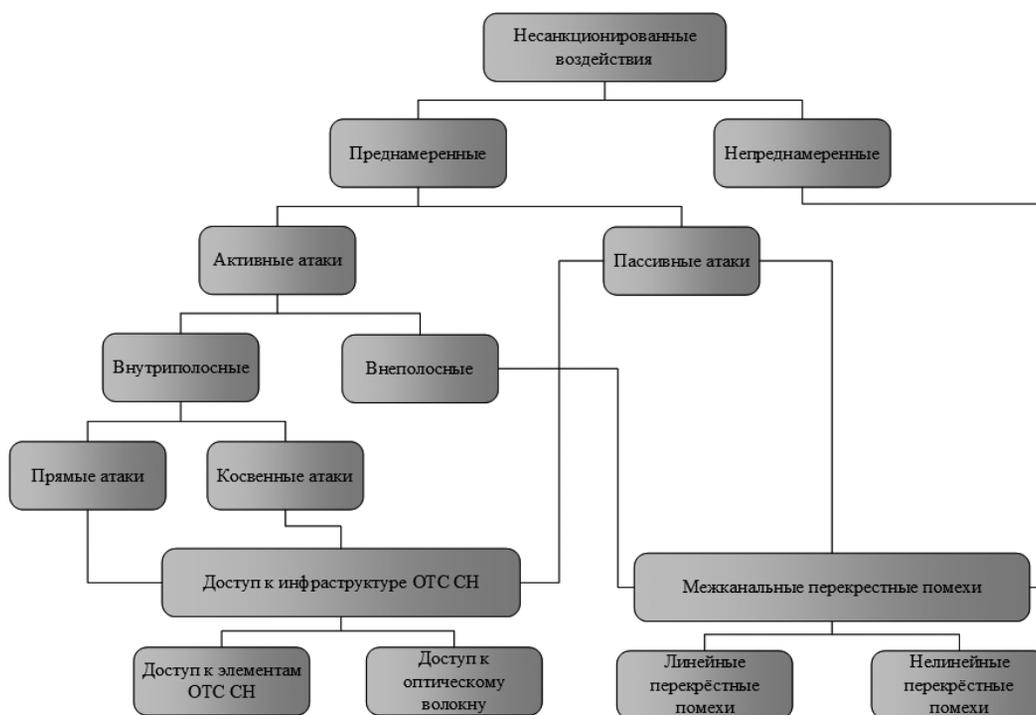


Рис. 4. Классификация несанкционированных воздействий

На рис. 4 представлена классификация несанкционированных воздействий на ОТС СН. На схеме видно, что непреднамеренные воздействия могут быть реализованы как активные атаки с внутриполосным подавлением и с межканальными перекрестными помехами. Причинами их появления могут стать ошибочные действия при назначении центральных частот оптических сигналов, формируемых в оптических транспондерах, некорректная работа узлового оборудования и др. Из этого следует, что класс непреднамеренных воздействий является подклассом более общего класса преднамеренных воздействий, реализуемых потенциальным противником.

Заключение

Современные оптические сети строятся на новых физических принципах, которые порождают дополнительные системы ограничений и рисков, ранее не учитываемых при моделировании ОТС СН. Задача формирования канальной структуры в данных сетях состоит из трех взаимосвязанных подзадач, последовательное решение которых не дает строго оптимального решения общей задачи. Эти подзадачи включа-

ют: выбор видов передаваемых сигналов, поиск и выбор маршрутов, назначение спектра. Особенности ОТС СН, связанные с ограничениями выделенного спектрального ресурса и несанкционированными воздействиями, ограничивают множества допустимых решений каждой из подзадач. Так, множество допустимых маршрутов световых путей ограничивается в результате особенностей передачи оптических сигналов без ОЭО-преобразований. Метрика качества световых путей также должна учитывать виды передаваемых сигналов и их взаимосвязи, а также ограничения на частотные характеристики. При назначении спектра световым путям необходимо учитывать ограничения, обусловленные выделяемым спектральным ресурсом в ОТС СН, и требования к непрерывности частот в пределах всего маршрута светового пути. Выбор передаваемых сигналов должен осуществляться на основе множеств допустимых оптических сигналов, сформированных с учетом ограничений на их взаимные влияния. Кроме того, каждая из подзадач должна решаться в условиях ограничений, накладываемых рисками нарушения безопасности и устойчивости ОТС СН в результате возможных межканальных воздействий.

Направлением дальнейших исследований авторского коллектива статьи является разработка математических моделей воздействия противника на ОТС СН на основе межканальных перекрестных помех, что позволит повысить эффективность управления канальной структурой в условиях преднамеренных угроз.

Список источников

1. Барашков П.Н., Родимов А.П., Ткаченко К.А., Чуднов А.М. Модель системы связи с управляемыми структурами в конфликтных условиях. Л.: ВАС, 1986. 52 с.

2. Стародубцев Ю.И., Иванов С.А., Закалкин П.В. Концептуальные направления решения проблемы обеспечения устойчивости Единой сети электросвязи Российской Федерации // Военная мысль. 2021. № 4. С. 39–49.

3. Макаренко С.И. Описательная модель сети связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 113–164.

4. Иванов В.Г. Модель технической основы системы управления специального назначения в едином информационном пространстве на основе конвергентной инфраструктуры системы связи: монография. СПб.: Политех-Пресс, 2018. 214 с.

5. Люпес В., Веласко Л. Архитектура, технологии и управление эластичных оптических сетей. Люксембург: Спрингер, 2016. 299 с.

6. Биджой С.С., Эйдзи О., Биджой К.С. Эластичные оптические сети: основы, проектирование, контроль и управление. Нью-Дели: Южно-Азиатский университет, 2020. 232 с.

7. Куан Д. По-настоящему открытые подводные кабели с совместным использованием спектра в Азиатско-Тихоокеанском регионе [Электронный ресурс] // Новости и идеи Infinera. 2024. 7 мая. URL: <https://www.infinera.com/blog/truly-open-subsea-cables-with-spectrum-sharing-in-the-asia-pacific-region/tag/submarine> (дата обращения: 09.07.2024).

8. Что такое совместное использование спектра? [Электронный ресурс] // Новости компании Ciena Company. 2020. URL: <https://www.ciena.com/insights/what-is/What-Is-Spectrum-Sharing.html> (дата обращения: 09.07.2024).

9. Хома Дж. От аренды длин волн к общему спектру. [Электронный ресурс] // Новости компании Ribbon Communications Inc. 2020.

26 июня. URL: <https://ribboncommunications.com/company/media-center/blog/alien-wavelengths-shared-spectrum> (дата обращения: 09.07.2024).

10. Ван Ю., Нгуен Л. и Ху К. Виртуализация сетевых функций в эластичных оптических сетях // Журнал световых технологий. 2023. Том 41. № 6. С. 5183–5192.

11. Чуднов А.М. Математические основы моделирования, анализа и оптимизации систем: монография. СПб.: ВАС, 2021. 168 с.

12. Бойко А.П., Одоевский С.М., Кузин П.И. Формирование оптической транспортной сети специального назначения на основе выделенного спектрального ресурса // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2024. № 3–4 (191–192). С. 58–64.

13. Бойко А.П., Кузин П.И., Кузина Е.И. Модель светового пути в оптических транспортных сетях // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2024. № 3–4 (191–192). С. 29–36.

14. Бойко А.П., Константинова А.А., Кузин П.И. и др. Математическая модель оптических транспортных сетей связи специального назначения на основе выделенного спектрального ресурса // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сб. науч. ст. XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции в 4 т., Санкт-Петербург, 27–28 февраля 2024 года. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2024. С. 112–117.

References

1. Barashkov P.N., Rodimov A.P., Tkachenko K.A., Chudnov A.M. Model of communication system with controlled structures in conflict conditions. L.: VAS, 1986. 52 p.

2. Starodubtsev Yu.I., Ivanov S.A., Zakalkin P.V. Conceptual directions of solving the problem of ensuring the stability of the Unified Telecommunications Network of the Russian Federation // Voennaya Mysl. 2021. No 4. Pp. 39–49.

3. Makarenko S.I. Descriptive model of the special purpose communication network // Control, communication and security systems. 2017. No 2. Pp. 113–164.

4. Ivanov V.G. Model of the technical basis of the special purpose control system in the unified information space on the basis of convergent infrastructure of the communication system. Monograph. SPb.: Politech-press, 2018. 214 p.
5. Lupes V., Velasco L. Architecture, technology and management of elastic optical networks. Luxemburg: Springer, 2016. 299 p.
6. Bijoy S.S., Eiji O. Elastic optical networks: fundamentals, design, control and management. New Delhi: South Asian University, 2020. 232 p.
7. Quan D. Truly open submarine cables with spectrum sharing in Asia-Pacific [Electronic resource] // *Infinera News & Insights*. 2024. May 7. URL: <https://www.infinera.com/blog/truly-open-subsea-cables-with-spectrum-sharing-in-the-asia-pacific-region/tag/submarine> (date of access: 09.07.2024).
8. What is spectrum sharing? [Electronic resource] // *Ciena Company News*. 2020. URL: <https://www.ciena.com/insights/what-is/What-Is-Spectrum-Sharing.html> (date of access: 09.07.2024).
9. Homa J. From wavelength lease to shared spectrum. [Electronic resource] // *News from Ribbon Communications Inc*. 2020. June 26. URL: <https://ribboncommunications.com/company/media-center/blog/alien-wavelengths-shared-spectrum> (date of access: 09.07.2024).
10. Van Y., Nguyen L., Hu C. Virtualization of network functions in elastic optical networks // *Journal of Lighting Technology*. 2023. Vol. 41. No 16. Pp. 5183–5192.
11. Chudnov A.M. Mathematical bases of modeling, analysis and optimization of systems / Monograph // St. Petersburg: BAC, 2021. 168 p.
12. Boyko A.P., Odoevsky S.M., Kuzin P.I. Formation of a special-purpose optical transport network on the basis of a dedicated spectral resource // *Defense Engineering Issues. Series 16. Technical means of counteraction to terrorism*. 2024. No 3–4 (191–192). Pp. 58–64.
13. Boyko A.P., Kuzin P.I., Kuzina E.I. Model of the light path in optical transport networks // *Defense Technology Issues. Series 16. Technical means of counteraction to terrorism*. 2024. No 3–4 (191–192). Pp. 29–36.
14. Boyko A.P., Konstantinova A.A., Kuzin P.I. et al. Mathematical model of optical transport networks for special-purpose communications based on the allocated spectral resource // *Actual problems of infotelecommunications in science and education: Collection of scientific articles of XIII International scientific and technical and scientific-methodical conference in 4 vol.*, St. Petersburg, February 27–28, 2024. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M.A. Bonch-Bruевич, 2024. Pp. 112–117.

УДК 355/359

doi: 10.53816/23061456_2025_1–2_61

**СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ
ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ СИЛАМ ПРОТИВНИКА
В ХОДЕ СОВЕРШЕНИЯ МАРША**

**A SYSTEMATIC APPROACH TO THE MATHEMATICAL MODELING
OF COUNTERING ENEMY FORCES DURING THE MARCH**

¹С.В. Михайлов, ²Я.С. Бударин

S.V. Mihailov, Ya.S. Budarin

¹Министерство обороны Российской Федерации (войсковая часть 59968),

²Российская академия государственной службы при Президенте РФ

В статье рассматривается возможность использования нейронных сетей для создания системного подхода к математическому моделированию противодействия силам противника во время марша. Описывается, как можно с помощью нейронных сетей моделировать вероятный исход боя в процессе передвижения.

Также в статье рассказывается о ключевых подсистемах, необходимых для математического моделирования особенностей боевых действий во время марша. Описываются возможные решения формализованных задач для подсистемы управления колонной, подсистемы основных средств поражения, подсистемы боевого обеспечения, подсистемы материально-технического обеспечения и подсистемы определения географических особенностей местности.

В завершение предлагается инструмент, который может помочь командирам обосновывать свои решения во время марша.

Ключевые слова: РВСН, ракетное соединение, ракетный полк, ДРГ, нейросеть, зеленые береты, ВС РФ.

The article considers the possibility of using neural networks to create a systematic approach to mathematical modeling of countering enemy forces during a march. It describes how neural networks can be used to simulate the likely outcome of a battle during movement.

The article also describes the key subsystems necessary for mathematical modeling of the features of combat operations during the march. Possible solutions of formalized tasks for the column control subsystem, the subsystem of basic weapons of destruction, the subsystem of combat support, the subsystem of logistics and the subsystem of determining geographical features of the area are described.

Finally, a tool is offered that can help commanders justify their decisions during the march.

Keywords: SMF, missile compound, missile regiment, SRT, neural network, green berets, Armed Forces of the Russian Federation.

Борьба с диверсионно-разведывательными группами (ДРГ) — одна из важнейших задач для Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ). Подразделения ВС РФ, совершая марши,

должны быть защищены от возможных атак со стороны диверсантов.

Сохранение колонны при совершении марша позволяет Сухопутным и Воздушно-десант-

ным войскам выполнять задачи на театре военных действий. Для Ракетных войск стратегического назначения (РВСН) это также важно, так как помогает сохранить стратегический паритет ядерного потенциала.

Поэтому необходимо разрабатывать эффективные меры для анализа возможных угроз, связанных с организацией засад вероятным противником, учитывая географические особенности местности.

Важно отметить, что техническое и количественное превосходство подразделений во время марша не всегда обеспечивает им явное преимущество над противником, который устроил засаду. Эффект внезапности позволяет противнику получить огневое преимущество [1], а детальное знание местности помогает ему выбрать пути отступления.

Проведенные исследования [2] показывают, что подразделения, которые отражают нападение во время марша, не всегда эффективны. Для блокирования и уничтожения противника может потребоваться привлечение дополнительных сил и средств.

Учитывая особую специфику РВСН, можно констатировать, что некоторые компоненты ракетного вооружения совершают марш в глубоком тылу. Это значительно минимизирует риски общевойсковых засад, но значительно повышают вероятность воздействия силами специальных операций вероятного противника [3]. Стоит отметить, что эти подразделения имеют высокий уровень боевой подготовки и способны выполнять задачи в отрыве от своих основных сил на удалении до 14000 км, они в совершенстве знакомы с вооружением противника, имеют возможность использовать в том числе малогабаритные ядерные мины [3]. В мирное время «Зеленые береты» занимаются подготовкой незаконных вооруженных формирований из лиц, имеющих антироссийское настроение, что способствует созданию антироссийского «анклава» внутри страны. Данная ситуация проецирует определенную специфику в противодействии личного состава, следующего в колонне на марше, «Зеленым беретам» и необходимость учитывать различные варианты развития событий.

Особенность применения РВСН в мирное время заключается в том, что маршруты боевого патрулирования хорошо известны, а личный сос-

тав знаком с особенностями местности и потенциальными угрозами на маршруте. Это позволяет обеспечить надежную защиту от физического воздействия по компонентам специального оружия.

Однако в военное время ситуация усложняется. Требуется более детальная разведка местности, так как личный состав может быть не знаком с вероятными районами засад. Это создает дополнительную угрозу уничтожения командного состава подразделений и отрыв личного состава от пунктов постоянной дислокации.

Боевые районы обычно находятся в границах местного или территориального гарнизона и отличаются своей особой скрытностью. Для выработки обоснованных решений при совершении марша и моделирования вероятного исхода боя предлагается использовать системный подход при математическом моделировании противодействия силам противника.

Принимая во внимания современные тренды совершенствования систем управления [4–8], для вычисления результатов противодействия силам противника в ходе совершения марша предлагается простая нейронная сеть, основанная на 5 входных нейронах, 4 скрытых нейронах и 1 одного выходного нейрона (рис. 1).

В качестве входных параметров в нейронной сети будут использоваться следующие формализованные данные:

- X_1 — подсистема управления колонной на марше;
- X_2 — подсистема основных средств поражения;
- X_3 — подсистема боевого обеспечения колонны на марше;

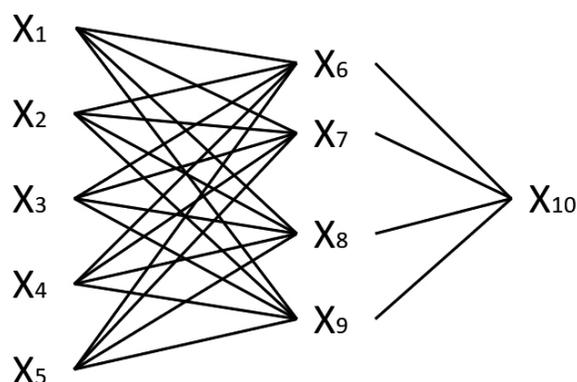


Рис. 1. Нейронная сеть моделирования вероятного исхода боя в ходе совершения марша

X_4 — подсистема средств материально-технического обеспечения колонны на марше;

X_5 — подсистема определения географических особенностей местности.

В качестве аналитической структуры в нейронной сети будут использоваться следующие формализованные данные:

X_6 — первый скрытый нейрон, проводящий анализ данных исходя из входных параметров и веса соответствующего параметра;

X_7 — второй скрытый нейрон, проводящий анализ данных исходя из входных параметров и веса соответствующего параметра;

X_8 — третий скрытый нейрон, проводящий анализ данных исходя из входных параметров и веса соответствующего параметра;

X_9 — четвертый скрытый нейрон, проводящий анализ данных исходя из входных параметров и веса соответствующего параметра.

$$S = \frac{0,4(14,5cd / 20 + 7,62eg / 45 + 5,45zi / 60 + 9kl / 8)}{6700a(c + e + z + k)}; \quad (2)$$

$$B = 0,8(R + M + I + RH + RB + O); \quad (3)$$

$$Mt = 0,8(Mt_0) \quad (4)$$

при ограничениях:

$$U \leq 0,8 [0; 0,8];$$

$$S \leq 1 [0; 1];$$

$$B \leq 0,8 [0; 0,8];$$

$$Mt \leq 0,8 [0; 0,8];$$

$$i = [1; 14] = Z;$$

$$i_0 = [1; 14] = Z;$$

$$c = [1; 8] = Z;$$

$$d = [500; 4000] = Z;$$

$$e = [1; 10] = Z;$$

$$g = [45; 20000] = Z;$$

$$z = [1; 40] = Z;$$

$$i = [60; 4800] = Z;$$

$$k = [1; 20] = Z;$$

$$l = [16; 320] = Z;$$

$$a = [3; 12];$$

$$R = [0; 0,2];$$

$$M = [0; 0,15];$$

$$I = [0; 0,1];$$

$$RH = [0; 0,15];$$

$$RB = [0; 0,2];$$

$$O = [0; 0,3];$$

$$Mt_0 = [0; 1];$$

В качестве результата в нейронной сети будут приниматься следующие формализованные данные:

X_{10} — выходной нейрон, дающий результат вероятного исхода боя в ходе совершения марша, при соответствующих исходных параметрах подсистем.

Чтобы определить исходные параметры «подсистемы управления колонной на марше», «подсистемы основных средств поражения», «подсистемы боевого обеспечения колонны на марше» и «подсистемы средств материально-технического обеспечения колонны на марше», авторы предлагают использовать следующие формализованные задачи.

Найти:

$$U = 0,8i \cdot \frac{S}{i_0}; \quad (1)$$

где U — подсистема управления колонной на марше;

S — подсистема основных средств поражения;

B — подсистема боевого обеспечения колонны на марше;

Mt — подсистема средств материально-технического обеспечения колонны на марше;

i — количество фактических средств связи;

i_0 — количество необходимых средств связи;

c — количество бронетехники;

d — количество боеприпасов на бронетехнике;

e — количество пулеметов;

g — количество боеприпасов на пулеметы;

z — количество автоматов;

i — количество боеприпасов на автоматы;

k — количество пистолетов;

l — количество боеприпасов на пистолеты;

a — количество нападающих;

R — вес разведки в боевом обеспечении;

M — вес маскировки в боевом обеспечении;

I — вес инженерного обеспечения в боевом обеспечении;

RH — вес радиационной, химической и биологической защиты в боевом обеспечении;

RB — вес радиоэлектронной борьбы в боевом обеспечении;

O — вес охранения в боевом обеспечении;
 Mt_0 — вес материально-технического обеспечения.

Исходные параметры для интеграции в систему координат нейронной сети будут переводиться в следующих зависимостях:

для U если $U \leq 0,4$, то $X_1 = 0$, если $U > 0,4$, то $X_1 = 1$;

для S если $S \leq 0,5$, то $X_2 = 0$, если $S > 0,5$, то $X_2 = 1$;

для B если $B \leq 0,4$, то $X_3 = 0$, если $B > 0,4$, то $X_3 = 1$;

для Mt если $Mt \leq 0,4$, то $X_4 = 0$, если $Mt > 0,4$, то $X_4 = 1$.

Для интеграции подсистемы определения географических особенностей местности предполагается использовать распознавание объектов и цветовых параметров карты с помощью нейронной сети (рис. 2).

Распознавание местности происходит на карте представленного масштаба, где маршрут движения поднят соответствующим цветом, заранее обозначенным для нейросети как исключительный. В дальнейшем происходит трассировка карты и вычисление зон с различными рисками нападения ДРГ и их обозначение на карте. В качестве основных параметров обозначения предлагается использовать следующие варианты:

1 — высокий риск нападения (коэффициент 0,15);

2 — умеренный риск нападения (коэффициент 0,3);

3 — сниженный риск нападения (коэффициент 0,5);

4 — минимальный риск нападения (коэффициент 0,8).

Обозначив участок местности до 5–7 условных единиц от маршрута движения, нейросеть проводит среднеарифметическое вычисление коэффициента полученного результата: если значение коэффициента меньше или равно 0,4, то $X_5 = 0$, если больше 0,4, то $X_5 = 1$. Под условной единицей в работе понимается чанк местности обозначенный нейронной сетью на карте. Таким образом, подсистема определяет географические особенности местности и предоставляет командиру сектора вероятных угроз нападения. При этом командир имеет возможность заблаговременно обозначить вероятного противника, и нейросеть учтет полученные данные в анализе карты.

Таким образом, в соответствии с предложенным вариантом формализованной постановки задачи (1)–(4) и подсистемы определения географических особенностей местности выработан системный подход при математическом моделировании противодействия силам



Рис. 2. Подсистема определения географических особенностей местности

противника в ходе совершения марша ракетными полками, проводящими вычисление вероятного исхода боя по входным параметрам подсистем. Данный подход основан на вычислительных возможностях нейронной сети по входным данным и позволяет анализировать участки местности, изображенные на карте, с целью обозначения вероятных угроз нападения для командира. Особенности нейросети позволяют проводить обучение по массиву данных боев в ходе совершения марша во время Второй мировой войны, Афганской войны, Чеченских войн и иных конфликтов и учений, представляющих практический интерес для обучения нейронной сети.

По мнению авторов, этот подход может улучшить существующую систему охраны и разведки ракетного полка. Также он позволит обучить нейросеть давать оптимальные рекомендации командирам по обеспечению безопасности колонны ракетного полка во время марша.

Программное обеспечение, основанное на этой математической модели, станет инструментом для принятия обоснованных решений командирами всех уровней в кратчайшие сроки и при любых условиях. Возможно, в будущем эту модель можно будет улучшить для решения практических задач различными видами и родами войск Вооруженных Сил Российской Федерации, включая задачи, связанные с противодействием беспилотным летательным аппаратам.

Список источников

1. Троценко К.А. Боевые действия в Сирии — развитие способов ведения общевойскового боя и операции или частный случай? // Военная мысль. 2020. № 11. С. 6–24.

2. Вдовинков И.В. Борьба с силами противника при совершении марша мотострелкового батальона // Актуальные исследования. 2020. № 22 (25). С. 75–78.

3. Пырский А.М., Ермаков С.А., Петренко А.В. Силы специальных операций вероятного противника: учеб. пособие. СПб.: Санкт-Петербургский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации, 2017. 72 с.

4. Буренок В.М. Искусственный интеллект в военном противостоянии будущего // Военная мысль. 2021. № 4. С. 106–112.

5. Иванов С.С. Методологические основы описания процессов общевойскового боя при имитационном моделировании // Военная мысль. 2020. № 3. С. 74–83.

6. Алексеев П.Н. Новая парадигма управления войсками (силами) // Международные отношения и мировая политика. 2021. № 5. С. 50–58.

7. Каргин В.Н. Роль военной стандартизации в создании автоматизированных систем военного назначения // Военная мысль. 2020. № 2. С. 70–80.

8. Сидняев Н.И. Сетецентрические управляющие системы и боевые операции // Военная мысль. 2021. № 12. С. 60–71.

References

1. Trotsenko K.A. Boevye deistviya v Sirii — razvitie sposobov vedeniya obshchevoiskovogo boya i operatsii ili chastnyi sluchai? // Voennaya mysl'. 2020. No 11. Pp. 6–24.

2. Vdovinkov I.V. Bor'ba s silami protivnika pri sovershenii marsha motostrelkovogo batal'ona // Aktual'nye issledovaniya. 2020. No 22 (25). Pp. 75–78.

3. Pyrskii A.M., Ermakov S.A., Petrenko A.V. Sily spetsial'nykh operatsii veroyatnogo protivnika: uchebnoe posobie. SPb.: Sankt-Peterburgskii voennyi institut voisk natsional'noi gvardii Rossiiskoi Federatsii, 2017. 72 p.

4. Burenok V.M. Iskusstvennyi intellekt v voennom protivostoyanii budushchego // Voennaya mysl'. 2021. No 4. Pp. 106–112.

5. Ivanov S.S. Metodologicheskie osnovy opisaniya protsessov obshchevoiskovogo boya pri imitatsionnom modelirovanii // Voennaya mysl'. 2020. No 3. Pp. 74–83.

6. Alekseev P.N. Novaya paradigma upravleniya voiskami (silami) // Mezhdunarodnye otnosheniya i mirovaya politika. 2021. No 5. Pp. 50–58.

7. Kargin V.N. Rol' voennoi standartizatsii v sozdanii avtomatizirovannykh sistem voennogo naznacheniya. 2020. No 2. Pp. 70–80.

8. Sidnyaev N.I. Setetsentricheskie upravlyayushchie sistemy i boevye operatsii // Voennaya mysl'. 2021. No 12. Pp. 60–71.

УДК 621.396

doi: 10.53816/23061456_2025_1-2_66

**ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ
С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НА КАНАЛ ПЕРЕДАЧИ
ДАННЫХ С OFDM МОДУЛЯЦИЕЙ**

**EVALUATION OF THE IMPACT OF UNINTENTIONAL PULSE INTERFERENCE
WITH LINEAR FREQUENCY MODULATION ON A DATA TRANSMISSION
CHANNEL WITH OFDM MODULATION**

Канд. техн. наук П.А. Маслаков, канд. техн. наук Д.И. Бучинский, Ю.Н. Копалов

Ph.D. P.A. Maslakov, Ph.D. D.I. Buchinskiy, Y.N. Kopalov

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

В статье приведены результаты исследования помехоустойчивости приемника OFDM-сигнала на фоне воздействия непреднамеренных импульсных помех с линейной частотной модуляцией. Исследования проводились с помощью аналитико-имитационного моделирования. В ходе исследования учитывалась кадровая структура принимаемого сигнала, отличия в помехоустойчивости приемника во время приема различных элементов кадра. В качестве показателя помехоустойчивости использовалась вероятность кадровой ошибки. Исследования проводились для различных отношений средней мощности сигнала к средней мощности помехи, различных длительностей импульсов непреднамеренной помехи и различной скорости изменения частоты импульсов непреднамеренной помехи. Показано, что на помехоустойчивость приемника OFDM-сигналов оказывают влияние не только отношения мощностей сигнала и непреднамеренной помехи, длительность импульсов непреднамеренной помехи, но и скорость изменения частоты линейно-частотно-модулированного сигнала непреднамеренной помехи.

Ключевые слова: вероятность кадровой ошибки, OFDM-модуляция, помехоустойчивость, непреднамеренные импульсные помехи, линейная частотная модуляция.

The article presents the results of a study of the noise immunity of an OFDM-signal receiver against the background of unintended pulse interference with linear frequency modulation. The research was carried out using analytical and simulation modeling. The study took into account the frame structure of the received signal, differences in the receiver's noise immunity during reception of various frame elements. The probability of a personnel error was used as an indicator of noise immunity. Studies have been conducted for different ratios of the average signal power to the average interference power, different pulse durations of unintended interference, and different rates of change in the frequency of unintended interference pulses. It is shown that the noise immunity of the receiver of OFDM-signals is influenced not only by the ratio of signal power and unintended interference, the pulse duration of unintended interference, but also by the rate of frequency change of a linearly frequency modulated signal of unintended interference.

Keywords: probability of frame error, OFDM-modulation, noise immunity, unintended pulse interference, linear frequency modulation.

Бурное развитие информационных технологий и мобильных устройств приводит к потребности в передаче больших объемов информации по радиоканалам. Необходимость обеспечения большого числа абонентов высокоскоростными каналами передачи данных привела к использованию современными системами связи высокочастотных диапазонов электромагнитного спектра и широкополосных радиоканалов. Расширение полосы радиоканала приводит к сокращению длительности передаваемых символов. Многолучевое распространение сигнала, обусловленное городской застройкой, при условии сокращения длительности символа приводит к появлению межсимвольной интерференции и замираниям сигнала [1–4]. Применение широко распространенных видов модуляции, таких как M-PSK, APSK, M-QAM, M-FSK для организации широкополосных радиоканалов в условиях городской застройки потребует использования для борьбы с замираниями кодов коррекции ошибок с высокой избыточностью, что приведет к снижению скорости передачи информации.

Поэтому в современных системах связи широкое применение получает мультиплексирование с ортогональным частотным разделением OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) — вид цифровой модуляции, использующий большое количество поднесущих с ортогональными сигналами. Модуляция OFDM применяется в таких стандартах связи, как IEEE 802.16 и низкоорбитальной многоспутниковой системе связи Starlink. Ввиду того, что каждый ортогональный сигнал является относительно узкополосным, длительность символов в таком сигнале будет достаточно большой для того чтобы избежать появления межсимвольной интерференции и замираний сигнала [5, 6]. Другим важным достоинством OFDM-модуляции является ее устойчивость к узкополосным помехам, что также актуально в условиях сложной городской электромагнитной обстановки [7]. В настоящее время подробно исследован вопрос помехоустойчивости приемников OFDM-сигналов при воздействии широкополосных шумовых и узкополосных помех [8–10].

Современная городская среда насыщена различными источниками непреднамеренных помех. Одним из таких источников могут являться беспилотные транспортные средства,

получающие бурное развитие на фоне успехов применения искусственного интеллекта в различных сферах человеческой деятельности. В качестве одного из источников информации об окружающей обстановке беспилотные транспортные средства используют данные, получаемые от радаров, которые могут являться источником непреднамеренных помех. В [11] были проведены исследования помехоустойчивости приемников сигналов с OFDM-модуляцией при воздействии импульсных сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Однако в исследовании не учитывалось, что сигналы, применяемые в современных системах связи, имеют сложную кадровую структуру и включают элементы с различной обработкой. Кроме того, при воздействии непреднамеренных импульсных помех с ЛЧМ не исследован вопрос влияния скорости перестройки частоты на помехоустойчивость приемников сигналов с OFDM-модуляцией. Поэтому исследование помехоустойчивости приемников OFDM-сигналов на фоне импульсных сигналов с линейной частотной модуляцией с учетом их кадровой структуры является актуальным.

Частотно-временная структура сигнала системы связи, использующей OFDM-модуляцию, на примере низкоорбитальной многоспутниковой системы связи Starlink, представлена на рис. 1. Частотный ресурс линии космический аппарат — абонентский терминал поделен на 8 отдельных каналов. Ширина полосы отдельного канала ΔF_c составляет 240 МГц. Сигнал, передаваемый во временной области, в каждом канале представляет собой последовательность кадров. Каждый кадр начинается с первичной последовательности синхронизации (ППС). Первичная последовательность синхронизации представляет собой BPSK (Binary Phase Shift Keying) сигнал, модулированный повторяющейся восемь раз псевдослучайной последовательностью. После ППС передается 301 OFDM-символ. При формировании OFDM-символов используются 1024 поднесущих разнесенных с интервалом Δf в 0,23 МГц. Первый и последний символы называются — вторичная последовательность синхронизации (ВПС) и последовательность синхронизации кода (ПСК) соответственно. Эти OFDM-символы содержат служебную информацию, необходимую для корректного приема.

В интервале между ВПС и ПСК передаются OFDM-символы, содержащие информационную часть кадра. Завершается передача кадра межкадровым защитным интервалом, во время которого ничего не излучается. Первичная последовательность синхронизации, ВПС, ПСК, информационные OFDM-символы и межкадровый защитный интервал имеют одинаковую длительность T_c , определяемую числом поднесущих и расстоянием между ними.

Частотно-временная структура сигналов, описываемых семейством стандартов IEEE 802.16, схожа с описанной выше. За исключением того, что вся служебная информация передается в первом OFDM-символе после ППС. Алгоритм обработки подобных сигналов предполагает обнаружение кадра за счет корреляционного приема ППС, прием и демодуляцию специальных OFDM-символов, содержащих служебную информацию. В специальных символах на поднесущих всегда используется BPSK модуляция и постоянная схема кодирования. Служебная информация содержит сведения об используемых видах модуляции на поднесущих в остальных OFDM-символах и схеме помехоустойчивого кодирования. После успешного приема специальных символов с использованием полученной служебной ин-

формации осуществляется прием и демодуляция остальных OFDM-символов, а также декодирование информационной части кадра.

Исходя из этого можно утверждать, что для корректного приема кадра необходимо, чтобы все три операции были выполнены успешно. Тогда, пренебрегая крайевыми эффектами и вероятностью ошибки во время приема какой-либо части кадра в отсутствие непреднамеренной помехи, вероятность кадровой ошибки P_{fer} можно записать:

$$P_{fer} = 1 - \prod_{i=1}^3 (1 - P_i), \quad (1)$$

где P_1 — вероятность ошибки во время ППС;

P_2 — вероятность ошибки во время приема ВПС или ПСК;

P_3 — вероятность ошибки во время приема информационной части кадра.

Вероятности ошибки во время приема той или иной части кадра могут быть записаны:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{ferппс} P_{ппс}; P_2 = P_{fersи} P_{си}; \\ P_3 &= P_{ferич} P_{ич}, \end{aligned} \quad (2)$$

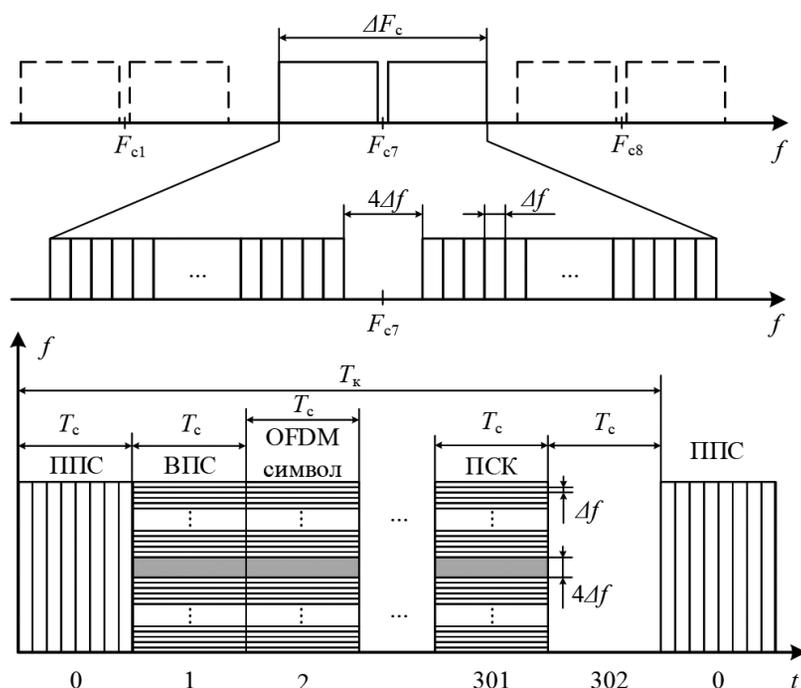


Рис. 1. Частотно-временная структура сигнала многоспутниковой низкоорбитальной системы связи Starlink

где P_{fermnc} — вероятность ошибки во время ППС, при условии воздействия помехи во время приема ППС;

P_{nnc} — вероятность воздействия помехи во время приема ППС;

P_{fersi} — вероятность ошибки во время приема ВПС или ПСК, при условии воздействия помехи во время приема ВПС или ПСК;

$P_{си}$ — вероятность воздействия помехи во время приема служебной информации, то есть во время приема ВПС или ПСК;

$P_{fermч}$ — вероятность ошибки во время приема информационной части кадра, при условии воздействия помехи во время приема информационной части кадра;

$P_{ич}$ — вероятность воздействия помехи во время приема информационной части кадра.

Вероятности воздействия импульса помехи во время приема различных частей кадра:

$$P_{fermч} = \sum_{i=0}^{\min(U_n, N_n - N_{ni})} \left(C_{N_n - N_{ni}}^i P_{bern}^i (1 - P_{bern})^{N_n - N_{ni} - i} \sum_{j=0}^{\min(U_n - i, N_{ni})} \left(C_{N_{ni}}^j P_{beri}^j (1 - P_{beri})^{N_{ni} - j} \right) \right), \quad (5)$$

где N_n — число двоичных символов, во время приема которых не было воздействия непреднамеренной помехи;

N_{ni} — число информационных двоичных символов, во время приема которых воздействовала непреднамеренная помеха;

U_n — исправляющая способность помехоустойчивого кода;

$$P_{fermч} = \sum_{i=0}^{\min(U_3, N_3 - N_{3i})} \left(C_{N_3 - N_{3i}}^i P_{bern}^i (1 - P_{bern})^{N_3 - N_{3i} - i} \sum_{j=0}^{\min(U_3 - i, N_{3i})} \left(C_{N_{3i}}^j P_{beri}^j (1 - P_{beri})^{N_{3i} - j} \right) \right), \quad (6)$$

где N_3 — число служебных двоичных символов, во время которых не было воздействия помехи;

N_{3i} — число служебных двоичных символов, во время приема которых воздействовала непреднамеренная помеха;

U_3 — исправляющая способность помехоустойчивого кода.

Вероятность ошибочного приема двоичного символа при воздействии шума можно рассчитать по формуле:

$$P_{bern} = \Phi \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \right), \quad (7)$$

$$P_{nnc} = P_k \frac{T_c}{T_k}; P_{си} = P_k \frac{2T_c}{T_k}; P_{ич} = P_k \frac{N_{исим} T_c}{T_k}, \quad (3)$$

где $N_{исим}$ — количество информационных OFDM-символов;

P_k — вероятность воздействия помехи во время приема кадра.

При условии, что период импульсных непреднамеренных помех $T_{п}$ больше длительности кадра, вероятность P_k :

$$P_k = \frac{T_k}{T_{п}}. \quad (4)$$

Вероятность ошибочного приема информационной части кадра при условии воздействия помехи во время приема информационных OFDM-символов [12]:

P_{bern} — вероятность битовой ошибки при приеме информационной части кадра на фоне шума;

P_{beri} — вероятность битовой ошибки при приеме информационной части кадра на фоне помехи.

Так как служебная информация передается так же как и информационная часть кадра, то вероятность ошибки во время приема служебной информации при условии воздействия помехи:

где E_b — энергия двоичного символа.

Вероятность ошибочного приема двоичного символа при воздействии шума и непреднамеренной помехи вычислялась с помощью имитационного моделирования. Структура имитационной модели представлена на рис. 2. Программная реализация такой модели разработана в среде MATLAB. Из случайной последовательности двоичных символов имитационная модель формирует кадры, структура которых описана выше. Сигнал, формируемый моделью передатчика $s(t)$, представляет собой последовательность таких кадров. Затем к сигналу $s(t)$ адди-

тивно добавляется шум $n(t)$ и импульсы непреднамеренной помехи $i(t)$. Формирование импульсов непреднамеренной помехи производится с различными длительностями импульсов помехи и различной скоростью изменения частоты. Длительность импульсов непреднамеренной помехи задается значением скважности помехи Q . Период следования помеховых импульсов совпадает с длительностью кадра. Скорость перестройки частоты задается периодом пилообразного модулирующего напряжения $\tau_{лчм}$. Полученная аддитивная смесь поступает на вход модели приемника. После обработки аддитивной смеси сигнала, шума и непреднамеренной помехи, полученная последовательность принятых двоичных символов поступает в блок вычисления вероятности ошибки на бит, где происходит сравнение принятой последовательности и последовательности, использованной для формирования сигнала. При формировании помехи, воздействующей во время приема ППС, происходит набор статистики для вычисления вероятности кадровой ошибки при условии воздействия помехи во время приема ППС. На выходе модели формируется зависимость вероятности битовой ошибки при приеме информационной части кадра на фоне помехи и шума, и зависимость вероятности кадровой ошибки при условии воздействия помехи во время приема ППС от отношения средней мощности сигнала P_c к средней мощности помехи P_n , и длительности импульса помехи Q и скорости изменения частоты $\tau_{лчм}$.

При моделировании использовались следующие исходные данные:

- число поднесущих — 1024;

- интервал дискретизации — $17 \cdot 10^{-9}$;
- несущая частота — 250 МГц;
- отношение сигнал / шум — 20 дБ;
- число передаваемых двоичных символов — 3051520 (соответствует 10 кадрам в канале передачи данных низкоорбитальной многоспутниковой системе связи Starlink);
- вид модуляции поднесущих — BPSK, в OFDM-символе циклический префикс составляет 32 отсчета.

Первичная последовательность синхронизации представляет собой 8 раз повторяемую M -последовательность. В модели используется M -последовательность длиной 127 отсчетов с порождающим полиномом 8 степени $\{100011101\}$, дополненная нулем. Длительность импульсов непреднамеренной помехи выбиралась равной трети или четверти длительности кадра, то есть $Q = 3$ и $Q = 4$.

Полученная в результате имитационного моделирования зависимость вероятности ошибочного приема ППС от отношения сигнал / помеха и от отношения длительности кадра к скорости перестройки частоты непреднамеренной помехи представлена на рис. 3.

Полученная в результате имитационного моделирования зависимость вероятности битовой ошибки при приеме информационной части кадра на фоне помехи и шума от отношения средней мощности сигнала к средней мощности помехи и от отношения длительности кадра к скорости перестройки частоты непреднамеренной помехи $P_{beri}(P_c/P_n, \tau_{лчм})$ для различных значений длительности помехи представлена на рис. 4.

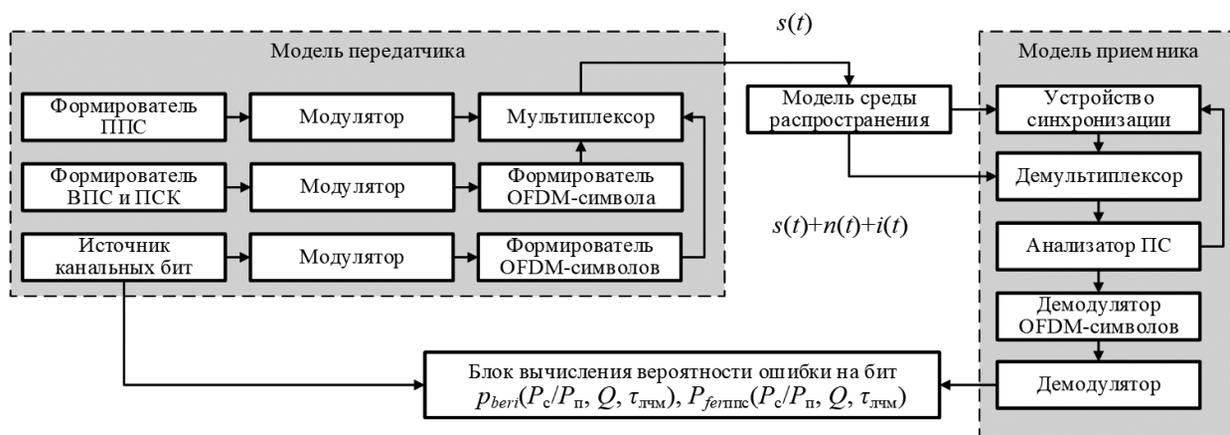


Рис. 2. Структура имитационной модели

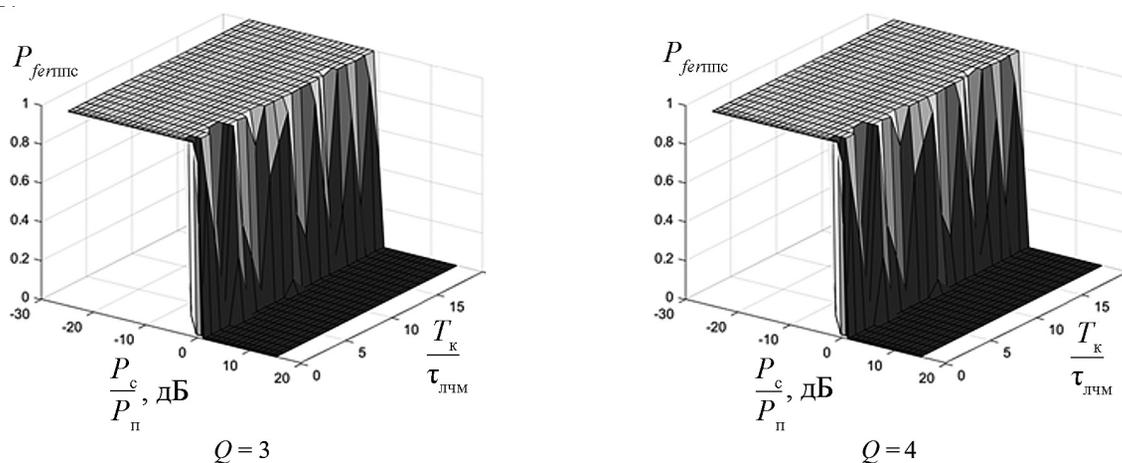


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибочного приема ППС от отношения сигнал / помеха и от отношения длительности кадра к скорости перестройки частоты непреднамеренной помехи

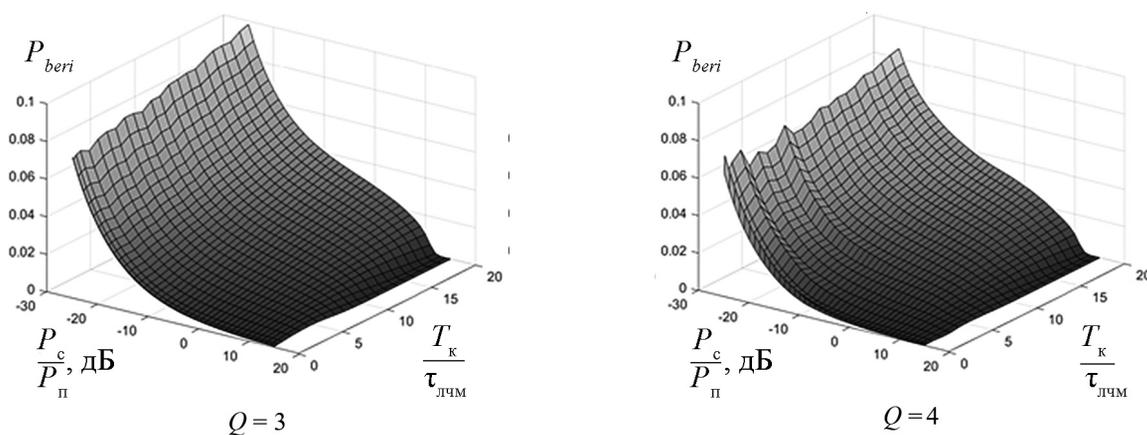


Рис. 4. Зависимость вероятности битовой ошибки при приеме информационной части кадра на фоне помехи и шума от отношения средней мощности сигнала к средней мощности помехи и от отношения длительности кадра к скорости перестройки частоты непреднамеренной помехи для различных значений длительности помехи

Из полученной в результате имитационного моделирования зависимости вероятности битовой ошибки при приеме информационной части кадра на фоне помехи и шума, используя формулы (5)–(7), были получены зависимости вероятности кадровой ошибки при условии воздействия помехи во время приема ВПС или ПСК и вероятности кадровой ошибки при условии воздействия помехи во время приема информационных OFDM-символов. Зависимости представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

Используя формулы (1)–(4) и полученные зависимости, были рассчитаны зависимости вероятности кадровой ошибки от отношения средней

мощности сигнала к средней мощности помехи и отношения длительности кадра к скорости перестройки частоты непреднамеренной помехи для различных значений длительности помехи. Полученные зависимости представлены на рис. 7.

По результатам проведенного имитационного моделирования и аналитических расчетов можно сделать следующие выводы:

– скорость изменения частоты импульса ЛЧМ практически не влияет на вероятность ошибки во время приема ППС, так как прием ППС осуществляется корреляционным приемником и на вероятность главное влияние оказывает энергетика помехи;

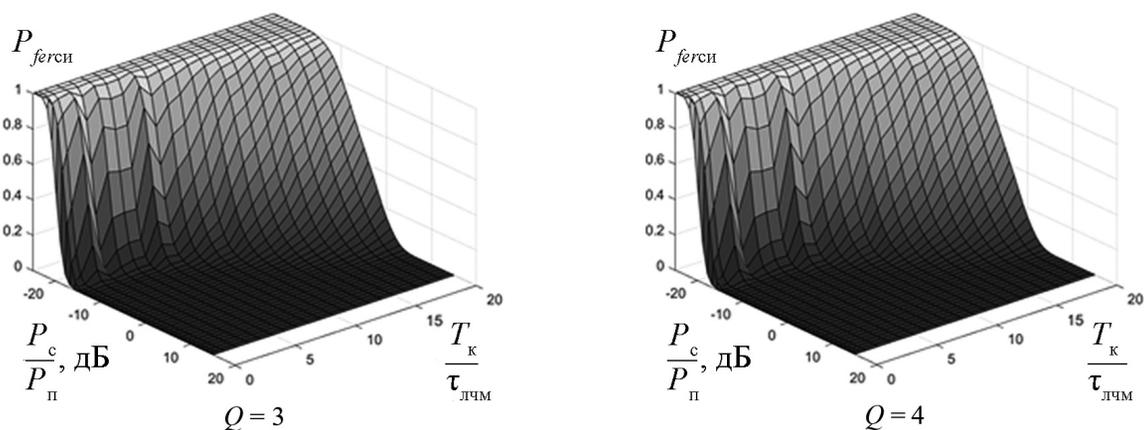


Рис. 5. Зависимости вероятности кадровой ошибки при условии воздействия помехи во время приема служебной информации от отношения сигнал / помеха и от отношения длительности кадра к скорости перестройки частоты непреднамеренной помехи для различных значений длительности помехи

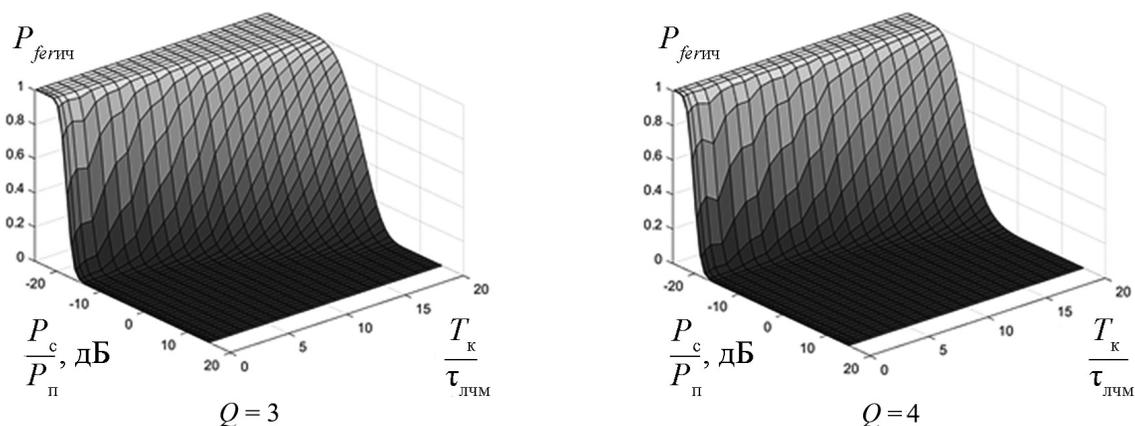


Рис. 6. Зависимости вероятности кадровой ошибки при условии воздействия помехи во время приема информационных OFDM символов от отношения сигнал / помеха и от отношения длительности кадра к скорости перестройки частоты непреднамеренной помехи для различных значений длительности помехи

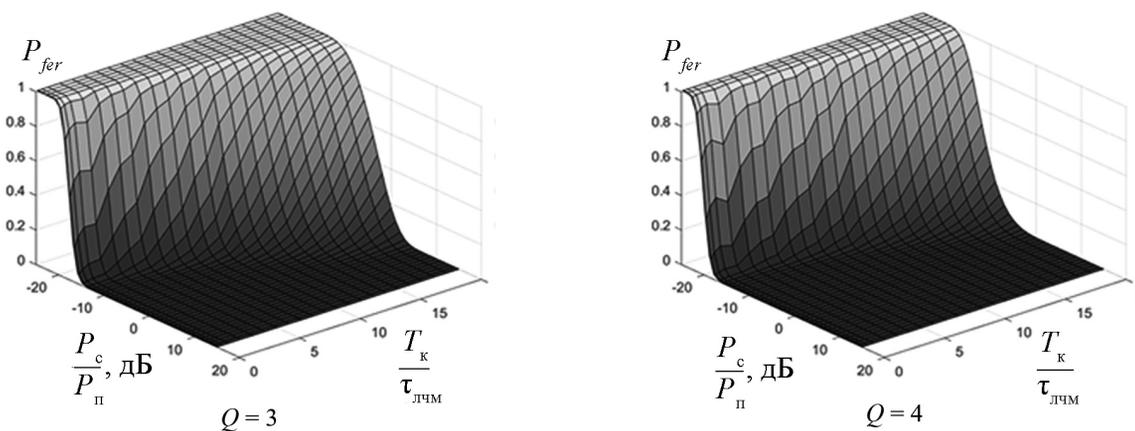


Рис. 7. Зависимости вероятности кадровой ошибки от отношения сигнал / помеха и от отношения длительности кадра к скорости перестройки частоты непреднамеренной помехи при различных значениях длительности помехи

– на вероятность битовой ошибки при приеме OFDM-символов оказывает влияние не только длительность импульсов непреднамеренной помехи, то есть концентрация энергии помехи во временной области, но и скорость перестройки частоты ЛЧМ сигнала;

– влияние скорости перестройки частоты ЛЧМ сигнала в импульсе непреднамеренной помехи на вероятность искажения передаваемых OFDM-символов приводит к зависимости вероятности кадровой ошибки при условии воздействия непреднамеренной помехи во время приема как служебной информации так и информационной части кадра;

– для непреднамеренных импульсных помех, длительность которых составляет от четверти до трети принимаемого кадра, помехоустойчивость приемника в основном определяется помехоустойчивостью информационной части кадра, помехоустойчивость приема информационных OFDM-символов в свою очередь существенно зависит от скорости изменения частоты ЛЧМ импульса непреднамеренной помехи.

Таким образом, полученные зависимости показывают, что на помехоустойчивость приемника OFDM-сигнала оказывает влияние не только отношение средних мощностей сигнала и помехи, длительность импульса непреднамеренной помехи, но и скорость изменения частоты внутри ЛЧМ импульса непреднамеренной помехи. Из результатов моделирования и аналитических расчетов следует, что при низких отношениях сигнал / помеха, качество приема сигнала с OFDM-модуляцией может ухудшиться до неприемлемого при возрастании скорости изменения частоты ЛЧМ помеховых импульсов.

Список источников

1. Кондрашов Ю.В., Бирюков М.А., Сазонов В.В., Ротенбергер А.А. Влияние корреляционных функций широкополосных сигналов на помехоустойчивость их приема в многолучевых каналах связи // *Электросвязь*. 2022. № 3. С. 10–15.

2. Anurag Pandey, Sandeep Sharma. BER Performance of OFDM-System in AWGN and Rayleigh Fading Channel // *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2014. Vol. 13, No 3. Pp. 126–128.

3. R. Martinek et al. Modelling of wireless fading channels with RF impairments using virtual instruments, 2016 IEEE 17th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), Clearwater, FL, USA, 2016. Pp. 1–6.

4. Паршуткин А.В., Галандзовский А.В., Левин Д.В. и др. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных систем и комплексов: учеб. пособие. СПб.: Типография ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. 148 с.

5. Волчков В.П., Ермолаев Д.А., Кирсанов В.А. Исследование помехоустойчивости OFDM-системы при нарушении синхронизации в разных моделях многолучевого канала // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2018. Т. 18. № 4. С. 1018–1024.

6. J. Jose and A.K. Kuriakose. Pilot Assisted Channel Assessment for MIMO-OFDM over Dispersive Fading Channels, 2020 International Conference on Futuristic Technologies in Control Systems & Renewable Energy (ICFCR), Malappuram, India, 2020. Pp. 1–5.

7. Вознюк В.В., Копалов Ю.Н. Исследование помехоустойчивости приема OFDM-сигналов в условиях непреднамеренных узкополосных шумовых помех // *Труды Московского авиационного института*. 2023. № 130. 23 с.

8. Карасева Т.С. Проблемы помехоустойчивости в OFDM-системах // *Перспективы развития информационных технологий*. 2015. № 24. С. 85–89.

9. Ложкин К.Ю., Миронов В.А., Прожеторко С.С. Помехоустойчивость приема OFDM-сигнала с фазовой манипуляцией поднесущих на фоне импульсной полигармонической помехи // *Радиотехника*. 2018. № 11. С. 58–63.

10. Y. Sun, J. Kang, W. Sui, S. Zhang et al. Semi-Blind Multi-cell Interference Detection and Cancellation in 5G Uplink OFDM-Systems, 2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC), Dubrovnik, Croatia, 2022. Pp. 167–171.

11. Зайцев С.А., Копалов Ю.Н. Исследование помехоустойчивости канала спутниковой связи с OFDM в условиях непреднамеренных импульсных помех с линейной частотной модуляцией // *Вопросы оборонной техники*. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 11–12 (185–186). С. 40–45.

12. Паршуткин А.В., Бучинский Д.И., Копалов Ю.Н. Модель функционирования канала спутниковой связи в условиях эпизодической синхронизации с потоками импульсных помех // Информатика и автоматизация. 2024. Т. 23, № 1. С. 194–225.

References

1. Kondrashov Yu.V., Biryukov M.A., Sazonov V.V., Rotenberger A.A. The influence of correlation functions of broadband signals on the noise immunity of their reception in multipath communication channels // Telecommunications. 2022. No 3. Pp. 10–15.

2. Anurag Pandey, Sandeep Sharma. BER Performance of OFDM-System in AWGN and Rayleigh Fading Channel // International Journal of Engineering Trends and Technology. 2014. Vol. 13. No 3. Pp. 126–128.

3. Martinek R. et al. Modelling of wireless fading channels with RF impairments using virtual instruments, 2016 IEEE 17th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), Clearwater, FL, USA, 2016. Pp. 1–6.

4. Parshutkin A.V., Galandzovsky A.V., Levin D.V. et al. Electromagnetic compatibility of radio-electronic systems and complexes textbook. SPb: VKA im. A.F. Mozhayskogo, 2016. 148 p.

5. Volchkov V.P., Ermolaev D.A., Kirsanov V.A. Investigation of the noise immunity of an OFDM-system in case of synchronization failure in different models of a multipath channel // Fundamental problems of radioelectronic instrumentation. 2018. Vol. 18. No 4. Pp. 1018–1024.

6. Jose J. and Kuriakose A.K. Pilot Assisted Channel Assessment for MIMO-OFDM over Dis-

persive Fading Channels, 2020 International Conference on Futuristic Technologies in Control Systems & Renewable Energy (ICFCR), Malappuram, India, 2020. Pp. 1–5.

7. Voznyuk V.V., Kopalov Yu.N. Investigation of the noise immunity of receiving OFDM-signals in conditions of unintended narrowband noise interference // Proceedings of MAI. 2023. No 130. 28 p.

8. Karaseva T.S. Problems of noise immunity in OFDM-systems // Prospects for the development of information technology. 2015. No 24. Pp. 85–89.

9. Lozhkin K.Yu., Mironov V.A., Prozheterko S.S. Noise immunity of receiving OFDM-signal with phase manipulation of subcarriers against the background of pulsed polyharmonic interference // Radio Engineering. 2018. No 11. Pp. 58–63.

10. Sun Y., Kang J., Sui W., Zhang S. et al. Semi-Blind Multi-cell Interference Detection and Cancellation in 5G Uplink OFDM-Systems, 2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC), Dubrovnik, Croatia, 2022. Pp. 167–171.

11. Zaitsev S.A., Kopalov Yu.N. Investigation of the noise immunity of a satellite communication channel with OFDM in the conditions of unintended pulse interference with linear frequency modulation // Questions of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 11–12 (185–186). Pp. 40–45.

12. Parshutkin A.V., Buchinsky D.I., Kopalov Yu.N. The model of functioning of a satellite communication channel in conditions of episodic synchronization with streams of pulse interference // Informatics and Automation. 2024. Vol. 23, No 1. Pp. 194–225.

УДК 623.4

doi: 10.53816/23061456_2025_1-2_75

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ МОБИЛЬНОГО
КОМПЛЕКСА ЛОКАЛИЗАЦИИ ВЗРЫВА НА БАЗЕ УСТРОЙСТВ
ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ВЗРЫВА КОНТЕЙНЕРНОГО ТИПА**

**STUDY OF THE POSSIBILITY OF CREATING A MOBILE EXPLOSION
LOCALIZATION COMPLEX BASED ON CONTAINER-TYPE EXPLOSION
PROTECTION DEVICES**

*Канд. техн. наук И.В. Гук¹, канд. техн. наук А.И. Спивак¹,
канд. техн. наук А.Н. Сауткин², С.Н. Васильева¹*

Ph.D. I.V. Guk, Ph.D. A.I. Spivak, Ph.D. A.N. Sautkin, S.N. Vasileva

¹НПО Спецматериалов, ²ЛМЗ им. К. Либкнехта

Рассмотрен вопрос создания мобильного комплекса локализации взрыва на базе штатного устройства для защиты от взрыва «Фонтан-1» модели 20К с использованием транспортировочной тележки. На основании экспериментальных исследований показано, что мобильный комплекс для локализации взрыва на основе штатного устройства для защиты «Фонтан-1» модели 20К, размещенного на специальной транспортировочной тележке, обеспечивает эффективное снижение уровня избыточного давления во фронте воздушной ударной волны на нормированном расстоянии для штатного устройства для защиты «Фонтан-1» модели 20К и может быть использован специалистами-взрывотехниками для решения задач по изоляции взрывоопасных предметов с последующим их уничтожением при очистке местности и гуманитарном разминировании.

Ключевые слова: устройство для защиты от взрыва, мобильный комплекс локализации взрыва, воздушная ударная волна, избыточное давление во фронте воздушной ударной волны.

The issue of creating a mobile explosion localization complex based on the standard explosion protection device «Fontan-1» model 20K using a transport trolley is considered. Based on experimental studies, it is shown that the mobile explosion localization complex based on the standard protection device «Fontan-1» model 20K, placed on a special transport trolley, provides an effective reduction in the level of excess pressure in the front of an air shock wave at a standard distance for the standard protection device «Fontan-1» model 20K and can be used by explosive experts to solve problems of isolating explosive objects with their subsequent destruction during terrain clearance and humanitarian demining.

Keywords: explosion protection device, mobile explosion localization complex, air shock wave, excess pressure in the front of an air shock wave.

В современных условиях проведения специальной военной операции, наличия региональных военных конфликтов, совершения противо-

правных актов террористической направленности с применением взрывоопасных предметов (ВОП) особую актуальность приобретает вопрос

очистки местности от ВОП [1] подготовленными специалистами [2], в том числе при проведении гуманитарного разминирования, с использованием специализированной техники [3]. В этих условиях широкое применение получили устройства для защиты от взрыва (УЗВ), предназначенные для решения задач по изоляции ВОП с последующим их уничтожением [4].

Одним из наиболее эффективных отечественных мобильных УЗВ являются изделия «Фонтан», разработки и производства АО «НПО Спецматериалов», которые подтвердили свои высокие защитные свойства при локализации оболочечных [5] и безоболочечных [6] зарядов взрывчатого вещества (ВВ), а также усиленных зарядов ВВ [7], в том числе под водой [8, 9] и направленного действия [10].

УЗВ «Фонтан» снижают до минимума человеческие жертвы и разрушения за счет эффективного подавления фугасного, осколочно-термического и термобарического действия взрывов размещенных в них ВОП за счет уникальных амплитудно-частотных и релаксационных характеристик специального многофазного диспергента, являющегося основной рабочей средой изделия [11, 12].

В целях удобства использования специалистами-взрывотехниками УЗВ контейнерного

типа, масса которых может составлять 80 кг и более, возникает необходимость разработки мобильного комплекса локализации взрыва. Принципиальным отличием мобильного комплекса от штатного УЗВ контейнерного типа является наличие транспортировочной тележки для перемещения (перевозки) УЗВ на местности.

Мобильный комплекс локализации взрыва представляет собой штатное устройство для защиты от взрыва «Фонтан-1» модели 20К, размещенное на транспортировочной тележке. Вид мобильного комплекса локализации взрыва представлен на рис. 1.

Нормативные характеристики УЗВ «Фонтан-1» модели 20К представлены в табл. 1.

Транспортировочная тележка представляет собой сварную конструкцию, на которой размещены четыре платформы с колесами, узел крепления съемной ручки, а также материал заполнения каркаса тележки, не образующий при взрыве вторичные поражающие элементы. Фиксация ручки в узле крепления осуществляется за счет подпружиненной защелки. Колеса тележки имеют резиновый обод, независимые оси вращения и способны поворачиваться на 360° относительно вертикальной оси опоры. Два колеса оборудованы тормозными системами. Вид транспортировочной тележки представлен на рис. 2.



Рис. 1. Вид мобильного комплекса локализации взрыва на основе УЗВ контейнерного типа «Фонтан-1» модели 20К с различным положением транспортной ручки тележки: а — при применении по назначению; б — в положении, перпендикулярном земле; в — в положении, параллельном земле

Таблица 1

Нормативные характеристики УЗВ модели «Фонтан-1» 20К

Модель изделия	Наружные габаритные размеры, мм	Размеры внутренней полости, мм	Внутренний объем не более, дм ³	Масса не более, кг	Нормативная масса локализуемого заряда ТНТ, кг
20К	780×780×630	520×520×340	125	80	2,0

Испытания проводились методом сравнительной оценки избыточного давления во фронте воздушной ударной волны (ВУВ), полученного при открытом подрыве заряда тринитротолуола (ТНТ) массой 2,0 кг и аналогичных зарядов ТНТ, размещенных в штатном УЗВ «Фонтан-1» модели 20К и мобильном комплексе для локализации взрыва на основе УЗВ «Фонтан-1» модели 20К.

Основным параметром, характеризующим эффективность мобильного комплекса, являлось расстояние, на котором величина избыточного давления во фронте ВУВ снижается до уровня 50 кПа — порога баротравмы. Кроме этого, оценивалась целостность конструкции транспортировочной тележки после подрыва.

Подрыв зарядов ТНТ массой 2,0 кг во всех случаях осуществлялся на плите из стали, вкопанной в грунт под нулевой уровень, с использованием электродетонаторов. При этом при подрыве заряда ТНТ в мобильном комплексе колеса транспортировочной тележки стопорились, а

съемная ручка извлекалась из узла крепления к тележке.

При проведении испытаний осуществлялась регистрация избыточного давления во фронте ВУВ с использованием пьезоэлектрических датчиков давления ПД-7-1,5М и цифрового многоканального осциллографа на базе персонального компьютера и платы сбора информации L-783 [13]. Схема размещения датчиков представлена на рис. 3. Расстояния до датчиков давления составляли 2,0...4,5 м.

Вид заряда ТНТ массой 2,0 кг и мишенной обстановки перед открытым подрывом представлен на рис. 4, кинограмма открытого подрыва заряда ТНТ массой 2,0 кг — на рис. 5.

Вид мишенной обстановки перед проведением подрыва заряда ТНТ массой 2,0 кг с использованием штатного УЗВ «Фонтан-1» модели 20К представлен на рис. 6, после проведения испытаний — на рис. 7, а кинограмма подрыва — на рис. 8.



Рис. 2. Вид транспортировочной тележки:
а — общий вид; б — вид со снятой панелью заполнения каркаса; в — вид тележки снизу

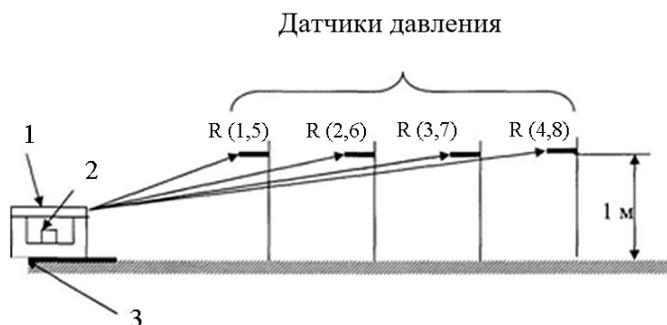


Рис. 3. Схема расположения (вид сбоку) заряда, УЗВ «Фонтан-1» модели 20К и датчиков давления:
1 — УЗВ «Фонтан-1» модели 20К; 2 — заряд ТНТ; 3 — плита



а



б

Рис. 4. Вид заряда ТНТ массой 2,0 кг (а) и мишенной обстановки (б) перед открытым подрывом



0,00 с



0,12 с



0,16 с



0,20 с



0,52 с



2,84 с

Рис. 5. Кинограмма открытого подрыва заряда ТНТ массой 2,0 кг



а



б



в

Рис. 6. Вид мишенной обстановки перед проведением подрыва заряда ТНТ массой 2,0 кг с использованием штатного УЗВ «Фонтан-1» модели 20К: а — общий вид мишенной обстановки; б, в — вид размещения заряда ТНТ в УЗВ «Фонтан-1» модели 20К



Рис. 7. Вид мишенной обстановки после проведения подрыва заряда ТНТ массой 2,0 кг с использованием штатного УЗВ «Фонтан-1» модели 20К: а — общий вид мишенной обстановки; б — вид плиты, на которой размещался УЗВ «Фонтан-1» модели 20К

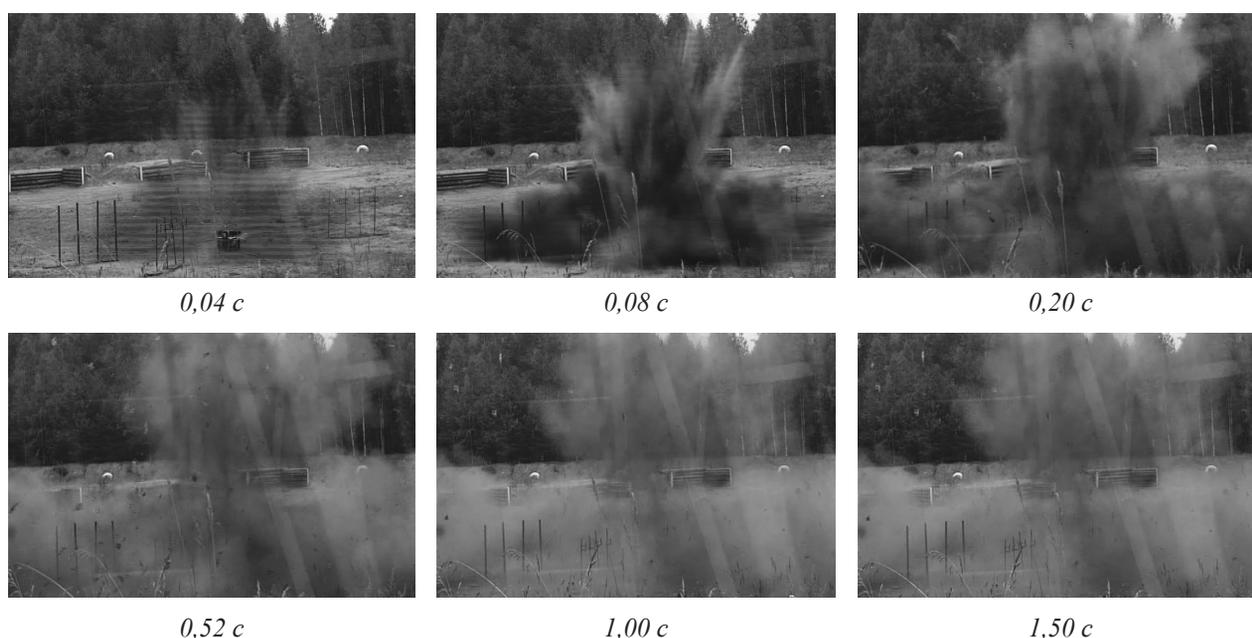


Рис. 8. Кинограмма подрыва заряда ТНТ массой 2,0 кг с использованием штатного УЗВ «Фонтан-1» модели 20К

Вид мишенной обстановки перед проведением подрыва заряда ТНТ массой 2,0 кг с использованием мобильного комплекса локализации взрыва на базе штатного УЗВ «Фонтан-1» модели 20К представлен на рис. 9, после проведения испытаний — на рис. 10, а кинограмма подрыва — на рис. 11.

В результате обработки экспериментальных данных получены статистические модели зависимости избыточного давления во фронте ВУВ, образовавшейся при открытом подрыве заряда ТНТ массой 2,0 кг и аналогичных зарядов ТНТ, размещенных в штатном УЗВ «Фонтан-1» модели 20К и мобильном комплексе для локализации взрыва ВОП на основе УЗВ «Фонтан-1»

модели 20К от расстояния до точки подрыва с использованием метода наименьших квадратов. Было рассмотрено несколько видов функций $y = f(x, a, b, \dots)$ и выбрана функция, для которой суммарная погрешность

$$\sum_{i=1}^n [f(x_j, a, b, \dots) - y_i]^2$$

оказалась минимальной.

Вид статистических моделей зависимости избыточного давления во фронте ВУВ, образовавшейся при открытом подрыве заряда ТНТ массой 2 кг и аналогичных зарядов ТНТ, размещенных в штатном УЗВ «Фонтан-1» модели 20К и мобильном комплексе для локализации взрыва ВОП на

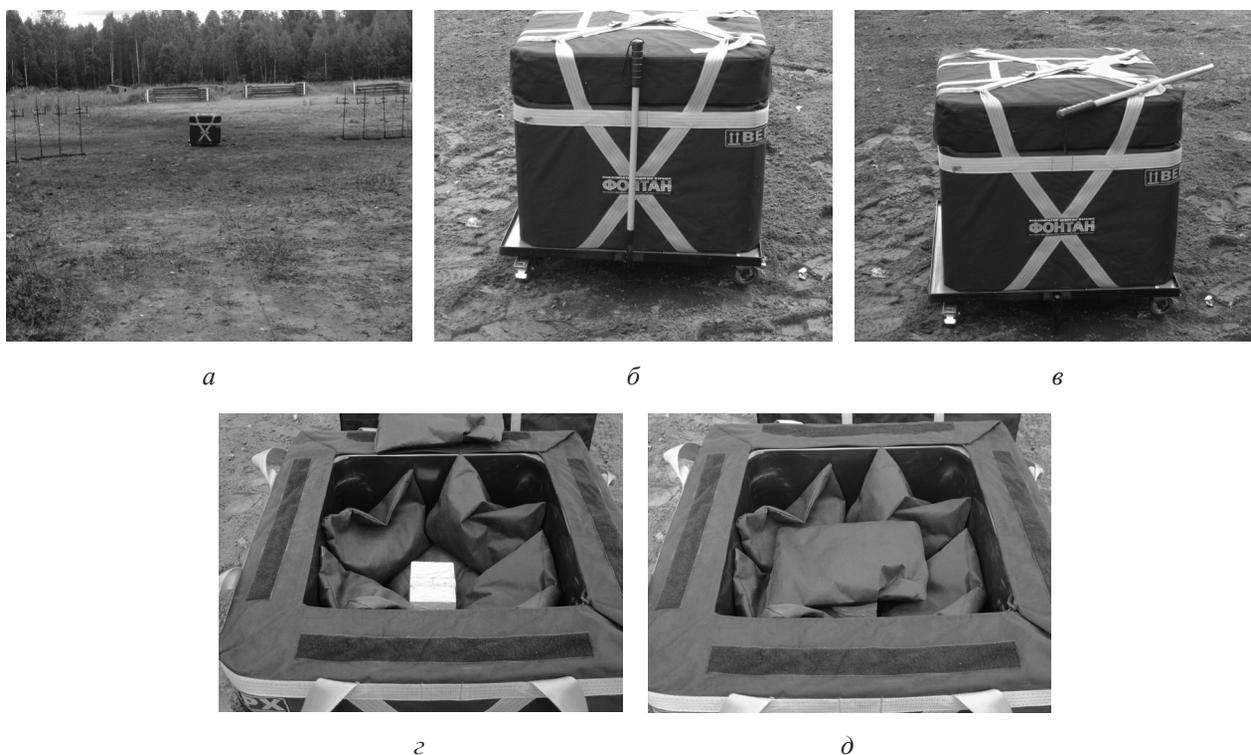


Рис. 9. Вид мишенной обстановки перед проведением подрыва заряда ТНТ массой 2,0 кг с использованием мобильного комплекса на основе УЗВ «Фонтан-1» модели 20К: а — общий вид мишенной обстановки; б — вид снаряженного УЗВ «Фонтан-1» модели 20К на транспортной тележке; в — вид снаряженного УЗВ «Фонтан-1» модели 20К на транспортной тележке без съемной ручки; г, д — вид размещения заряда ТНТ в УЗВ «Фонтан-1» модели 20К

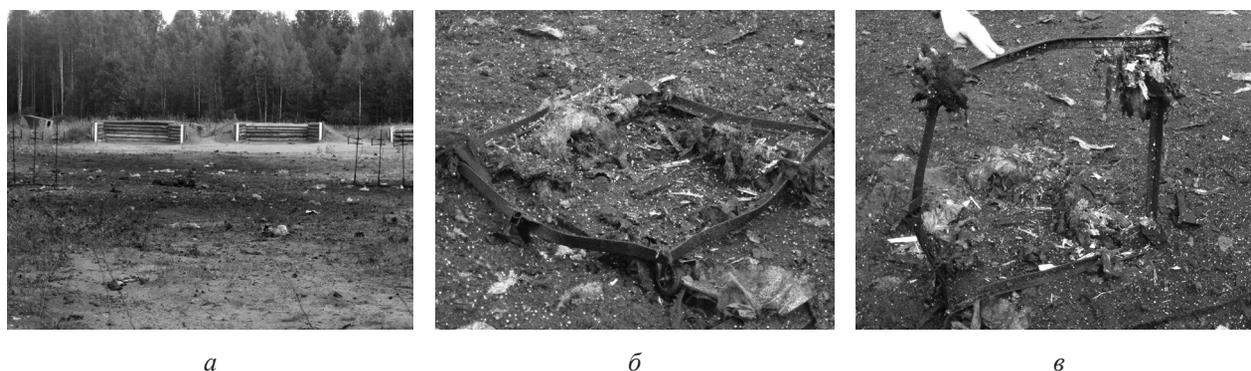


Рис. 10. Вид мишенной обстановки после подрыва заряда ТНТ массой 2,0 кг с использованием мобильного комплекса на основе УЗВ «Фонтан-1» модели 20К: а — общий вид мишенной обстановки б, в — вид каркаса тележки в горизонтальном и вертикальном положениях

основе УЗВ «Фонтан-1» модели 20К от расстояния до точки подрыва, представлен в табл. 2.

Вид зависимостей избыточного давления во фронте ВУВ, образовавшейся при открытом подрыве заряда ТНТ массой 2,0 кг и аналогичных зарядов ТНТ, размещенных в штатном УЗВ «Фонтан-1» модели 20К и мобильном комплек-

се для локализации взрыва ВОП на основе УЗВ «Фонтан-1» модели 20К от расстояния до точки подрыва представлен на рис. 12 и 13.

Анализ результатов, представленных в табл. 2 и на рис. 12, 13, показывает, что величина избыточного давления во фронте ВУВ при подрыве заряда ТНТ массой 2,0 кг в УЗВ

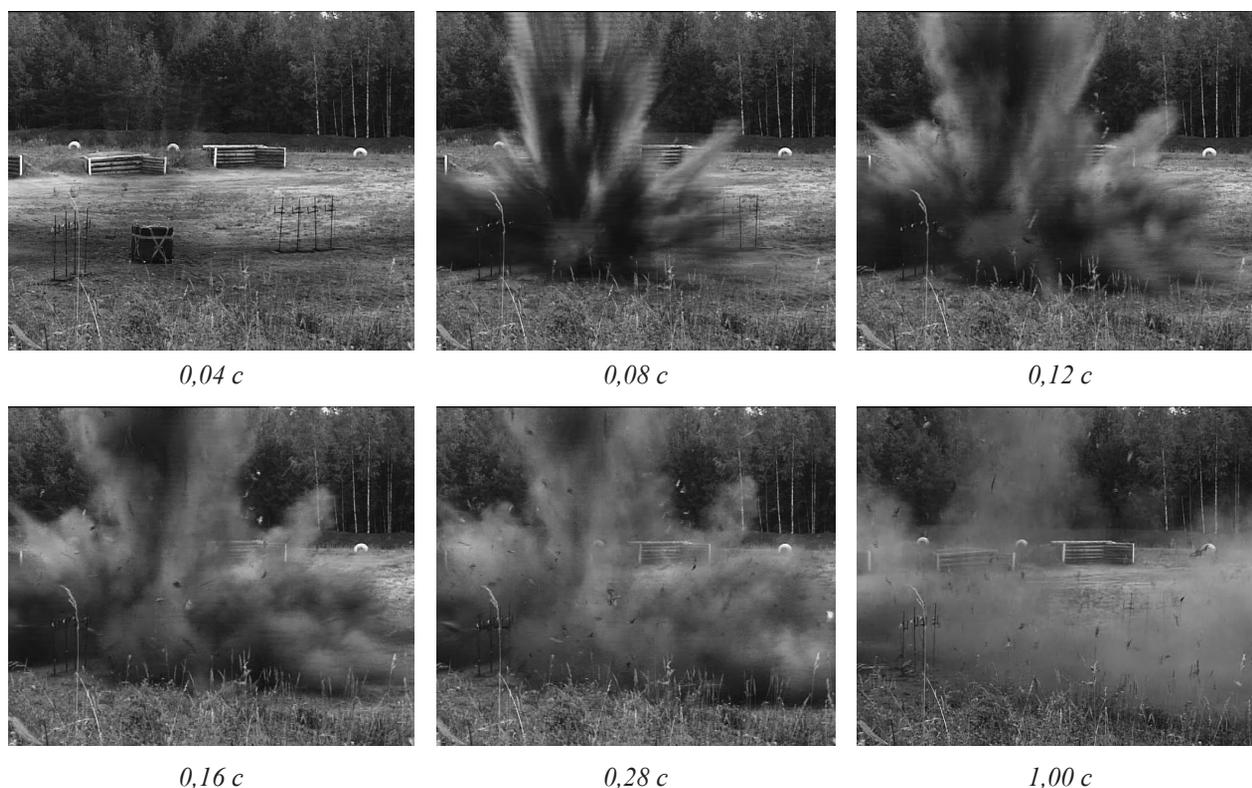


Рис. 11. Кинограмма подрыва заряда ТНТ массой 2,0 кг с использованием мобильного комплекса на основе УЗВ «Фонтан-1» модели 20К

Таблица 2

Вид статистических моделей зависимости избыточного давления во фронте ВУВ, образовавшейся при открытом подрыве заряда ТНТ массой 2 кг и аналогичных зарядов ТНТ, размещенных в штатном УЗВ «Фонтан-1» модели 20К и мобильном комплексе для локализации взрыва ВОП на основе УЗВ «Фонтан-1» модели 20К, от расстояния до точки подрыва

№ п/п	Вид испытаний	Вид статистической модели	Коэффициенты модели		Среднее отклонение, %	Средне-квадратическое отклонение	Коэффициент корреляции
			a	b			
1	Открытый подрыв заряда ТНТ массой 2,0 кг	$Y = a \exp(bx)$	1234,337	-0,586	4	0,0470	0,990
2	Подрыв заряда ТНТ массой 2,0 кг в штатном УЗВ «Фонтан-1» модели 20К	$Y = x / (a + bx)$	-0,030	0,030	2	0,0004	0,986
3	Подрыв заряда ТНТ массой 2,0 кг в УЗВ «Фонтан-1» модели 20К в составе мобильного комплекса	$Y = a \exp(bx)$	142,471	-0,346	3	0,0377	0,981

Примечание: область определения аргумента от 2,0 до 4,5 м

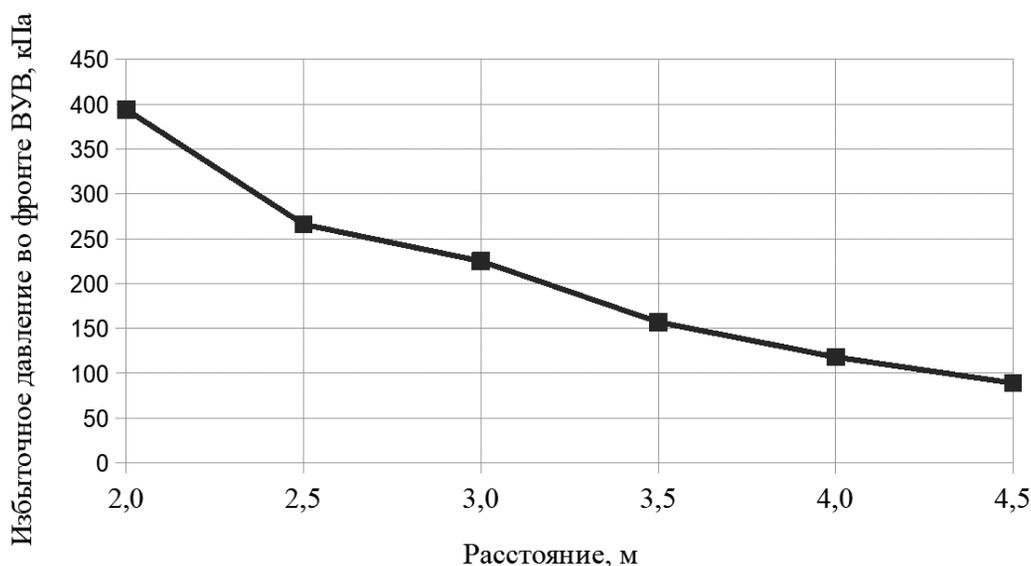


Рис. 12. Вид зависимостей избыточного давления во фронте ВУВ от расстояния до точки подрыва при открытом подрыве заряда ТНТ массой 2,0 кг

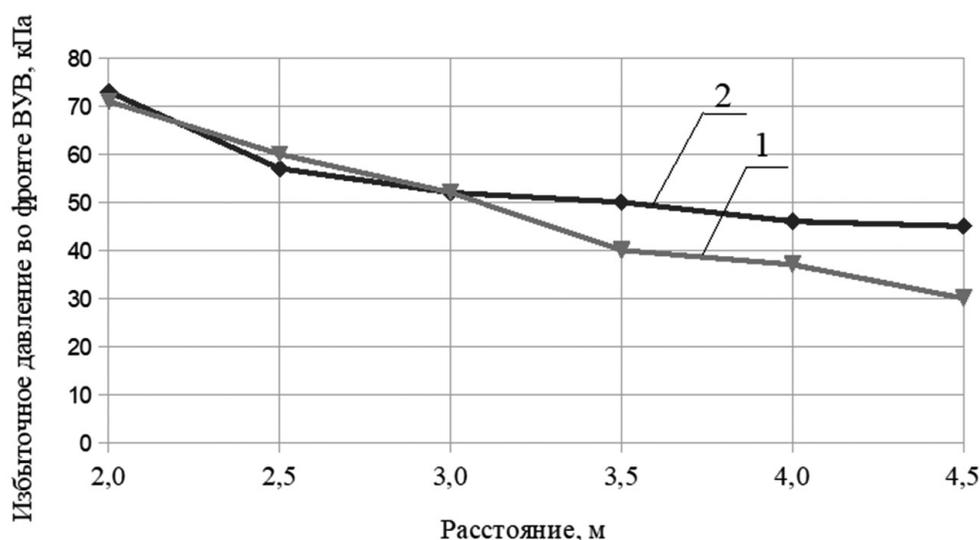


Рис. 13. Вид зависимостей избыточного давления во фронте ВУВ от расстояния до точки подрыва:
 1 — при подрыве заряда ТНТ массой 2,0 кг в штатном УЗВ «Фонтан-1» модели 20К;
 2 — при подрыве заряда ТНТ массой 2,0 кг в мобильном комплексе для локализации взрыва ВОП на основе УЗВ «Фонтан-1» модели 20К

«Фонтан-1» модели 20К в составе мобильного комплекса снижается до уровня 50 кПа (порога баротравмы) на расстоянии 3 м от точки подрыва. Аналогичное расстояние при подрыве заряда ТНТ массой 2 кг в УЗВ «Фонтан-1» модели 20К, размещенного на стальной плите, составляет 2,9 м.

Несущественное различие в полученных расстояниях можно объяснить погрешностями в

определении уровней избыточного давления во фронте ВУВ с использованием датчиков давления ПД-7-1,5М, цифрового многоканального осциллографа на базе персонального компьютера и платы сбора информации L-783.

При этом каркас транспортировочной тележки и установленные на нем несущие элементы целостности не потеряли, вторичных поражающих элементов не зафиксировано.

Таким образом, мобильный комплекс для локализации взрыва на основе штатного УЗВ «Фонтан-1» модели 20К, размещенного на специальной транспортировочной тележке, обеспечивает эффективное снижение уровня избыточного давления во фронте ВУВ на нормированном расстоянии для штатного УЗВ «Фонтан-1» модели 20К и может быть использован специалистами-взрывотехниками для решения задач по изоляции ВОП с последующим их уничтожением при очистке местности и гуманитарном разминировании.

Список источников

1. Васильев Н.Н., Спивак А.И., Васильев В.Д. и др. К вопросу организации работ по очистке местности от взрывоопасных предметов после чрезвычайных происшествий на объектах хранения боеприпасов // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2012. № 3–4. С. 20–30.

2. Васильев Н.Н., Спивак А.И., Дунилов К.К. и др. Пути повышения эффективности подготовки специалистов по осуществлению разведки и нейтрализации минно-взрывных устройств // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2011. № 3–4. 2011. С. 68–71.

3. Сильников М.В., Спивак А.И., Пугачев А.Н., Сазыкин А.М. К вопросу разработки специализированной техники обеспечения разминирования и выполнения специальных задач // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 3. С. 85–90.

4. Сильников М.В. Технические средства предотвращения и противодействия терроризму // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2003. № 1–2. С. 3–7.

5. Пучков А.С., Спивак А.И., Васильева С.Н., Фроленков Ю.А. Оценка эффективности устройств для защиты от взрыва при подрыве толстостенных взрывоопасных предметов // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2024. № 9–10. С. 52–63.

6. Дмитриев В.Я., Шишкин В.Н., Данилов Н.А. К вопросу исследования закономерностей снижения уровня избыточного давления во фронте воздушной ударной волны устройст-

вами для защиты от взрыва «Фонтан» // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 9–10. С. 61–64.

7. Дмитриев В.Я., Шишкин В.Н., Данилов Н.А., Сазыкин А.М. К вопросу снижения фугасного действия взрыва устройствами для защиты от взрыва «Фонтан» при срабатывании усиленных зарядов // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 5–6. С. 47–54.

8. Сильников М.В., Гук И.В., Михайлин А.И., Шишкин В.Н. Экспериментальное и теоретическое исследование эффективности действия технических устройств на основе гетерогенной двухфазной среды для подавления поражающих факторов подводного взрыва // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2018. № 1 (101). С. 59–68.

9. Сильников М.В., Михайлин А.И., Шишкин В.Н., Гук И.В. Экспериментальное исследование эффективности действия технических средств на основе гетерогенной двухфазной среды для защиты от подводного взрыва // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 5–6 (119–120). С. 58–65.

10. Михайлин А.И., Чернышов М.В., Компан Ф.М. Разработка и испытания комбинированных средств локализации поражающих факторов взрыва с эффектом направленного взрыва // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2011. № 7–8. С. 9–16.

11. Сильников М.В., Васильев Н.Н., Михайлин А.И. Экспериментальное определение защитных характеристик модульных локализаторов взрыва // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2003. № 3–4. С. 83–85.

12. Пучков А.С., Сильников Н.М., Спивак А.И., Лебедин А.В. Анализ опыта создания и перспектив развития конструкций устройств для защиты от взрыва, предназначенных для локализации взрывоопасных предметов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2024. № 4 (134). С. 126–143.

13. Пучков А.С., Гук И.В., Спивак А.И., Васильева С.Н. К вопросу применения цифровых измерителей скорости ударных волн для регист-

рации уровня избыточного давления во фронте воздушной ударной волны при полигонных испытаниях устройств для защиты от взрыва // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2024. № 1. С. 139–148.

References

1. Vasiliev N.N., Spivak A.I., Vasiliev V.D. et al. On the issue of organizing work to clear the area from explosive objects after emergency incidents at ammunition storage facilities // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2012. No 3–4. Pp. 20–30.

2. Vasiliev N.N., Spivak A.I., Dunilov K.K. et al. Ways to increase the efficiency of training specialists in reconnaissance and neutralization of mine-explosive devices // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2011. No 3–4. Pp. 68–71.

3. Silnikov M.V., Spivak A.I., Pugachev A.N., Sazykin A.M. On the issue of developing specialized equipment for ensuring mine clearance and performing special tasks // Izvestia RARAN. 2015. No 3. Pp. 85–90.

4. Silnikov M.V. Technical means of preventing and countering terrorism // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2003. No 1–2. Pp. 3–7.

5. Puchkov A.S., Spivak A.I., Vasilyeva S.N., Frolenkov Yu.A. Evaluation of the effectiveness of devices for protection against explosion during detonation of thick-walled explosive objects // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2024. No 9–10. 2024. Pp. 52–63.

6. Dmitriev V.Ya., Shishkin V.N., Danilov N.A. et al. On the issue of studying the patterns of reducing the level of excess pressure in the front of an air shock wave using devices for protection against explosions «Fontan» // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2014. No 9–10. Pp. 61–64.

7. Dmitriev V.Ya., Shishkin V.N., Danilov N.A., Sazykin A.M. et al. On the issue of reducing the high-explosive effect of an explosion using «Fontan» explosion protection devices when amplified charges are triggered // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2014. No 5–6. Pp. 47–54.

8. Silnikov M.V., Guk I.V., Mikhaylin A.I., Shishkin V.N. Experimental and theoretical investigation of efficiency of technical devices based on heterogeneous two-phase medium for mitigation of underwater explosion lethal factor // Izvestia RARAN. 2018. No 1 (101). Pp. 59–68.

9. Silnikov M.V., Guk I.V., Mikhaylin A.I., Shishkin V.N. Experimental study of efficiency of technical means based on heterogeneous two-phase environment for protection from underwater explosion // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2018. No 5–6 (119–120). Pp. 58–65.

10. Mikhailin A.I., Chernyshov M.V., Kompan F.M. Development and testing of combined means of localizing the damaging factors of an explosion with the effect of a directed explosion // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2011. No 7–8. Pp. 9–16.

11. Silnikov M.V., Vasiliev N.N., Mikhailin A.I. Experimental determination of the protective characteristics of modular explosion localizers // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2003. No 3–4. Pp. 83–85.

12. Puchkov A.S., Silnikov N.M., Spivak A.I., Lebedkin A.V. Analysis of the experience of creation and development prospects of designs of explosion protection devices intended for localization of explosive objects // Izvestiya RARAN. 2024. No 4 (134). Pp. 126–143.

13. Puchkov A.S., Guk I.V., Spivak A.I., Vasilyeva S.N. On the issue of using digital shock wave velocity meters to record the level of excess pressure in the front of an air shock wave during field tests of explosion protection devices // Izvestiya RARAN. 2024. No 1. Pp. 139–148.

УДК 623.4

doi: 10.53816/23061456_2025_1–2_85

**К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ ВЗРЫВОЗАЩИТНЫХ УРН (КОНТЕЙНЕРОВ)
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРИ СОВЕРШЕНИИ ТЕРРОРИСТИЧЕСКИХ АКТОВ**

**ON THE ISSUE OF USING EXPLOSION-PROOF URNS (CONTAINERS)
TO ENSURING PROTECTION OF CRITICAL INFRASTRUCTURE OBJECTS
WHEN COMMITTING TERRORIST ACTS**

А.С. Пучков, канд. техн. наук А.И. Спивак, А.В. Лебедкин

A.S. Puchkov, Ph.D. A.I. Spivak, A.V. Lebedkin

НПО Спецматериалов

Проведен анализ использования урн (контейнеров) для сбора бытовых отходов для совершения противоправных действий террористической направленности. Рассмотрены конструкции взрывозащитных урн открытого и полукрытого типа при локализации поражающих факторов взрыва, к числу которых относятся осколки, ударная волна и продукты детонации. Показано, что недостатком конструкции взрывозащитных урн открытого типа является наличие пламени и термическое воздействие, которые ограничивают использование таких урн внутри помещений и возле объектов инфраструктуры. С целью исключения термического воздействия взрыва на объекты инфраструктуры и уменьшения массы взрывозащитной урны был предложен вариант урны в виде неметаллической оболочки, промежуточная полость которой заполнена газо-жидкостным диспергентом, снабженной специальной крышкой.

Ключевые слова: взрывозащитная урна, взрывоопасный предмет, поражающие факторы взрыва.

An analysis was carried out of the use of bins (containers) for collecting household waste to commit illegal acts of a terrorist nature. The designs of explosion-proof urns of open and semi-open type are considered for localizing the damaging factors of an explosion, which include fragments, shock waves and detonation products. Shown, that the disadvantage of the design of open-type explosion-proof urns is the presence of flame and thermal effects, which limit the use of such urns indoors and near infrastructure. In order to eliminate the thermal impact of an explosion on infrastructure facilities and reduce the mass of the explosion-proof urn, a variant of the urn was proposed in the form of a non-metallic shell, the intermediate cavity of which is filled with a gas-liquid dispersant, equipped with a special lid.

Keywords: explosion-proof urn, explosive object, damaging factors of explosion.

Общественные пространства инфраструктур населенных пунктов, в силу особенностей жизнедеятельности людей, требуют организа-

ции сбора бытовых отходов. Для таких целей используют урны (мусорные контейнеры) различных конструкций и дизайнов, изготавливаемые

с использованием различных материалов, как правило, металл, бетон, пластик. Вид некоторых таких урн (контейнеров) представлен на рис. 1.

В настоящее время в нашей стране и за рубежом участились случаи противоправных действий террористической направленности с использованием урн, расположенных в людных местах, в которые закладываются взрывоопасные предметы (ВОП) с последующим их дистанционным подрывом.



Рис. 1. Вид урн (контейнеров) для сбора бытовых отходов

Наиболее резонансными были террористические акты в Бостоне на марафоне в 2013 году погибло 3 человека и пострадало 144 человека [1], на железнодорожном вокзале г. Волгоград в 2013 году, где погибло 14 человек и пострадало 49 человек после подрыва в урне ВОП массой до 10 кг в тротиловом эквиваленте [2] и на автобусных остановках г. Днепропетровск в 2012 году в серии из четырех подрывов ВОП массой 230...300 г в тротиловом эквиваленте в урнах на остановках общественного транспорта пострадало 27 пассажиров [3]. Не менее резонансные террористические акты с подрывом ВОП, размещенных в урнах, произошли г. Киев (2004, 2008), г. Москва (2005), г. Грозный (2009), г. Харьков (2011), г. Тольятти Самарской области (2012), г. Бердянск Запорожской области (2022), г. Отрадное Ленинградской области (2023), г. Энгельс Саратовской области (2023), г. Сургут, ХМНО (2024), г. Складовск Херсонской области (2024), г. Рязань (2024).

Последствия подрывов ВОП в урнах для бытовых отходов представлены на рис. 2.

В основном, для осуществления террористических актов выбираются урны, изготовленные из бетона. Подрыв ВОП в такой урне позволяет



Последствия подрыва ВОП в бетонной урне в парке г. Отрадное Ленинградской области



Последствия подрыва ВОП в урне железнодорожного вокзала г. Волгоград



Последствия подрыва ВОП в урнах среди зрителей марафона г. Бостон, США



Последствия подрыва ВОП в урне около остановки транспорта г. Днепропетровск Украина

Рис. 2. Последствия подрывов ВОП в урнах для бытовых отходов

отказаться от использования осколочного материала (стальные шарики, болты, гвозди), поскольку стенки урны остановят осколочную массу. Однако, в качестве осколочной массы будут выступать бетонные осколки урны, которые, как показали результаты исследований, способны разлетаться на расстоянии более 10 м от места подрыва.

После террористических актов в г. Днепропетровске в городе были изъяты все урны, а власти г. Луганск обмотали бетонные урны пленкой с целью уменьшения последствий взрыва [4]. Одним из направлений усовершенствования конструкций бетонных урн было решение изготавливать корпуса урн из асбестобетона, который разрушается в пыль при взрыве и не образует эффективных поражающих элементов.

В связи с угрозой осуществления террористических актов, обострившейся в последнее время, наиболее актуальным является вопрос защиты людей в местах их массового скопления: в аэропортах, на железнодорожных и автовокзалах, станциях метрополитена, на территориях крупных торговых центров, а также в местах проведения массовых культурно-зрелищных и спортивных мероприятий. Помимо мер предупреждения террористических актов, основанных на использовании металлодетекторов и детекторов взрывчатых веществ, блокираторов радиовзрывателей и другого оборудования, по мнению специалистов, следует уделять особое внимание и контролю за местами возможной закладки ВОП в местах скопления людей и прежде всего, контейнерам и урнам для мусора. В настоящее время примерно 70 % из размещенных урн для бытового мусора представляет серьезную опасность для граждан в случае использования их террористами для закладки ВОП [5]. Конструкции и формы используемых урн позво-

ляют разместить в них взрывные устройства с зарядами большой мощности, а внешний корпус урны в случае взрыва создаст дополнительное количество осколков с одновременным увеличением площади зоны поражения.

В настоящее время актуальным является использование взрывобезопасных урн и контейнеров для мусора в местах массового скопления людей. В мировой практике взрывобезопасные урны получили название «контейнеры для мусора двойного назначения» [6]. Внешне они напоминают обычные урны для мусора и могут быть установлены в самых различных местах. Специальная конструкция такой урны позволяет обезопасить людей от поражающих факторов взрыва, к числу которых относятся осколки, ударная волна и продукты детонации. Для создания элементов взрывозащитных урн могут использоваться среды или конструкции, которые снижают амплитуду ударной волны, например стенка может быть выполнена в виде многослойной перфорированной преграды из стали [7], а пространство между преградами может быть наполнено слоем взрывозащитного материала [8]. При необходимости подобная урна может служить и контейнером для перевозки заложенного в нее взрывного устройства.

Из зарубежных разработок, представленных на мировом рынке, наибольшей популярностью пользуются контейнеры компании Mul-T-Lock «OR» и «Gold», которые поставляются во многие страны мира, а также контейнеры «DROR» и «GOLAN» компании KML, MECV1 (Швеция) и ETCV (Канада). Сравнительные характеристики наиболее популярных взрывобезопасных урн приведены в табл. 1 [6].

Как правило, конструктивно такие урны выполнены по единому типу и имеют внешний

Таблица 1

Сравнительные характеристики взрывобезопасных урн

Модель	Размеры, мм		Масса, кг	Внутренний объем, л	Предельно допустимая масса ВВ, кг
	диаметр	высота			
OR	500	950	90	30	0,50
Gold	550	900	100	60	0,60
	660	900	160	80	0,75
	680	900	185	115	0,75
	680	900	210	115	1,20

стальной корпус значительной толщины, внутренний однослойный или многослойный наполнитель и функционально не предназначены для сбора мусора. Очевидно, что при увеличении массы заряда до объявленного номинала возможно разрушение внешнего корпуса урны и появление вторичных осколков. Взрывобезопасность урн, имеющих внешний стальной корпус, резко снижается в случае использования ВОП с массой заряда ВВ больше расчетного номинала.

Отечественные средства борьбы с терроризмом представлены универсальным контейнером-мусоросборником «Щит-1», который внешне напоминает обычную урну для мусора, но конструктивно имеет принципиально новую схему для локализации поражающих факторов ВОП [6]. При этом не создаются поля вторичных осколков, обеспечивается снижение давления на фронте ударной волны и осуществляется уменьшение поля первичных осколков. Отмеченные показатели достигаются за счет отказа от использования в конструкции изделия металлических

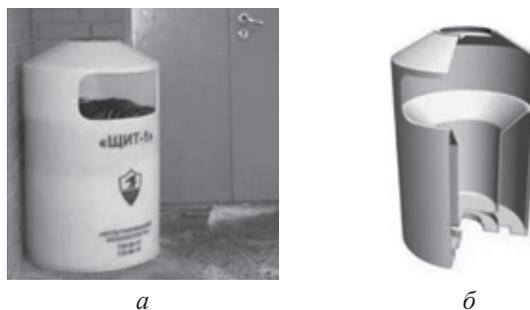


Рис. 3. Вид универсального контейнера-мусоросборника «Щит-1»:

а — внешний вид; б — вид корпуса в разрезе 1/4

деталей и применения специального буферного слоя, размещенного между контейнером для мусора и внешним корпусом. Вид универсального контейнера-мусоросборника «Щит-1» представлен на рис. 3.

Технические решения, примененные при разработке типовых отечественных и зарубежных взрывозащитных урн, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Технические решения, используемые при разработке взрывозащитных урн

№ п/п	Вид конструкции образца	Краткое описание
1	<p>Вид конструкции образца по патенту CN 101 575 046</p> <p>Взрывозащищенный мусорный бак:</p> <p>1 — корпус бака; 2 — буферный слой;</p> <p>3 — опорная рама;</p> <p>4 — энергопоглощающий слой;</p> <p>5 — крышка; 6 — внутренний слой опорной рамы; 7 — взрывозащитный слой опорной рамы</p>	<p>Взрывозащищенный мусорный бак выдерживает взрыв ТНТ массой 3,0 кг, при этом деформация корпуса бака отсутствует.</p> <p>Верхний конец корпуса бака и верхний конец опорной рамы имеют фиксированное соединение, буферный слой размещен между внутренней стороной корпуса бака и внешней поверхностью опорной рамы. Энергопоглощающий слой прикреплен к внутренней поверхности опорной рамы, а крышка подвижно закреплена на обечайке бака.</p> <p>Корпус, изготовленный из нержавеющей стали, имеет цилиндрическую форму с внешним диаметром 600 мм, высотой 850 мм и толщиной стенки 2 мм.</p> <p>Энергопоглощающий слой толщиной 30 мм изготовлен из вулканической породы с содержанием воды 20 %.</p> <p>Буферный слой толщиной 40 мм изготовлен из мелкодисперсного кварца.</p> <p>Взрывозащитный слой опорной рамы толщиной 30 мм изготовлен 50 слоев полиэтилена.</p> <p>Уровень шума составляет 180 децибел на расстоянии 10 м от места взрыва. В картоне, установленном на расстоянии 2 м от центра взрыва, отсутствуют повреждения.</p>

Таблица 2 (продолжение)

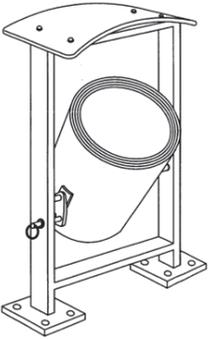
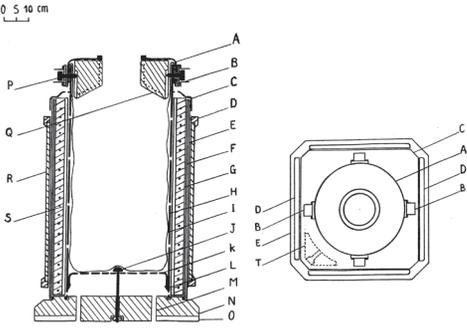
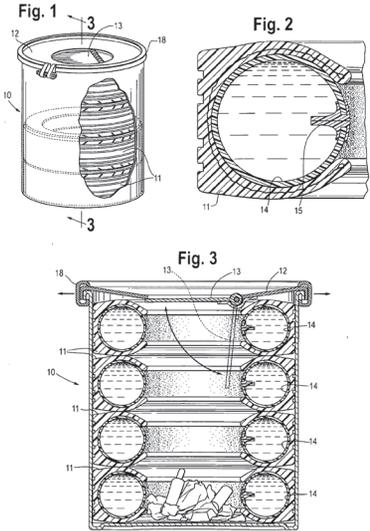
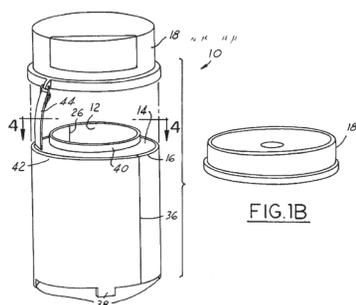
<p>2</p>	 <p>Вид конструкции образца по патенту CN 2926 115 Опрокидываемый взрывозащищенный мусорный бак</p>	<p>Опрокидываемый взрывозащищенный мусорный бак состоит из кронштейна, крышки и собственно бака, включающего наружный и внутренний корпуса. Бак вращается на оси.</p> <p>При взрыве заряда ВВ прочный корпус бака ограничивает боковой удар, при этом энергия взрыва может быть высвобождена только вверх, что значительно снижает вред, причиненный взрывом.</p>
<p>3</p>	 <p>Вид конструкции образца по патенту FR 2 738 558 A3 Антитеррористический мусорный бак</p>	<p>Мусорный бак состоит из полого стального цилиндра <i>H</i>, который предназначен для размещения ВОП в продольной плоскости. Он закрывается в основании перфорированным стальным диском <i>K</i> и сверху стальной крышкой <i>A</i>, которая имеет систему крепления <i>P, B</i>. Крышка снабжена кольцом из синтетического каучука <i>Q</i>, усиленным металлической решеткой, которая предназначена для уменьшения эффекта вырывания крышки при взрыве и рассеивания поражающих элементов ВОП. Еще один полый железобетонный цилиндр <i>G</i> с внутренней канавкой усиливает стальной цилиндр и останавливает осколки ВОП.</p>
<p>4</p>	 <p>Вид конструкции образца по патенту US 2 012 030 556 7 A1 Контейнер для защиты от взрыва</p>	<p>Контейнер состоит из внешней металлической оболочки, заключающей в себе автомобильные камеры с ремнями, используемыми для их штабелирования. В цилиндрическом центральном пространстве размещается съемный контейнер для отходов. Автомобильные камеры заполнены водой, уложены друг на друга и снабжены противоосколочной лентой.</p> <p>Контейнер может быть оснащен тензодатчиком и программируемым микропроцессором для обнаружения ВОП, а также радиочастотным передатчиком для отправки сигнала тревоги на центральный пост охраны.</p>

Таблица 2 (продолжение)

5

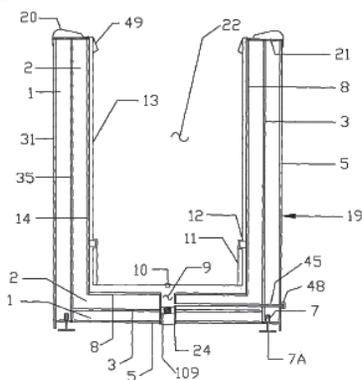


Вид конструкции образца по патенту
US 7 014 059

Взрывозащищенный контейнер для мусора: 10 — взрывозащищенный контейнер; 16 — внешний контейнер с открытым верхом; 12 — внутренний контейнер с открытым верхом; 14 — армирующий материал; 18 — крышка; 26 — шов внутреннего контейнера; 36 — шов внешнего контейнера; 38 — ножки внешнего контейнера; 40 — кромочная часть внутреннего контейнера; 42 — ободок внешнего контейнера; 44 — трос

Взрывозащищенный контейнер для отходов включает в себя внешний контейнер с открытым верхом и внутренний контейнер с открытым верхом, между которыми размещен железобетон в качестве армирующего материала. Внутренний и внешний контейнеры изготовлены из стали. Внутренний контейнер может быть изготовлен из нейлонового или пластмассового материала, армированного арамидным волокном, например КЕВЛАРА.

6



Вид конструкции образца по патенту
WO 2 005 002 975 A2

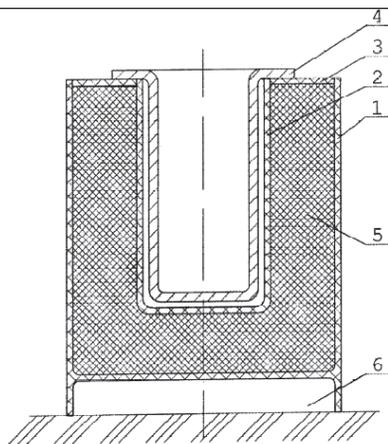
Бомбозащищенный мусорный контейнер: 3 — центральная оболочка; 5 — наружная оболочка; 8 — внутренняя оболочка; 14 — вертикальная стенка внутренней оболочки; 31 — вертикальная стенка наружной оболочки; 35 — вертикальная стенка центральной оболочки

Пространство между наружной и центральной оболочками заполнено первым слоем сжимаемого материала. Пространство между внутренней и центральной оболочками заполнено вторым слоем сжимаемого материала. Материалы первого и второго слоев имеют различные конструкции, состоящие из воды, жидкости, газа, инертного газа, их комбинаций и имеют предел прочности на растяжение по коэффициенту Пуассона — более 0,3.

Средняя оболочка выполнена деформируемой, сужается внутрь от верхнего основания и может изготавливаться из гофрированных, перфорированных, шероховатых, спиралевидных, компрессионных и комбинированных материалов.

Таблица 2 (продолжение)

7



Вид конструкции образца по патенту RU 2 272 767

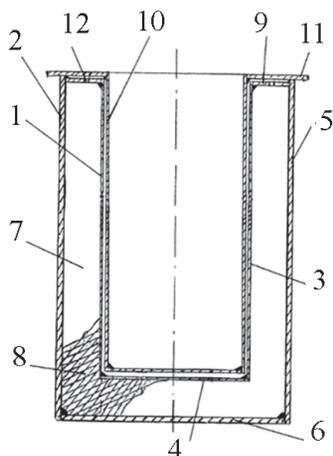
Взрывобезопасная урна для мусора:

- 1 — внешний цилиндр;
- 2 — внутренний цилиндр; 3 — крышка;
- 4 — мусоросборник; 5 — сыпучий материал; 6 — воздушная полость

Взрывобезопасная урна для мусора содержит полый корпус с наполнителем и вкладыш-мусоросборник. Корпус выполнен из пластичного материала с плотностью не более 0,2...1,0 и пределом прочности не более 0,5...1,0 соответственно плотности и предела прочности алюминия, с толщиной стенки не более 0,01...0,02 внутреннего диаметра вкладыша-мусоросборника, а внутренняя полость корпуса выполнена герметичной и заполнена сыпучим материалом с пористостью 0,2...0,95 и толщиной слоя не менее 0,3 внутреннего диаметра вкладыша-мусоросборника.

Сыпучий материал может быть размещен в не менее чем одной формообразующей камере. Толщина слоя сыпучего материала может быть переменной для различных горизонтальных сечений по высоте корпуса и сечений в вертикальной плоскости, проходящих через ось симметрии корпуса. Вкладыш-мусоросборник, выполненный из алюминия или других легких сплавов с толщиной стенки не более 1...2 мм, располагается с воздушным зазором толщиной не менее 2...5 мм по отношению к внутреннему цилиндру для предотвращения его чрезмерного нагрева в случае загорания или тления мусора во вкладыше-мусоросборнике. Дно корпуса может быть выполнено с одной или несколькими воздушными полостями. Высота воздушной полости должна быть не менее 1...2 см.

8



Вид конструкции образца по патенту RU 29048. Взрывостойкая урна:

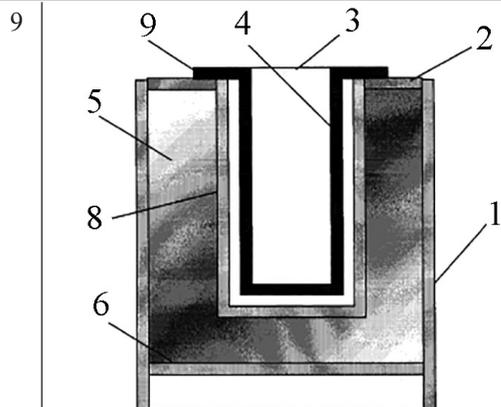
- 1 — внутренний корпус; 2 — внешний корпус; 3 — цилиндрическая стенка внутреннего корпуса;
- 4 — днище внутреннего корпуса;
- 5 — цилиндрическая стенка внешнего корпуса; 6 — днище внешнего корпуса;
- 7 — полость, заполненная пористым материалом; 8 — пористый материал;
- 9 — кольцевая пластина;
- 10 — стаканообразный вкладыш;
- 11 — наружный фланец; 12 — сквозные отверстия

Урна для мусора содержит корпус, образованный цилиндрической стенкой и днищем. Корпус выполнен составным и включает внутренний корпус и охватывающий его на расстоянии внешний корпус с образованием между их цилиндрическими стенками и днищами полости.

Оба корпуса жестко соединены между собой в верхней части посредством кольцевой пластины, причем верхний торец цилиндрической стенки внешнего корпуса выступает над верхним торцом цилиндрической стенки внутреннего корпуса. Внутри внутреннего корпуса с зазором размещен стаканообразный вкладыш, имеющий наружный фланец по верхнему торцу, посредством которого вкладыш опирается на выступающий торец цилиндрической стенки внешнего корпуса, причем диаметр фланца вкладыша превышает наружный диаметр внешнего корпуса. В кольцевой пластине выполнены сквозные отверстия. Полость между внутренним и внешним корпусами заполнена пористым материалом, например пенополиуретаном. Все элементы корпуса урны и вкладыш выполнены из легированной стали.

Толщина цилиндрической стенки и днища внешнего корпуса составляет 9–11 мм, толщина цилиндрической стенки и днища внутреннего корпуса составляет 1–3 мм, а расстояние между стенками и днищами внутреннего и внешнего корпусов составляет 70–90 мм. Высота урны составляет 680–720 мм, а наружный диаметр составляет 480–520 мм. Наружный диаметр урны превышает внутренний диаметр вкладыша в 2–3 раза. Все элементы урны выполнены из легированной стали, при этом стенки и днища корпусов и части вкладыша соединены посредством сварки.

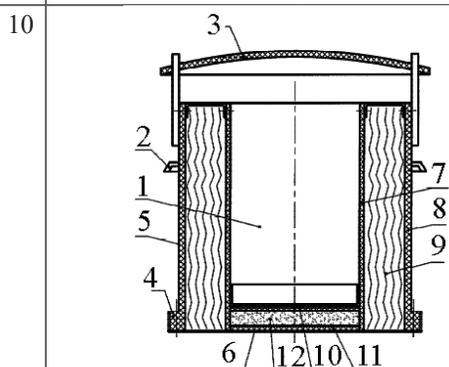
Таблица 2 (продолжение)



Вид конструкции образца по патенту RU 43063

Универсальный контейнер-мусоросборник: 1 — корпус; 2 — крышка; 3 — загрузочное отверстие; 4 — съемный мусоросборник; 5 — защитное пространство; 6 — дно корпуса; 8 — стакан; 9 — кольцевой выступ

Универсальный контейнер-мусоросборник содержит пластиковый корпус, выполненный, например, из пластмассы или иного материала, способного деформироваться под действием давления и разрушаться без образования осколков. Крышка с загрузочным отверстием закреплена герметично или с возможностью съема и образует между быстросъемным мусоросборником, выполненным из пластмассы или алюминия, и внутренней поверхностью корпуса, защитное пространство, которое заполнено сыпучим материалом, например, песком. Дно корпуса может быть выполнено вогнутым или установлено с конструктивным зазором между ним и внешней опорной поверхностью. Отношение минимального размера корпуса к максимальному размеру мусоросборника в радиальном направлении должно быть не менее двух. Для того, чтобы контейнер не «подскочил» в результате взрыва и продукты взрыва не распространились вдоль пола с образованием ударной волны отношение минимального размера пространства между внутренней поверхностью корпуса и мусоросборником в осевом направлении к размеру этого пространства в радиальном направлении выбирают не менее $2/3$. Глубина вогнутости дна корпуса (или конструктивного зазора между дном корпуса и внешней опорной поверхностью) к минимальному размеру пространства между внутренней поверхностью корпуса и мусоросборником не более $0,3$.



Вид конструкции образца по патенту RU 2 309 879 C1

Взрывостойкая урна-контейнер:
1 — корпус; 2 — ручки; 3 — крышка;
4 — узлы под анкеры;
5 — цилиндрическая часть корпуса;
6 — днище; 7 — внутренняя стенка;
8 — наружная стенка; 9 — наполнитель;
10 — внутренняя стенка днища;
11 — наружная стенка днища;
12 — наполнитель днища

Стенки выполнены из композиционного материала, например эпоксидного стеклопластика плотностью 1500 кг/м^3 на основе нити с диаметром волокна 20 мкм и ее объемном содержании 65% . Стенки цилиндрической части выполнены методом намотки, а стенки днища — методом формования или прессования. Днище может быть выполнено плоским или выпуклым.

Заполнитель корпуса состоит из гибких тканых пакетов или сотопанелей, а наполнитель днища — из пенорезины или гранулированного пеноалюминия.

Цилиндрическая часть и днище могут быть выполнены в виде одного целого.

Таблица 2 (продолжение)

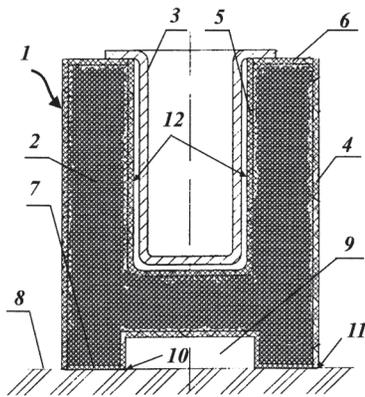
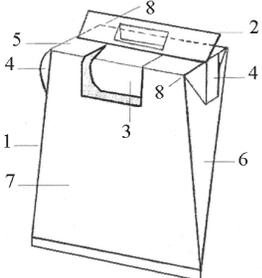
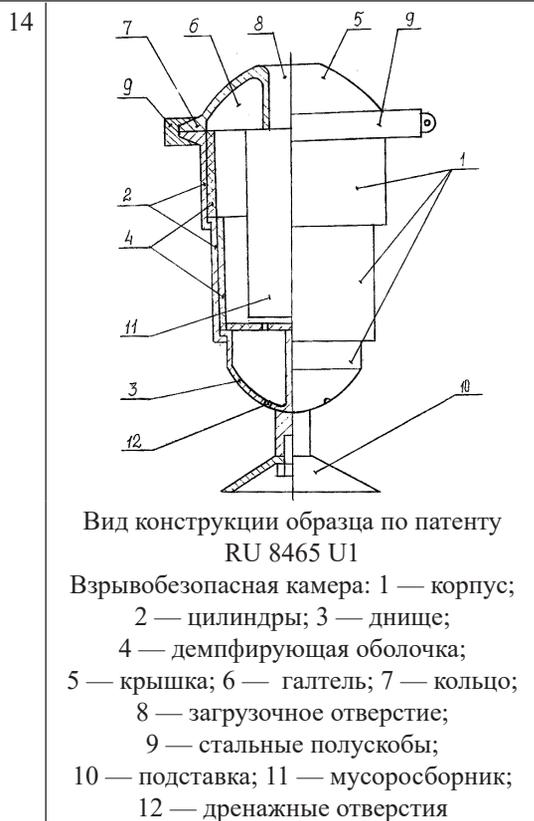
11	 <p>Вид конструкции образца по патенту RU 2 757 732 [14]</p> <p>Взрывобезопасная урна для мусора: 1 — полый корпус; 2 — сыпучий материал; 3 — вкладыш-мусоросборник; внешняя стенка; 5 — внутренняя стенка; 6 — крышка; с отверстием под мусоросборник; 7 — поверхность контакта; 8 — подстилающая поверхность; 9 — воздушная полость дна</p>	<p>Взрывобезопасная урна для мусора содержит полый корпус из пластичного материала, заполненный сыпучим материалом, образующим защитный слой, и вкладыш-мусоросборник с возможностью съема в направлении вертикальной оси.</p> <p>Полость корпуса выполнена с образованием защитного слоя сыпучего материала до поверхности контакта дна корпуса с подстилающей поверхностью. Дно корпуса выполнено с воздушной полостью, открытой к подстилающей поверхности в вертикальном направлении. Контур полости в горизонтальной плоскости меньше соответствующего внешнего контура полого корпуса и не меньше соответствующего внутреннего контура полого корпуса для вкладыша-мусоросборника. Глубина полости не меньше одной трети толщины слоя сыпучего материала в направлении подстилающей поверхности, а расстояние между контуром полости в горизонтальной плоскости и соответствующим внешним контуром полого корпуса равно или больше толщины слоя сыпучего материала.</p> <p>Детали корпуса могут быть выполнены из пластмассы, стеклопластика или углепластика толщиной не более 2...5 мм и соединены между собой с образованием влагонепроницаемого пространства, в котором размещается сыпучий материал — сухой песок и/или фарфоровая крошка.</p>
12	 <p>Вид конструкции образца по патенту RU 131 368 U1. Антитеррористическая урна для мусора одноразовая: 1 — одноразовая полость; 2 — ручка; 3 — отверстие с крышкой; 4 — клеевой элемент; 5 — верхнее основание; 6 — боковая грань; 7 — боковая грань; 8 — линия сгиба</p>	<p>Урна для мусора состоит из одноразовой емкости и стойки для крепления одноразовой емкости. Одноразовая емкость в виде усеченной пирамиды зафиксирована на стойке для крепления, выполненной в виде цельного проволочного кронштейна с возможностью крепления к горизонтальной и/или вертикальной поверхности, имеется, по меньшей мере, одно отверстие с пружинящей крышкой для наполнения одноразовой емкости, а вдоль нижнего соединительного шва — прорези под сток жидкости.</p>
13	<p>Урна-контейнер взрывостойкий по патенту RU 200 645 [15]</p>	<p>Взрывостойкая урна-контейнер содержит корпус, состоящий из цилиндрической части и дна, образованных внешними и внутренними стенками, разделенными слоем заполнителя из энергопоглощающего материала. Корпус дополняют как минимум одним слоем материала, экранирующего от электромагнитных помех (100 дБ), типа Aaronia X-Dream. Этот материал прикрепляют к внешней или внутренней стенке. Данная ткань имеет эффективность экранирования — 70 дБ; 99,99 % при 20 ГГц. Через подобную ткань практически не проникают сигналы беспроводной связи стандартов: GSM и/или DECT, и/или BLUETOOTH, и/или WLAN и др. электромагнитные сигналы в диапазоне от 1 МГц до 30 ГГц.</p>

Таблица 2 (продолжение)



Взрывобезопасная камера содержит полый корпус, выполненный из броневой стали в виде колбы, состоящей из двух коаксиально расположенных цилиндров с упрочняющими кольцами на торцах и полусферического днища с галтелями. Внутри корпуса установлена демпфирующая оболочка из стеклопластика толщиной 1,0–1,5 толщины стенки корпуса камеры. В верхней части корпуса расположена крышка, выполненная в виде полусферы с литевыми галтелями и крепежным наружным кольцом клиновидной формы. Для жесткого соединения корпуса с крышкой служат стальные полускобы, охватывающие корпус и крышку по всей окружности и связанные между собой болтовым соединением. Диаметр загрузочного отверстия выбран по предельному размеру предмета, имеющего объем заряда ВВ массой до 0,5 кг ТНТ.

При взрыве происходит частично выброс продуктов детонации в вертикальном направлении. Остатки продуктов детонации изымают из камеры при открытой крышке.

Анализ сведений, представленных в табл. 2, показывает, что подавляющее большинство конструкций взрывозащитных урн разрушается, используемый в конструкции пористый (сыпучий) материал, размещенный между внешней и внутренней оболочками корпуса, эффективно тормозит первичные осколки, образовавшиеся при взрыве ВОП. Причем, как показали экспериментальные исследования, для торможения большинства осколков достаточно слоя песка толщиной 10...15 см и более. Эффективен сыпучий материал (песок и/или фарфоровая крошка), в отличие от пористого пенополиуретана или других пористых материалов, и при защите от кумулятивной струи за счет реализации эффекта непрерывного и многократного схлопывания подвижных частиц сыпучей среды за движущимися фрагментами струи. Ударная волна и продукты детонации, проходя через сыпучий материал, теряют свою интенсивность (снижается давление и импульс во фронте волны, уменьшается скорость распространения) за счет больших потерь энергии на метание час-

тиц песка и/или фарфоровой крошки и адиабатическое сжатие воздушных пор между этими частицами, при котором происходит перевод кинетической энергии в тепловую. Одним из недостатков взрывозащитных урн такой конструкции является значительная масса в связи с использованием сыпучих материалов толщиной 15 см и более.

Метаемые взрывом песок и/или фарфоровая крошка и фрагменты тонкостенного низкоплотного легкоразрушаемого корпуса обладают низкой поперечной нагрузкой (отношением массы к площади поперечного сечения в направлении метания) и интенсивно тормозятся воздухом, разлетаясь на расстояние всего в несколько метров от эпицентра взрыва.

Воздушная полость под дном устройства (при наличии) обеспечивает свободную поверхность у дна корпуса и способствует уменьшению сейсмического воздействия на подстилающую поверхность.

В целях упрощения взрывозащитной урны было проведено экспериментальное исследова-

ние возможности использования конструкции в виде толстостенной трубы для локализации подрыва заряда ТНТ массой 1 кг [9, 10].

На первом этапе была проведена серия подрывов зарядов ТНТ массой 0,5 кг. При этом заряд ТНТ располагался по центру трубы на высоте 350 мм от верхнего края. Труба устанавливалась на броневой плите. В результате подрывов, было установлено, что конструкция взрывозащитной урны не нарушена.

При испытаниях определялось избыточное давление во фронте воздушной ударной волны на расстояниях 2,0...3,5 м от места подрыва заряда ТНТ с использованием преобразователей давления ПД-7-1,5М.

В результате обработки экспериментальных данных получена статистическая модель зависимости избыточного давления во фронте ВУВ от расстояния до точки подрыва с использованием метода наименьших квадратов. Было рассмотрено несколько видов функций $y = f(x, a, b, \dots)$ и выбрана функция, для которой суммарная погрешность

$$\sum_{i=1}^n [f(x, a, b, \dots) - y_i]^2$$

оказалась минимальной.

Вид статистической модели зависимости избыточного давления во фронте воздушной ударной волны (ВУВ) от расстояния до точки подрыва представлен в табл. 3.

Анализ полученной статистической модели показывает, что эффективность взрывозащитной урны по уменьшению уровня избыточного давления во фронте ВУВ находится на уровне эффективности штатных устройств для защиты от взрыва модели «Фонтан» для заряда ТНТ соответствующей массы [11].

На втором этапе была проведена серия подрывов зарядов ТНТ массой 1,0 кг. В результате подрывов, было установлено, что конструкция взрывозащитной урны не нарушена. Вид взры-

возащитной урны до проведения испытаний и после проведения испытаний представлен на рис. 4.

В результате проведения испытаний была подтверждена прочность трубы, при этом после разрывов зарядов ТНТ массой 0,5 кг и 1,0 кг в средней части трубы на уровне расположения заряда ТНТ по окружности образовалась выпуклость. Деформация удлинения окружности трубы составила 1,9 % и 10,8 %, соответственно.

К недостаткам конструкции взрывозащитных урн открытого типа следует отнести наличие пламени и термическое воздействие, которые ограничивают использование таких урн внутри помещений и возле объектов инфраструктуры.

Кинограммы, характеризующие наличие пламени и термического воздействия при подрыве зарядов ТНТ массой 0,5 кг и 1,0 кг, размещенных во взрывозащитных урнах открытого типа, представлены на рис. 5 [9].

С целью исключения термического воздействия взрыва на объекты инфраструктуры и уменьшения массы взрывозащитной урны был предложен и подвергнут испытаниям вариант урны в виде неметаллической оболочки, промежуточная полость которой заполнена газо-жидкостным диспергентом [9], снабженная специальной крышкой с отверстием, размер которого

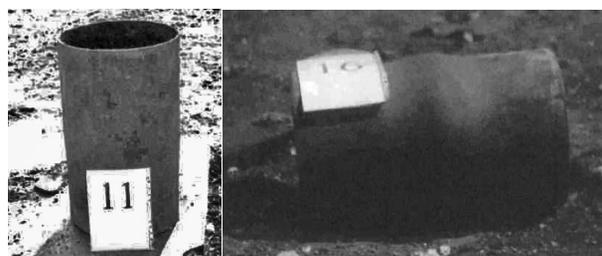


Рис. 4. Вид взрывозащитной урны до и после проведения испытаний подрывом заряда ТНТ массой 1,0 кг: а — вид урны до испытаний; б — вид урны после испытаний

Таблица 3

Вид статистической модели зависимости избыточного давления во фронте ВУВ от расстояния

Вид статистической модели	Коэффициенты модели		Среднее отклонение, %	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент корреляции
	<i>a</i>	<i>b</i>			
$Y = ax / (b + x)$	16,856	-1,445	1	0,0003	0,999

Примечание: область определения аргумента от 2,0 до 3,5 м



0



0,04 с



0,08 с



0,12 с



0,15 с

Подрыв заряда ТНТ массой 0,5 кг в урне



0



0,04 с



0,08 с



0,12 с



0,15 с

Подрыв заряда ТНТ массой 1,0 кг в урне

Рис. 5. Кинограммы подрывов зарядов ТНТ в взрывозащитной урне

определен по предельному размеру предмета, имеющего объем заряда ВВ массой до 0,5 кг ТНТ.

В результате испытаний было установлено, что предложенная конструкция взрывозащитной урны исключает появление пламени при взрыве в ней заряда ВВ и термическое воздействие на объекты инфраструктуры. Результаты подрывов зарядов ТНТ массой 2,0 кг в урне на основе газо-жидкостного диспергента с крышкой и урне на основе толстостенной трубы без крышки представлены на рис. 6.

При испытаниях определялось избыточное давление во фронте воздушной ударной волны на расстояниях 1,5...3,0 м от места подрыва заряда ТНТ с использованием преобразователей давления ПД-7-1,5.

В результате обработки экспериментальных данных получена статистическая модель зависимости избыточного давления во фронте ВУВ от расстояния до точки подрыва с использованием метода наименьших квадратов. Было рассмотрено несколько видов функций $y = f(x, a, b, \dots)$

и выбрана функция, для которой суммарная погрешность

$$\sum_{i=1}^n [f(x, a, b, \dots) - y_i]^2$$

оказалась минимальной.

Вид статистической модели зависимости избыточного давления во фронте ВУВ от расстояния до точки подрыва представлен в табл. 4.

Анализ полученной статистической модели показывает, что эффективность взрывозащитной урны на основе газо-жидкостного диспергента с крышкой по уменьшению уровня избыточного давления во фронте ВУВ находится на уровне эффективности штатных устройств для защиты от взрыва модели «Фонтан» для заряда ТНТ соответствующей массы [12, 13].

Таким образом, для повышения антитеррористической защищенности мест массового скопления людей и объектов инфраструктуры целесообразно использовать взрывозащитные урны, защищающие от поражающих факторов взрыва, к



а



б

Рис. 6. Вид подрывов заряда ТНТ массой 2,0 кг в взрывозащитных урнах:

а — подрыв заряда ТНТ массой 2 кг в урне на основе газо-жидкостного диспергента с крышкой;

б — подрыв заряда ТНТ массой 2 кг в урне на основе толстостенной трубы без крышки

Таблица 4

Вид статистической модели зависимости избыточного давления во фронте ВУВ от расстояния

Вид статистической модели	Коэффициенты модели		Среднее отклонение, %	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент корреляции
	<i>a</i>	<i>b</i>			
$Y = ax / (b + x)$	19,180	-1,241	3	0,0007	0,995

Примечание: область определения аргумента от 1,5 до 3,0 м

числу которых относятся осколки, ударная волна, термическое воздействие и продукты детонации. Одними из перспективных направлений совершенствования конструкций взрывозащитных урн является использование в качестве демпфирующего слоя газо-жидкостного диспергента, который экспериментальным путем подтвердил свою эффективность.

Список источников

1. Мнение: Бостонские бомбы закладывались в урны. URL: <https://vz.ru/news/2013/4/16/628961.html?ysclid=lu4e5sc4j2577223532> (дата обращения: 20.08.2024).

2. Взрыв в Волгоградском вокзале: бомба лежала в урне для мусора. URL: <https://svetovid.livejournal.com/702.html> (дата обращения: 20.08.2024).

3. Бомбы в урнах. В Днепропетровске произошла серия взрывов. URL: <https://lenta.ru/articles/2012/04/27/blasts/?ysclid=lu4dgrtkaw748141255> (дата обращения: 20.08.2024).

4. Взрыв урны в центре Запорожья: пострадала девушка. URL: <https://www.vesti.ru/article/1871612?ysclid=m6esql8ofs753913347> (дата обращения: 20.08.2024).

5. Разработка урны-контейнера для защиты от взрывных устройств в местах массового скопления. URL: <http://sec4u.ru/text/1-analist/95/index.shtml> (дата обращения: 20.08.2024).

6. Петренко Е.С., Кузнецов А.В. Взрывобезопасные урны как один из методов повышения антитеррористической защищенности объектов городской и транспортной инфраструктуры в современных условиях // Спецтехника и связь. 2010. № 2–3. С. 31–34.

7. Хомик С.В., Гук И.В., Сильников М.В. и др. Ослабление сферической ударной волны перфорированной перегородкой в конической ударной трубе // Химическая физика. 2022. Т. 41. № 8. С. 88–92.

8. Хомик С.В., Гук И.В., Сильников М.В. и др. Моделирование взаимодействия сферической ударной волны со слоем насыпного материала в конической ударной трубе // Химическая физика. 2021. Т. 40. № 8. С. 63–69.

9. Отчет о НИР «Разработка теоретических основ и экспериментальное исследование материалов на основе гетерогенных сред для исполь-

зования в новом поколении систем защиты от взрыва. Создание новых многофазных гетерогенных материалов для использования в системах защиты от взрыва», шифр «Экран». СПб., ЗАО «НПО Спецматериалов», 2004. 75 с.

10. Михайлин А.И., Спивак А.И., Чернышов М.В. и др. Разработка и испытания комбинированных средств локализации поражающих факторов взрыва с эффектом направленного взрыва // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2011. № 7–8. С. 9–16.

11. Васильев Н.Н., Спивак А.И., Сазыкин А.М. и др. К вопросу снижения фугасного действия взрыва устройствами для защиты от взрыва «Фонтан» при срабатывании усиленных зарядов // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 5–6. С. 47–54.

12. Сильников М.В., Спивак А.И., Васильев Н.Н. и др. Экспериментальное исследование снижения фугасного действия взрыва устройствами защиты серии «Фонтан» при срабатывании усиленных зарядов // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2013. № 11–12. С. 28–36.

13. Чернышов М.В., Савелова К.Э., Капранова А.С., Яценко А.А. Численное моделирование взрывозащитных урн / XXVI Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям // Материалы докладов конференции, 27 июня–1 июля 2022 год, Санкт-Петербург. Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 85. С. 198–200.

14. Взрывобезопасная урна для мусора: пат. 2757732 Рос. Федерация. № 2021101490; заявл. 25.01.2021; опубл. 21.10.2021, Бюл. № 30. 9 с.

15. Урна-контейнер взрывостойкий: пат. 200645 Рос. Федерация. № 2020118016; заявл. 01.06.2020; опубл. 03.11.2020, Бюл. № 31. 3 с.

References

1. Opinion: Boston bombs were planted in ballot boxes. URL: <https://vz.ru/news/2013/4/16/628961.html?ysclid=lu4e5sc4j2577223532> (date of reference: 20.08.2024).

2. Explosion at Volgograd railway station: the bomb was in a garbage can. URL: <https://svetovid.livejournal.com/702.html>

vid.livejournal.com/702.html (date of reference: 20.08.2024).

3. Bombs in the urns. A series of explosions took place in Dnepropetrovsk. URL: <https://lenta.ru/articles/2012/04/27/blasts/?ysclid=lu4dgrtkaw748141255> (date of reference: 20.08.2024).

4. Explosion of an urn in the center of Zaporizhzhya: a girl was injured. URL: <https://www.vesti.ru/article/1871612?ysclid=m6esq18ofs753913347> (date of reference: 20.08.2024).

5. Development of an urn-container for protection against explosive devices in places of mass gathering. URL: <http://sec4u.ru/text/1-analist/95/index.shtml> (date of reference: 20.08.2024).

6. Petrenko E.S., Kuznetsov A.V. Explosion-proof urns as one of the methods to increase anti-terrorist security of urban and transport infrastructure objects in modern conditions // *Spetstekhnika i svyaziia*. 2010. No 2–3. Pp. 31–34.

7. Homik S.V., Guk I.V., Silnikov M.V. et al. Weakening of a spherical shock wave by a perforated baffle in a conical shock tube // *Chemical Physics*. 2022. T. 41. No 8. Pp. 88–92.

8. Homik S.V., Guk I.V., Silnikov M.V. et al. Modeling of interaction of a spherical shock wave with a layer of bulk material in a conical shock tube // *Chemical Physics*. 2021. T. 40. No 8. Pp. 63–69.

9. R&D report «Development of theoretical basis and experimental study of materials based on heterogeneous media for use in a new generation of explosion protection systems. Creation of new multiphase heterogeneous materials for use in explosion protection systems, cipher «Ekran». SPb., ZAO «NPO Spetsmaterialov», 2004. 75 p.

10. Mikhailin A.I., Spivak A.I., Chernyshov M.V. et al. Development and Testing of Combined Means of Localization of Explosion Affecting Factors with the Effect of Directed Explosion // *Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism*. 2011. No 7–8. Pp. 9–16.

11. Vasiliev N.N., Spivak A.I., Sazykin A.M. et al. To the question of reducing the fugitive action of the explosion by the devices for protection against explosion «Fountain» when triggering reinforced charges // *Defense Engineering Issues. Series 16. Technical means of countering terrorism*. 2014. No 5–6. Pp. 47–54.

12. Silnikov M.V., Spivak A.I., Vasiliev N.N. et al. Experimental study of the reduction of the fugitive action of the explosion by the shielding devices of the «Fountain» series at triggering of the reinforced charges // *Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism*. 2013. No 11–12. Pp. 28–36.

13. Chernyshov M.V., Savelova K.E., Kapralova A.S., Yatsenko A.A. Numerical modeling of explosion-proof urns / XXVI All-Russian Workshop with international participation on jet, breakaway and unsteady flows // *Proceedings of the conference, June 27 – July 1, 2022, St. Petersburg. Library of the journal «Voenmech. Vestnik BSTU»*, No 85. Pp. 198–200.

14. Explosion-proof garbage garbage can: pat. 275777732 Ros. Federation. No. 2021101490; avt. 25.01.2021; publ. 21.10.2021, Bulletin No. 30. 9 p.

15. Explosion-proof urn-container: patent. 200645 Ros. Federation. No. 2020118016; avt. 01.06.2020; publ. 03.11.2020, Bulletin No. 31. 3 p.

УДК 623.445.1

doi: 10.53816/23061456_2025_1–2_100

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПОВ ПРОТИВОМИННОЙ ЗАЩИТЫ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

DEVELOPMENT AND TESTING OF LOWER LIMBS MINE PROTECTION PROTOTYPES

О.А. Петрожицкая, О.С. Новак, канд. техн. наук И.В. Гук

О.А. Petrozhitskaya, O.S. Novak, Ph.D. I.V. Guk

НПО Спецматериалов

В статье представлены результаты разработки и испытаний прототипов индивидуальных средств противоминной защиты нижних конечностей. Прототипы представляют собой платформу для снижения ударно-дробящего действия взрыва с противоосколочным гамашем для защиты от осколочного потока. Были разработаны и испытаны несколько различных конструктивных вариантов индивидуальных средств защиты. Испытания проводились в полигонных условиях с использованием механического манекена (неразрушаемого имитатора нижней конечности) и калиброванных зарядов взрывчатого вещества. Были экспериментально определены усилия и ускорения, передающиеся на имитатор ноги со штатным ботинком. На основе полученных результатов сделаны выводы о перспективности конструкций индивидуальных средств противоминной защиты нижних конечностей и дальнейших путях их совершенствования.

Ключевые слова: противоминная защита, защита нижней конечности, противоминная платформа, противоосколочная защита, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, РУССИЛ.

The article presents the results of the development and testing of prototypes of individual means of mine protection of the lower extremities. The prototypes are a platform for reducing the impact-crushing effect of an explosion with anti-fragmentation gaiters to protect against fragmentation flow. Several design variants of personal protective equipment have been developed and tested. The tests were carried out in landfill conditions using a mechanical dummy (an indestructible simulator of the lower limb) and calibrated explosive charges. The forces and accelerations transmitted to the simulator with a standard boot were experimentally determined. Based on the results obtained, conclusions are drawn about the viability of the designs of individual mine protection equipment for the lower extremities and further ways to improve them.

Keywords: mine protection, lower limb protection, mine protection platform, fragmentation protection, ultrahigh molecular weight polyethylene, RUSSIL.

Введение

Несмотря на развитие механических средств разминирования — боевых машин (БМП-3

«Корт-Б», БМП-3М «Вепрь», 15М107 «Листва» и др.), дистанционно-управляемых роботов (ДУМ-Р «Уран-6», МГР-4 «Шмель» и др.), основная работа по обнаружению и обезврежива-

нию мин, неразорвавшихся боеприпасов и взрывных устройств производится саперами вручную. При такой работе существует значительный риск подрыва, травмы или гибели личного состава. Сапер, наступая на взрывное устройство или противопехотную мину нажимного действия, приводит ее в действие, в результате может произойти травматическая ампутация нижней конечности. Также существуют осколочные мины (ПОМ-3 и др.), оборудованные сейсмодатчиком и срабатывающие на расстоянии от сапера. Поэтому для защиты от ударно-дробящего действия взрыва и для защиты от осколочного потока разрабатывается противоминная обувь различной конструкции, например — в виде «паука» [1], «галoши», «платформы» [2], специального «ботинка» [3] или «сапога Шаповалова» (ПМО-1). Отсутствие единой, или хотя бы конструктивно схожей, конструкции указывает на то, что ни один из применяемых в настоящее время видов противоминной обуви не является оптимальным и не обеспечивает необходимый уровень защиты [4].

С целью разработки современной защиты сапера, в АО «НПО Спецматериалов» проводятся масштабные теоретические и практические изыскания [5]. В ходе таких проработок была предложена конструкция для защиты нижних конечностей в виде противоминных платформ с противоосколочными гамашами. Было изготовлено несколько прототипов различной конструкции и проведены их натурные испытания в полигонных условиях.

Противоминные платформы с противоосколочными гамашами

Основная задача средств индивидуальной защиты нижних конечностей — снижение ударно-дробящей нагрузки взрыва и защита от осколочного потока. В случае если подрыв происходит под ступней, при непосредственном контакте ноги со взрывным устройством или миной, необходимо защитить как опорную ногу, так и вторую ногу. При этом на опорную ногу в основном будет действовать бризантное и ударно-волновое действие взрыва, а на вторую ногу — ударно-волновое и осколочное действие. Если подрыв происходит на некотором расстоянии (свыше 20 радиусов заряда), то основным

поражающим фактором становится осколочный поток.

Исходя из особенностей травм нижних конечностей [6], были разработаны прототипы индивидуальных средств противоминной защиты, которые представляли собой противоосколочные гамашы, одевающиеся на ноги, обутые в штатные ботинки, к которым крепились противоминная платформа (рис. 1).

Задача гамаша — задержать осколочный поток и снизить ударно-волновую нагрузку на голеностоп, а задача платформы — снизить бризантное действие взрыва на нижнюю конечность в целом. Гамаш прикрепляется к ноге в ботинке через ремень с застежкой типа «контакт», затем нога в гамаше закрепляется на противоминной платформе с помощью ременных лент и пряжки. Противоосколочная защита [7] гамаша достигается за счет применения в его структуре достаточного количества слоев сверхвысокомолекулярного полиэтилена «РУССИЛ» [8, 9]. Масса гамаша составляла 455 ± 5 г.



а



б

Рис. 1: а — противоосколочный гамаш; б — противоминная платформа

В конструкции противоминной платформы и противоосколочного гамаша отсутствуют металлические детали для облегчения конструкции, уменьшения возможности травмирования и защиты от срабатывания детонаторов, реагирующих на металлические части. Всего было проработано 6 вариантов прототипов, отличающихся размером, конструкцией платформы, рисунком и глубиной протектора, а также применяющимися в них демпфирующими и взрывозащитными материалами, конструкция гамаша для всех прототипов была одинаковой. Высота всех прототипов противоминных платформ составляла 80 мм. В качестве наполнения применялись слои сверхвысокомолекулярного полиэтилена «РУССИЛ», пенополиуретана, пенополистирола и заполненные двухфазной гетерогенной средой [10, 11] капсулы.

Натурные испытания

Противовзрывные свойства средств индивидуальной бронезащиты обычно испытываются на полигонах, при подрывах калиброванных зарядов взрывчатых веществ, или в лабораторных условиях с использованием генераторов ударных волн — ударных труб [12], для регистрации параметров воздушных ударных волн используются массивы пьезодатчиков [13]. Такие подходы можно использовать для исследования противозрывных свойств средств индивидуальной защиты паха, бедер и в целом — участков тела человека, располагающихся выше середины бедра, но не при контактном подрыве мины под стопой. В таком случае основное поражение будет за счет бризантного, ударно-дробящего действия взрыва и затронуты будут в основном нижние конечности до середины бедра [14].

Для оценки защитных свойств разработанных прототипов были проведены натурные испытания в полигонных условиях при контактном подрыве мины под платформой. В отличие от численного моделирования, проведенного в работе [15], примененный подход позволяет, без построения сложных математических моделей, которые должны учитывать пластичность, повреждаемость, разрушение и другие физические процессы, получить практический результат и отработать наиболее перспективные конструкции защиты (рис. 2).



Рис. 2. Имитатор нижней конечности

Оценка защитных характеристик прототипов производилась по типовой методике, с помощью подрыва имитаторов мин ПФМ-1 (калиброванных зарядов ПВВ-5А массой 30 г и 40 г), которые устанавливались под противоминной платформой, закрепленной на испытательном стенде. Заряд взрывчатого вещества устанавливался в проекции платформы и прикапывался в уровень песка под пяткой ботинка, на который крепился противоминный сапог. При превышении пороговых значений показателей, которые для данного имитатора составляют 3000 g (ускорение) и 5 кН (усилие), нижней конечности наносятся травмы, ведущие к частичной или полной ампутации, и такой прототип считается не выдержавшим испытания.

На рис. 3 приведены фотографии и кадры видеосъемки с испытаний — прототип, закрепленный на стенде, до начала испытаний, во время подрыва и после подрыва.

На рис. 4 представлены сравнительные результаты испытаний противоминных платформ на воздействие 40 г и 30 г ПВВ-5А — получен-

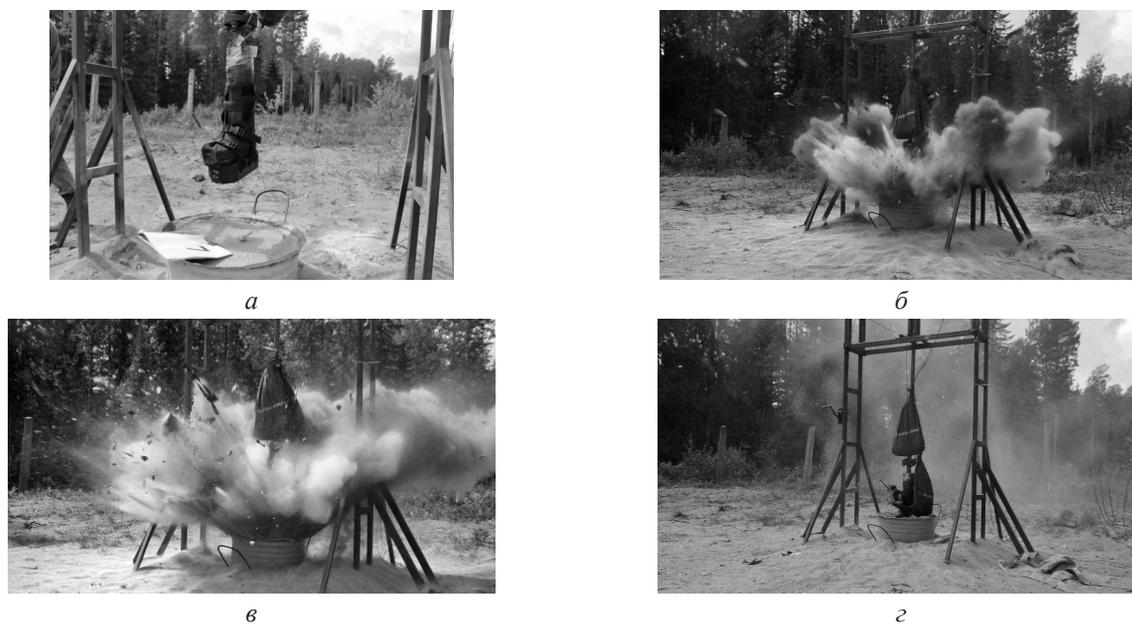


Рис. 3. Кадры фото- и видеосъемки процесса испытаний: а — прототип, установленный на стенде до начала испытаний; б, в — подрыв заряда; г — прототип после испытаний

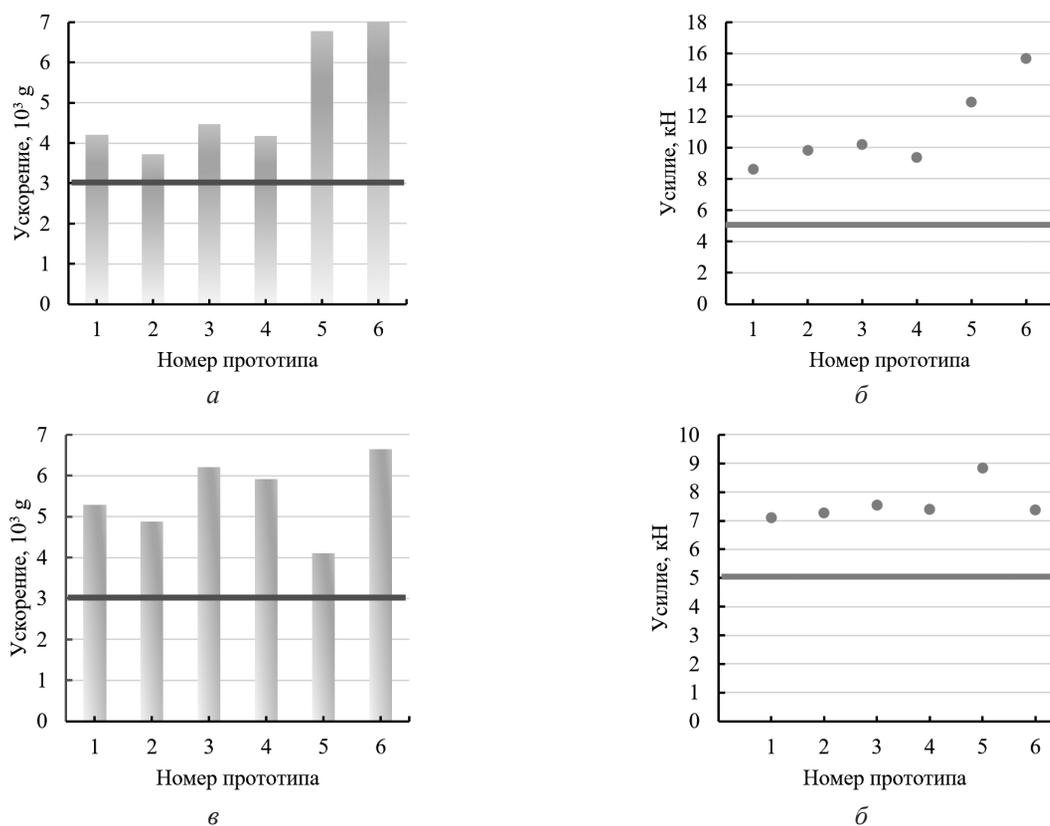


Рис. 4. Результаты испытаний:

а — ускорения, 40 г ПВВ-5А; б — усилия, 40 г ПВВ-5А; в — ускорения, 30 г ПВВ-5А; г — усилия, 30 г ПВВ-5А

ные пиковые величины ускорений и пиковые величины усилий для каждого опыта.

Горизонтальными линиями на графиках (рис. 4) отмечены пороговые значения усилий и ускорений. Механизм разрушения каждой из платформ был достаточно схожим. Как правило, пяточная часть, под которой устанавливался заряд, разрушалась практически полностью, не образуя крупные осколки, чего нельзя сказать про носовую часть платформы. При ее разрушении образовывались крупные частицы наполнения платформы и ее составляющих, которые разлетались на расстояние до 10–15 м. Расстояние метания отдельных частей застежек и пластиковых частей корпуса в некоторых случаях доходило до 40 метров.

Разница в значениях ускорений и усилий, передаваемых на практически идентичные образцы из одних и тех же пар зарядами в 40 г и 30 г объясняется, возможно, тем, что больший заряд ПВВ-5А в начале процесса детонации бризантным действием формирует в противоминной платформе сквозной канал истечения газов, в который уходит часть продуктов детонации. Это подтверждается кадром съемки испытаний образца № 3, представленным на рис. 5, на котором в момент подрыва видны горячие газы, прорвавшиеся в противоосколочный гамаш сквозь противоминную платформу.

Было установлено, что ни один из испытанных прототипов индивидуальной защиты нижних конечностей не прошел испытания. Наилучший результат из всех испытанных прототипов показал образец № 2 с «агрессивным» протектором, который позволил отвести в стороны часть расширяющихся продуктов детонации. Статистически значимого различия между применяющимися вариантами взрывозащитного наполнения платформы выявлено не было.

Выводы

Проведенные натурные испытания в полигонных условиях показали, что предложенные прототипы в целом не обеспечивают необходимый уровень защиты от ударно-дробящего действия взрыва при подрыве имитаторов мины ПФМ-1 под «пяткой» имитатора нижней конечности. Однако полученные результаты указывают на то, что проработанная конструкция является перспективной с точки зрения ее дальнейшего совершенствования, например — увеличения толщины взрывозащитного слоя. Также следующее направление исследований заключается в проработке и изучении степени (возможности) противоосколочной защиты при близком подрыве осколочных противопехотных мин и самодельных взрывных устройств.



Рис. 5. Фотокадр с испытаний образца № 3

Список источников

1. Chavet I., Madmoni A. Minefield shoe and method for manufacture thereof. U.S. Patent No. 6,751,892. 22 Jun. 2004.

2. Крайнюков П.Е., Хоминец В.В., Ляховец Г.А. и др. Разработка взрывозащитной обуви в ведущих странах мира // Зарубежное военное обозрение. 2023. № 4. С. 55–64.

3. Фуинака И. Исследование и конструирование взрывозащитной обуви, ее изготовление и испытание: Технический отчет отделения материально-технического обеспечения ВС США: Пер. с англ. / И. Фуинака, Дж. Макдональд. — Иллинойс, 1966. 241 с.

4. Денисов А.В., Анисин А.В., Логаткин С.М., Демченко К.Н., Медико-биологические аспекты развития средств индивидуальной защиты сапера // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 1–2 (115–116). С. 116–124.

5. Сильников М.В., Химичев В.А. Средства индивидуальной бронезащиты. СПб.: Фонд «Университет», 2000. 480 с.

6. Денисов А.В., Хоминец В.В., Логаткин С.М. и др. Разработка шкалы оценки тяжести минно-взрывных ранений защищенных нижних конечностей человека // Вестник Российской Военно-медицинской академии. 2021. № 3 (23). С. 195–204.

7. Васильева С.Н., Денисов А.В., Гук И.В. Модель оценки поражения живой силы в средствах индивидуальной бронезащиты // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 5–6 (167–168). С. 76–84.

8. Kalganov D.A., Silnikov N.M., Guk I.V., Mikhailin A.I. et al. Dynamical Young's Modulus and Internal Friction in Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Composites. Rev. Adv. Mater. Technol. 2022. Vol. 4, No 1. Pp. 14–20.

9. Сильников Н.М., Новак О.С., Шифрина В.Ю. Повышение защитных характеристик специальных изделий за счет применения полимерной брони // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 7–8 (181–182). С. 122–128.

10. Сильников М.В., Гук И.В., Михайлин А.И., Шишкин В.Н. Экспериментальное

и теоретическое исследование эффективности действия технических устройств на основе гетерогенной двухфазной среды для подавления поражающих факторов подводного взрыва // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2018. № 1 (101). С. 59–68.

11. Сильников М.В., Михайлин А.И., Шишкин В.Н., Гук И.В. Экспериментальное исследование эффективности действия технических средств на основе гетерогенной двухфазной среды для защиты от подводного взрыва // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 5–6 (119–120). С. 58–65.

12. Васильева С.Н., Гук И.В., Денисов А.В. и др. Исследование подходов и методов оценки воздействия воздушных ударных волн на биологические объекты / В сборнике: «Актуальные проблемы защиты и безопасности». Труды XXVII Всероссийской научно-практической конференции // Т. 2. «Технические средства предупреждения чрезвычайных ситуаций и противодействия терроризму». Санкт-Петербург, 2024. С. 86–90.

13. Пучков А.С., Гук И.В., Спивак А.И., Васильева С.Н. К вопросу применения цифровых измерителей скорости ударных волн для регистрации уровня избыточного давления во фронте воздушной ударной волны при полигонных испытаниях устройств для защиты от взрыва // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2024. № 1 (131). С. 139–148.

14. Анисин А.В., Денисов А.В., Божченко А.П. и др. Особенности взрывной травмы нижних конечностей, защищенных обувью сапера // Судебно-медицинская экспертиза. 2020. № 5. С. 13–17.

15. Денисов А.В., Матвейкин С.В., Заикин С.В. и др. Применение математической модели нижней конечности человека для моделирования ударно-волнового воздействия контактного взрыва // Вестник Российской Военно-медицинской академии. 2024. № 3 (26). С. 337–348.

References

1. Chavet I., Madmoni A. Minefield shoe and method for manufacture thereof. U.S. Patent No 6,751,892. 22 Jun. 2004.

2. Krainyukov P.E., Khominets V.V., Lyakhovets G.A. et al. Development of explosion-proof

shoes in leading countries of the world. Foreign military review. 2023. No 4. Pp. 55–64.

3. Fuinaka I., McDonald J. Research and design of explosion-proof shoes, their manufacture and testing: Technical report of the Department of Logistics of the US Armed Forces: Translated from English. Illinois, 1966. 241 p.

4. Denisov A.V., Anisin A.V., Logatkin S.M., Demchenko K.N. Medical and biological aspects of the development of personal protective equipment for sappers // Questions of equipment. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2018. No 1–2 (115–116). Pp. 116–124.

5. Silnikov M.V., Khimichev V.A. Personal protective equipment. St. Petersburg: University Foundation. 2000. 480 p.

6. Denisov A.V., Khominets V.V., Logatkin S.M. et al. Development of a scale for assessing the severity of mine-explosive wounds of protected lower extremities of a person // Bulletin of the Russian Military Medical Academy. 2021. No 3 (23). Pp. 195–204.

7. Vasilyeva S.N., Denisov A.V., Guk I.V. A model for assessing the destruction of manpower in personal armor protection equipment // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2022. No 5–6 (167–168). Pp. 76–84.

8. Kaganov D.A., Silnikov N.M., Guk I.V., Mikhailin A.I. et al. Dynamical Young's Modulus and Internal Friction in Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Composites. Rev. Adv. Mater. Technol. 2022. Vol. 4. No 1. Pp. 14–20.

9. Silnikov N.M., Novak O.S., Shifrina V.Yu. Increasing the protective characteristics of special products through the use of polymer armor // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 7–8 (181–182). Pp. 122–128.

10. Silnikov M.V., Guk I.V., Mikhaylin A.I., Shishkin V.N. Experimental and theoretical study of the effectiveness of technical devices based on a heterogeneous two-phase medium to suppress the damaging factors of an underwater explosion // Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. 2018. No 1 (101). Pp. 59–68.

11. Silnikov M.V., Mikhailin A.I., Shishkin V.N., Guk I.V. Experimental investigation of the effectiveness of technical means based on a heterogeneous two-phase medium for protection against underwater explosion // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2018. No 5–6 (119–120). Pp. 58–65.

12. Vasilyeva S.N., Guk I.V., Denisov A.V. et al. Research of approaches and methods for assessing the impact of air shock waves on bio-objects. In the collection: Current problems of protection and security. Proceedings of the XXVII All-Russian Scientific and Practical Conference. Vol. 2. Tekhnicheskie sredstva preduprezhdeniya protivodejstviya terrorizmu. St. Petersburg, 2024. Pp. 86–90.

13. Puchkov A.S., Guk I.V., Spivak A.I., Vasilyeva S.N. On the issue of using digital shock wave velocity meters to register the level of overpressure in the air shock wave front during field tests of explosion protection devices // Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. 2024. No 1 (131). Pp. 139–148.

14. Anisin A.V., Denisov A.V., Bozhchenko A.P. et al. Features of explosive trauma of the lower extremities protected by sapper shoes // Forensic medical examination. 2020. No 5. Pp. 13–17.

15. Denisov A.V., Matveikin S.V., Zaikin S.V. et al. Application of a mathematical model of the human lower limb for modeling the shock-wave effects of a contact explosion // Bulletin of the Russian Military Medical Academy. 2024. No 3 (26). Pp. 337–348.

УДК 352/354

doi: 10.53816/23061456_2025_1–2_107

**УЧЕБНЫЙ ПУНКТ УПРАВЛЕНИЯ КАК НОВАЯ ФОРМА
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМ В ПОДГОТОВКЕ
ВОЕННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ**

**TRAINING CONTROL ROOM AS A NEW FORM OF AUTOMATED TRAINING
SYSTEMS IN THE TRAINING OF MILITARY SPECIALISTS**

*Канд. техн. наук И.Ш. Шафигуллин, канд. техн. наук М.А. Александров,
канд. техн. наук А.М. Зубачев*

Ph.D. I.Sh. Shafigullin, Ph.D. M.A. Aleksandrov, Ph.D. A.M. Zubachev

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

В статье рассматривается вопрос создания учебного командного пункта, являющегося организованным автоматизированным рабочим местом (или их совокупностью) для информационно-аналитической работы по поддержке принятия решений на основе визуализации оперативной информации и ее аналитической обработки и обеспечивающего коллективные действия группы лиц при решении проблем управления как в реальном, так и в учебном масштабе времени. Описываются особенности функционирования учебного пункта управления, его основные задачи, уровни и элементы, рассмотрены типовые режимы работы. Предлагается функционирование учебного пункта управления в связке с автоматизированным лабораторным стендом эмуляции процессов управления при решении задач групповых принятий решений, для формирования соответствующих компетенций по работе с системами управления.

Ключевые слова: учебный пункт управления, подготовка военных специалистов, автоматизированный лабораторный стенд эмуляции.

The article discusses the issue of creating a training command post, which is an organized automated workplace (or a combination of them) for information and analytical work to support decision-making based on visualization of operational information and its analytical processing and providing collective actions of a group of people when solving management problems both in real and in training time. Features of operation of the training control room, its main tasks, levels and elements are described, standard operating modes are considered. It is proposed to operate a training control room in conjunction with an automated laboratory stand for emulating control processes, when solving group decision-making tasks, to form appropriate competencies for working with control systems.

Keywords: training control room, training of military specialists, automated laboratory emulation bench.

Накопленный мировой опыт, тенденции развития системы военного образования в Вооруженных силах Российской Федерации (ВС РФ), а также анализ истории совершенствования систе-

мы военного управления позволяют прогнозировать в будущем значительное увеличение числа и роста функциональных возможностей учебных пунктов управления (УПУ), создаваемых,

в частности, в интересах подготовки специалистов в области управления эксплуатацией вооружения, военной и специальной техники.

В статье под УПУ рассматривается многофункциональная специальная организационно-техническая система, представляющая собой комплекс особым образом организованных автоматизированных рабочих мест (АРМ) для информационно-аналитической работы по поддержке принятия решений на основе визуализации оперативной информации и ее аналитической обработки и обеспечивающих коллективные действия группы лиц при решении проблем управления как в реальном, так и в учебном масштабе времени. На практике УПУ может представлять собой совокупность помещений, оснащенных средствами коммуникаций и совокупностью программно-технических средств, предназначенных для оперативного управления, контроля и мониторинга различных объектов, ситуаций и функций [1, 6].

Современные веяния развития военного образования требуют все более широкого использования в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий (компьютерных симуляций, деловых и ролевых игр, разбор конкретных ситуаций, практикумов, психологических и иных тренингов) в сочетании с внеаудиторной работой. При этом удельный вес занятий, проводимых в интерактивных формах, определяется главной целью основной образовательной программы подготовки специалиста, особенностью контингента обучающихся, содержанием конкретных дисциплин, и в целом в учебном процессе они должны составлять не менее 30 % аудиторных занятий.

Современные требования к специалистам в области управления эксплуатацией вооружения, военной и специальной техники диктуют новые подходы к организации учебного процесса, и одной из форм комплексной реализации этих методов предлагается рассматривать применение УПУ, а также вопросы, связанные с необходимостью, возможностью и целесообразностью их использования как новой формы автоматизированной обучающей системы для подготовки специалистов.

Основными задачами УПУ могут определены такие как [2, 7]:

– поддержка ресурсами и средствами разнообразных активных форм проведения занятий

с возможностью ролевого выполнения соответствующих функций с применением экспертного оценивания, имитационного моделирования, оптимизационных методов, специальных разделов математики;

– проведение деловых игр в форме тактико-специальных учений; всевозможных тренингов в виде групповых упражнений; анализ конкретных ситуаций (case-study) на практических занятиях;

– обучение персонала УПУ использованию современных информационных, аналитических и технологических средств;

– стендовая отработка интеллектуальных информационно-коммуникационных технологий и создание прототипов рабочих технологий органов военного управления;

– поддержка ресурсами и средствами научно-исследовательских и информационно-аналитических работ, проводимых в вузах.

Под УПУ, с одной стороны, можно понимать средство подготовки большого числа специалистов, способных работать в коллективном режиме при условии невозможности или экономической невыгодности индивидуального обучения (на отдельных рабочих местах), а с другой стороны, УПУ (как это и рассматривается в статье) — современный инструмент для обучения по проблемам, требующим применения достаточно мощных информационно-коммуникационных технологий (вычислительных, информационных, интеллектуальных, аналитических) [3, 8].

Необходимо отметить, что в настоящее время стандартная структура УПУ не нашла широкого применения, а в образовании используется его техническая составляющая (аудиовизуальное и коммуникационное оборудование). В ряде вузов создаются мультимедийные аудитории, техническое оснащение которых позволило сформировать особую учебную аудиовизуальную среду, обеспечив возможности использовать во время занятий видеозаписи, ТВ-трансляции, проводить сеансы видеоконференцсвязи, поддерживать синхронный перевод и протоколирование хода обсуждения, извлекать информацию из баз данных, баз знаний и геоинформационных систем.

Пространственная структура УПУ может включать зал принятия решений, зал дежурной смены, помещения учебной группы управле-

ния, помещение службы IT-обеспечения, а также другие помещения. В рамках УПУ все эти помещения в ряде случаев могут быть сведены до размеров ситуационной комнаты с выделенными АРМ для решения определенных задач, связанных, например, с принятием управленческих решений, компьютерным моделированием, экспертной оценкой выводов и предложений, вопросами визуализации информации, мониторингом обстановки, информационным обеспечением и т.д.

Принципиально важно подчеркнуть, что создание УПУ не сводится к закупке современной компьютерной, коммуникационной и презентационной техники. Для работы комплекса нужны все уровни и элементы системы, а именно квалифицированный преподавательский и инженерный состав, современная системная аналитика, развитая программная и техническая инфраструктура (рис. 1).

Анализ истории разработки и использования подобных объектов показывает, что создание, эксплуатация и развитие любого УПУ требует решения комплекса проблем: организационных, финансовых, научно-теоретических, научно-технических, технологических. Для УПУ эти проблемы дополняются методическими и дидактическими, которые расширяют спектр общих научно-теоретических проблем.

Следует отметить, что устоявшегося взгляда на то, какое программное обеспечение необходимо в УПУ, пока нет, универсальные подходы на все случаи жизни в этой области отсутствуют, особенно в области специального программно-

го обеспечения. Еще более актуальными представляются исследования в области применения специального программного обеспечения визуализации информации.

К основным задачам по созданию и развитию УПУ можно отнести следующие:

– разработка концепции дидактико-методического обеспечения как среды обучения групповому принятию решений, а также компонентов данного обеспечения для проведения активных форм проведения занятий (деловых игр в форме тактико-специальных учений, анализа конкретных ситуаций (case-study) на практических занятиях, всевозможных тренингов в виде групповых упражнений и т.п.) с обучающимися различных видов и форм обучения, их апробирование в реальном учебном процессе;

– стендовая отработка интеллектуальных информационно-коммуникационных технологий как инструмента учебной деятельности в данной среде;

– разработка рекомендаций по применению информационно-коммуникационных технологий в учебном процессе.

При этом применение УПУ, например, в связке с автоматизированным лабораторным стендом эмуляции процессов управления (рис. 2) при эксплуатации технических комплексов и систем (макетным стендом) посредством средств аудиовизуальных коммуникаций представляется особенно эффективным при решении совместных задач групповых принятий решений для формирования соответствующих компетенций по работе с системами управления [4, 5, 10].



Рис. 1. Уровни и элементы УПУ

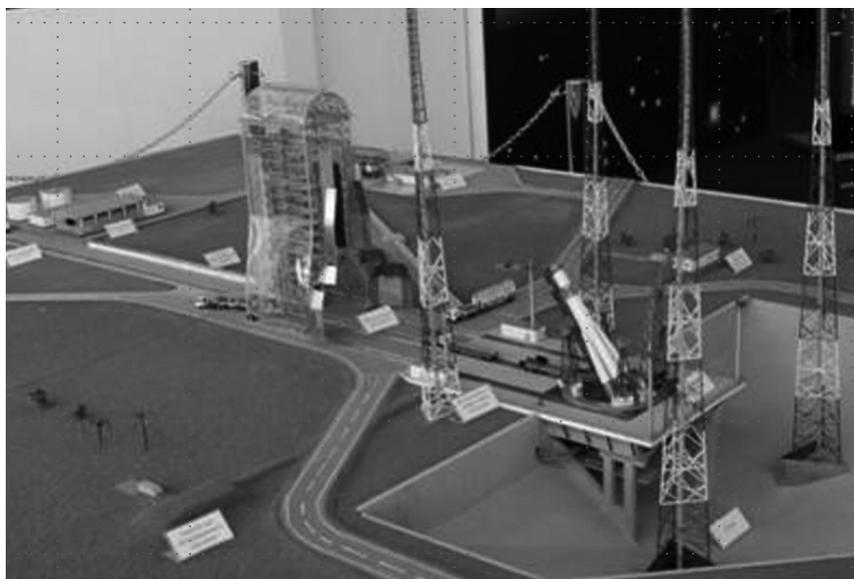


Рис. 2. Макетный автоматизированный лабораторный стенд эмуляции процессов управления эксплуатационными процессами

Ни один учебник, ни одна компьютерная программа не в состоянии заменить работу в лаборатории. Именно макетные стенды дают учащимся возможность проверить теорию практикой, сформировать профессиональные навыки и приобрести необходимые компетенции. Изготовленные по новейшим технологиям лабораторные стенды могут придать процессу обучения особый смысл и интерес, позволят ощутить атмосферу эксплуатационных процессов на технике при их ролевом выполнении [11–15].

Методическим обеспечением учебного процесса в УПУ можно рассматривать:

- сценарии проведения конкретных занятий, описания используемых методов, моделей, алгоритмов и программ;
- режиссерские сценарии проведения конкретных занятий;
- типовые сценарии проведения активных видов занятий;
- типовые сценарии поддержки коллективных действий на этапах решения проблем;
- модели проблемных ситуаций и сценариев проведения конкретных занятий для отображения в базе учебного контента.

Типовыми режимами работы УПУ планируется рассматривать:

- режим экспромта, как произвольная последовательность этапов работы участников, характерная для их коллективной деятельности;

- сценарный режим разрешения проблемных ситуаций, не относящихся к экстремальным, — априори заданная и организованная последовательность этапов работы участников (для каждого этапа определены последовательность, содержание, формы представления данных на коллективные и индивидуальные средства отображения информации) [9];

- сценарный режим разрешения чрезвычайных проблемных ситуаций в среде УПУ должен быть ориентирован, прежде всего, на имитацию деятельности некоторого органа управления в кризисных и чрезвычайных ситуациях;

- режим повседневной деятельности, включающий работу по поддержанию готовности УПУ к выполнению им основных функций (профилактика, тренировка и повышение квалификации обслуживающего персонала, применение новых средств групповой поддержки и т.д.).

Создание УПУ представляет следующие преимущества [4, 5]:

- возможность предоставления пользователям обобщенной информации и анализа агрегированных данных;
- наличие средств прогнозирования, выявления тенденций развития исследуемого явления или процесса;
- применимость ситуационного (динамического) моделирования для получения ответа на вопрос «что будет, если», в котором моделирова-

ние позволяет вносить возмущения и определять возможные последствия, связанные с наступлением того или иного события;

– формирование рекомендаций по выбору одного из многих вариантов решения (алгоритмы поиска наилучшего решения);

– возможность проведения оценки рисков при расчете шансов реализации прогноза.

Заключение

Таким образом, УПУ можно использовать для приобретения компетенций по управлению, определению и оценке кризисных ситуаций, а также для понимания принципов работы и процессов моделируемой системы на автоматизированных макетных стендах эмуляции. Для моделирования различных процессов может использоваться широкий класс систем имитационного, математического, графического и физического моделирования. При этом только в совместном (интегрированном) использовании различных систем может проявиться преимущество УПУ, позволяющее комплексировать практикумы на базе различных дисциплин с учетом конкретных специализаций.

Список источников

1. Малин А.С., Мухин В.И. Исследование систем управления: учебник для вузов. М.: ГУ ВШЭ, 2012. 400 с.

2. Шафигуллин И.Ш., Плеханов Ю.Л. Особенности прикладного решения задач антикризисного управления в области анализа слабоструктурированных данных при применении экспертных систем // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2020. Выпуск 4. С. 72–76.

3. Латфуллин Г.Р., Райченко А.В. Теория организации: учебник. СПб.: Питер, 2004. 395 с.

4. Шафигуллин И.Ш., Плеханов Ю.Л. Пример прикладного решения задачи планирования подготовки персонала к эксплуатации технических средств с применением системы календарного планирования и контроля // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2022. Выпуск 4. С. 108–114.

5. Привалов А.Е., Дудалев Г.В., Александров М.А. Повышение эффективности планирования деятельности космодрома в интегрированной автоматизированной системе управления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 10. С. 517–525.

6. Шафигуллин И.Ш., Зубачев А.М., Кубуша А.В., Кузнецов В.В. Системы управления организационно-технических систем космического назначения: учеб. пособие. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. 150 с.

7. Теория систем и системный анализ в управлении организациями: справочник: учеб. пособие; под ред. В.Н. Волковой и А.А. Емельянова. М.: Финансы и статистика, 2012. 848 с.

8. Шафигуллин И.Ш., Плеханов Ю.Л., Зубачев А.М. Предложения по формированию базы знаний экспертной системы пункта управления для решения задач ситуационного управления в области анализа слабоструктурированных данных // Вестник Академии военных наук. 2021. № 2 (75). С. 85–91.

9. Минаков Е.П., Шафигуллин И.Ш., Зубачев А.М. Методы исследования эффективности применения организационно-технических систем космического назначения: учебник. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. 244 с.

10. Ильин Н.И., Демидов Н.Н., Новикова Е.В. Ситуационные центры. Опыт, состояние, тенденции развития. М.: Медиа Пресс, 2011. 336 с.

11. Пророк В.Я., Скирда В.С. Анализ и постановка задачи синтеза рациональной структуры учебно-тренировочных средств для подготовки военных специалистов // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2016. № 650. С. 199–203.

12. Козинев И.А. Автоматизация подготовки расчетов радиоэлектронных средств управления космическими аппаратами на основе современных информационных технологий // I-methods. 2014. Т. 6. № 1. С. 10–13.

13. Ильиных А.А. Развернутая у нас сеть командных пунктов самая современная // Вестник военного образования. 2019. № 5 (20). С. 9–12.

14. Нидзиев И. Проблематика развития компьютерных форм обучения, боевой и оперативной подготовке в ВМФ на современном этапе // Морской сборник. 2010. № 11 (1964). С. 19–25.

15. Тикшаев В.Н., Байбаков А.В., Тезиков А.Н. Активно применяя систему учебных

командных пунктов. Подготовка системных специалистов воздушно-космической обороны на основе единой системы учебных командных пунктов академии // Вестник военного образования. 2023. № 2 (41). С. 12–16.

References

1. Malin A.S., Mukhin V.I. Study of management systems: a textbook for universities. M.: State university higher school of economics, 2012. 400 p.
2. Shafigullin I.Sh., Plekhanov Yu.L. Features of the applied solution of anti-crisis management problems in the field of analysis of semi-structured data when using expert systems // Bulletin of the Russian New University. 2020. Issue 4. Pp. 72–76.
3. Latfullin G.R., Raichenko A.V. Theory of organization: textbook. St. Petersburg: Peter, 2004. 395 p.
4. Shafigullin I.Sh., Plekhanov Yu.L. Example of an applied solution to the task of planning personnel training for the operation of technical means using a scheduling and control system // Bulletin of the Russian New University. Series: Complex Systems: Models, Analysis and Management. 2022. Issue 4. Pp. 108–114.
5. Privalov A.E., Dudalev G.V., Alexandrov M.A. Increasing the efficiency of planning the activities of the cosmodrome in an integrated automated control system // Izvestia Tula State University. Technical sciences. 2018. No 10. Pp. 517–525.
6. Shafigullin I.Sh., Zubachev A.M., Kubusha A.V., Kuznetsov V.V. Control systems of organizational and technical systems for space purposes: a textbook. St. Petersburg: VKA named after A.F. Mozhaysky, 2015. 150 p.
7. Systems Theory and Systems Analysis in Organization Management: Handbook: A Textbook/ Ed. V.N. Volkova and A.A. Emelyanova. M.: Finance and Statistics, 2012. 848 p.
8. Shafigullin I.Sh., Plekhanov Yu.L., Zubachev A.M. Proposals for the formation of a knowledge base of the expert system of the control room for solving problems of situational management in the field of analysis of semi-structured data // Bulletin of the Academy of Military Sciences. 2021. No 2 (75). Pp. 85–91.
9. Minakov E.P., Shafigullin I.Sh., Zubachev A.M. Methods for studying the effectiveness of the use of organizational and technical systems for space purposes: textbook. St. Petersburg: VKA named after A.F. Mozhaysky, 2016. 244 p.
10. Ilyin N.I., Demidov N.N., Novikova E.V. Situation centers. Experience, state, development trends. M.: Media Press, 2011. 336 p.
11. Prorok V.Ya., Skirda V.S. Analysis and statement of the problem of synthesis of the rational structure of training means for training military specialists // Proceedings of A.F. Mozhaysky Military Space Academy. A.F. Mozhaysky. 2016. No 650. Pp. 199–203.
12. Kozinov, I.A. Automation of the calculation preparation of the spacecraft radio-electronic control equipment on the basis of modern information technologies // I-methods. 2014. T. 6. No 1. Pp. 10–13.
13. Ilinykh A.A. Our network of command posts is the most modern // Bulletin of Military Education. 2019. No 5 (20). Pp. 9–12.
14. Nidziev I. Problematics of development of computer-based forms of training, combat and operational training in the Navy at the present stage // Naval Collection. 2010. No 11 (1964). Pp. 19–25.
15. Tikshaev V.N., Baibakov A.V., Tezиков A.N. Actively applying the system of training command centers. Training of system specialists of air and space defense on the basis of a unified system of training command posts of the Academy // Bulletin of Military Education. 2023. No 2 (41). Pp. 12–16.

УДК 623.454.53; 623.775; 662.175

doi: 10.53816/23061456_2025_1–2_113

**МАСКИРУЮЩИЕ АЭРОЗОЛИ
В НЕЛЕТАЛЬНЫХ СРЕДСТВАХ ПОРАЖЕНИЯ НАРУШИТЕЛЕЙ
MASKING AEROSOLS IN NON-LETHAL MEANS OF DESTRUCTION
OF VIOLATORS**

Е.И. Кветкин¹, канд. техн. наук С.И. Косяков¹, В.С. Филиппов²

E.I. Kvetkin, Ph.D. S.I. Kosyakov, V.S. Filippov

¹12 ЦНИИ Минобороны России, ²12 Главное управление Минобороны России

Представлены результаты физического и математического моделирования аэрозольной завесы в охраняемом помещении при сгорании пиротехнического состава. Продемонстрирован масштабный эффект увеличения времени существования аэрозольной завесы при увеличении объема помещения и неизменной дальности видимости в дыму. Эффект обусловлен опережающим увеличением количества тепла, инжектируемого в помещение с дымом (пропорционально объему помещения) по сравнению с количеством тепла, отводимого в стены, пол и потолок помещения при остывании дыма (пропорционально их площади). Показано влияние формы аэрозолей на характеристики аэрозольной завесы. Продемонстрированный масштабный эффект следует учитывать как при оценке результатов испытаний генераторов аэрозолей, так и при планировании применения генераторов аэрозолей в охраняемых помещениях.

Ключевые слова: аэрозоль, видимость, генератор, дым, завеса, масштабный эффект, форма.

The results of physical and mathematical modeling of an aerosol curtain in a guarded room during the combustion of pyrotechnic composition are presented. The large-scale effect of increasing the lifetime of an aerosol curtain with an increase in the volume of the room and a constant range of visibility in smoke is demonstrated. The effect is due to an outstripping increase in the amount of heat injected into the room with smoke (in proportion to the volume of the room) compared to the amount of heat released into the walls, floor and ceiling of the room when the smoke cools (in proportion to their area). The influence of the shape of aerosols on the characteristics of an aerosol curtain is shown. The demonstrated large-scale effect should be taken into account both when evaluating the test results of aerosol generators and when planning the use of aerosol generators in protected areas.

Keywords: aerosol, visibility, generator, smoke, curtain, scale effect, shape.

Генераторы аэрозолей (ГА) широко применяются при охране объектов и предотвращении доступа к ним, освобождении от террористов зданий, объектов, территорий и заложников, нейтрализации имеющих в распоряжении нарушителей средств поражения [1]. К ГА (рис. 1) относятся не только пиротехнические дымовые шашки и

гранаты [2], но также и дым-машины, осуществляющие испарение аэрозолеобразующих жидкостей на основе смеси пропиленгликоля или триэтиленгликоля с дистиллированной водой [3]. Эффективность применения ГА определяется временем, в течение которого аэрозольная завеса (АЗ) обеспечивает заданную дальность видимости L

[2, 3]. То есть АЗ должна как можно быстрее устанавливаться и как можно дольше существовать, оказывая дезориентирующее воздействие на нарушителя и скрывая (маскируя) предмет охраны.

Время установки АЗ зависит от способа создания аэрозольного облака, а время ее существования — от свойств аэрозолей и внешних условий, под влиянием которых аэрозоль рассеивается. При применении ГА на открытой местности внешними условиями являются ветер и дождь. При применении ГА в помещении внешними условиями становится интерьер помещения, при соприкосновении с которым АЗ остывает, а аэрозоль рассеивается [4].

Независимо от типа ГА (дым-машины, дымовые гранаты или мины) и типа аэрозолеобразующего вещества (аэрозолеобразующие жидкость или пиротехнический состав) для инжектирования этого вещества в охраняемое помещение ему необходимо сообщить определенное количество тепловой энергии $Q \sim M$ (при испарении или сгорании), пропорциональное массе M инжектированного вещества.

Дальность видимости L (или степень маскирования предмета охраны) в АЗ в пределах 25 % зависит от формы аэрозольных частиц и обратно пропорциональна массовой концентрации Φ аэрозоля [2]:

– для изометрических частиц

$$L = 2 / \Phi, \text{ м}; \quad (1)$$

– для вытянутых частиц в форме нитей или игл

$$L = 2,5 / \Phi, \text{ м}. \quad (2)$$

То есть, в помещениях разного объема V для создания АЗ с одинаковой видимостью $L = \text{const}$

необходимо обеспечить одинаковую массовую концентрацию аэрозоля $\Phi = M / V = \text{const}$. Значит, в помещения разного объема V необходимо не только инжектировать разную массу $M = \Phi \cdot V$ аэрозолеобразующего вещества, но также затратить разное количество тепла $Q \sim M$. Несмотря на это, нагрев ΔT аэрозольной среды в помещениях будет одинаковым, так как $\Delta T \sim Q / V \sim M / V \sim \Phi = \text{const}$.

В результате возникает масштабный эффект увеличения времени существования АЗ (маскирования предмета охраны) в помещении при увеличении его объема V и неизменной дальности видимости L в дыму. Эффект обусловлен опережающим увеличением количества тепла Q , инжектируемого в помещение с аэрозолем (пропорционально объему или кубу характерного размера помещения), по сравнению с количеством тепла, отводимого в стены, пол и потолок помещения при остывании АЗ (пропорционально их площади или квадрату характерного размера помещения).

Другими словами, при неизменной дальности видимости $L = \text{const}$ в АЗ и соответствующих неизменных массовой концентрации $\Phi = \text{const}$ аэрозоля и его нагреве $\Delta T = \text{const}$, время остывания АЗ будет увеличиваться при увеличении объема V помещения. Соответственно будут увеличиваться и время, в течение которого в помещении существуют восходящие конвективные потоки воздуха, и время удержания аэрозоля в парящем состоянии этими потоками, и время существования АЗ.

Влияние масштабного эффекта на время существования АЗ демонстрируется на рис. 2 результатами физического и математического моделирования внутренней тепловой гравитационной конвекции АЗ. Физическое моделирование АЗ осуществлялось в боксе (рис. 3)



Рис. 1. Способы применения генераторов аэрозолей

размерами $4 \times 1,6 \times 1,5$ м ($x_1 \times x_2 \times x_3$). В боксе у его обоих торцов напротив друг друга на расстоянии $d = 0,5$ м размещались средства регистрации — светодиодные лампы SBL-GU5.3 и люксометры LX-1108. Координаты ($x_1 \times x_2 \times x_3$) ламп ($1,34 \times 0,8 \times 0,75$) и ($2,73 \times 0,78 \times 0,74$), а люксометров — ($0,82 \times 0,8 \times 0,75$) и ($3,23 \times 0,78 \times 0,74$). Бокс задымлялся при сгорании в центре пола пиротехнического состава курящегося типа (рис. 1). По мере просветления аэрозоля периодически определялась освещенность E люксометров, а по формуле $D = \lg(E_0 / E) / d$ при известной начальной освещенности E_0 люксометров оценивалась оптическая плотность D АЗ. Из известных значений D по формулам [2],

– для изометрических частиц

$$\Phi = \begin{cases} 9,87 \cdot D(t)^{1,33} & \text{при } D \leq 0,3; \\ 19 \cdot D(t)^{1,8} & \text{при } D > 0,3, \end{cases} \text{ г/м}^3;$$

– для нитевидных частиц

$$\Phi = 2,66 \cdot D(t)^{1,16}, \text{ г/м}^3;$$

оценивалась массовая концентрация Φ аэрозоля. Одновременно по показаниям термопары оценивался нагрев аэрозоля ΔT . Термопара размещалась в точке ($2,08 \times 0,78 \times 0,94$). На рис. 2 символами 1 представлены опытные дан-

ные по изменению температуры ΔT и массовой концентрации Φ аэрозоля в боксе при сгорании в нем 46,16 г пиротехнического состава.

Графиками (2) и (3) на рис. 2 отмечены результаты математического моделирования. Расчеты проводились по уравнениям Рейнольдса в переменных скорость–давление–температура–плотность [4, 5]. Турбулентные характеристики воздуха определялись по двухпараметрической $k - \varepsilon$ модели турбулентности [4, 5]. Поведение аэрозоля ввиду его малой концентрации в воздухе предполагалось пассивным. Аэрозоль разделялся на 2 группы. Частицы одной группы считались полностью увлекающимися несущим потоком воздуха [5]. Частицы второй группы диаметром $d_p = 1,5$ мкм и плотностью $\rho_p = 1,7 \cdot 10^3$ кг/м³ считались инерционными и осаждающимися из несущего их потока [6].

Графиками 2 демонстрируются результаты расчета АЗ для условий опыта. Линиями 3 на рис. 2 отмечены результаты решения аналогичной задачи, но когда размеры бокса увеличены в 2 раза, до значений $8 \times 3,2 \times 3$ м, а его объем — в 8 раз. Соответственно в 8 раз, до 368 г увеличена масса сгорающего пиротехнического состава. Аналогичным образом линиями 2 и 3 на рис. 4 показано изменение дальности видимости L в АЗ. Значения L оценены по формуле 1 для освещения предмета охраны со стороны

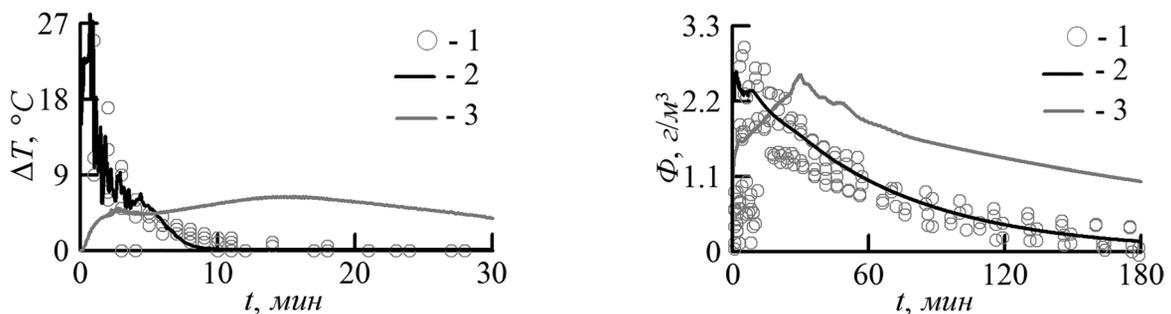


Рис. 2. Изменение в боксе параметров АЗ, созданной изометрическими аэрозолями

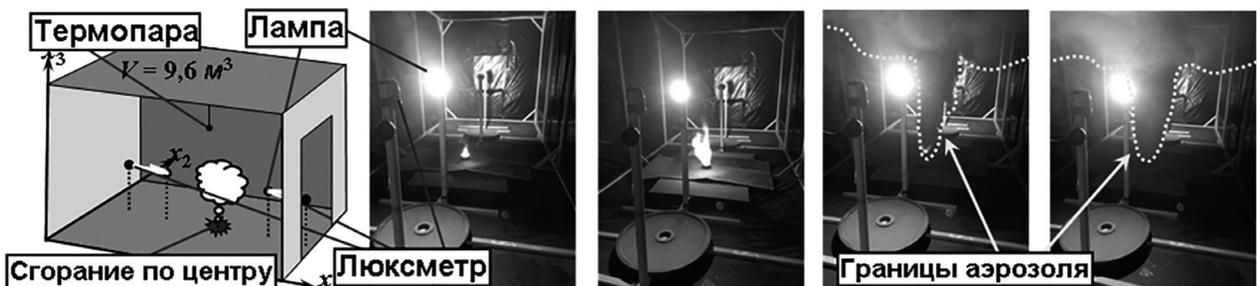


Рис. 3. Условия физического моделирования АЗ

нарушителя [2]. Совокупность графиков на рис. 2 и 4 иллюстрирует существо масштабного эффекта, при котором и время остывания АЗ, и время существования АЗ (маскирования предмета охраны) увеличиваются при увеличении объема V помещения, в котором применяется ГА.

Форма аэрозольных частиц также довольно заметно влияет на АЗ. Например, согласно формулам (1) и (2) дальность видимости L в нитевидном аэрозоле на 25 % больше дальности видимости L в изометрическом аэрозоле. Но скорость осаждения V_p нитевидных частиц (рис. 5) меньше скорости осаждения V_p изометрических частиц [7],

$$V_p = \frac{9,8 d_p^2 \rho_p}{12 \mu \cdot \chi} \text{ и } V_p = \frac{9,8 d_p^2 \rho_p}{18 \mu}, \quad (3)$$

где d_p и ρ_p — диаметр и плотность частиц;

μ — динамический коэффициент вязкости воздуха.

Коэффициент формы χ нитевидных частиц зависит от отношения размеров частиц $\beta = l_p / d_p$ и может составлять десятки...сотни единиц (рис. 6). Соответственно, скорость осаждения нитевидных частиц меньше скорости осаждения изометрических частиц одинакового диаметра d_p . Это отличие проявляется во времени, в течение которого существует АЗ, обеспечиваются заданная дальность видимости L в АЗ и сокрытие (маскирование) предмета охраны от нарушителя.

Поскольку различные пиротехнические составы продуцируют изометрические частицы в форме сферы и многогранника (у которых все три размера примерно одинаковы) или вытянутые частицы в форме нитей и игл (у которых один размер много больше двух других, рис. 5), то для

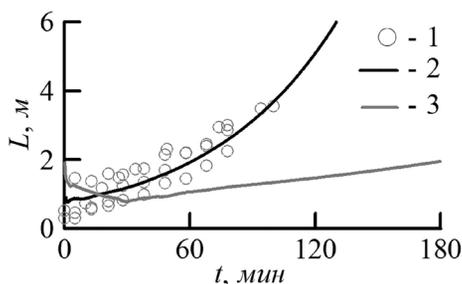


Рис. 4. Изменение в помещениях разного объема дальности видимости в АЗ, созданной изометрическими аэрозолями

демонстрации влияния формы аэрозольных частиц на АЗ вновь было проведено физическое и математическое моделирование внутренней тепловой гравитационной конвекции АЗ.

Условия физического и математического моделирования были аналогичны предыдущим и показаны на рис. 3. Отличие состояло в сжигании в боксе 25,71 г дымового состава, продуцирующего нитевидный аэрозоль. На рис. 7 символами 1 представлены результаты опыта с нитевидным аэрозолем, а символами 2 — результаты опытов с изометрическим аэрозолем, ранее показанные на рис. 2. Здесь же графиками 3 представлены результаты расчетов для нитевидного аэрозоля, а графиками 4 — для изометрического аэрозоля, также ранее показанные на рис. 2 линиями 2.

Сопоставление указанных опытных и расчетных данных свидетельствует, что несмотря на практически одинаковое остывание аэрозольной среды в боксе нитевидные частицы 1 витали в 2 раза дольше, чем изометрические частицы 2. Этот эффект описан формулами (3). Сопоставление указанных формул дает коэффициент формы χ вытянутых частиц аэрозоля, равный $\chi = 1,5$. Исходя из графика на рис. 6 получаем отношение длины l_p вытянутой частицы к ее диаметру d_p равное $\beta = l_p / d_p = 2,5$. То есть результаты расчетов 3 на рис. 7 свидетельствуют, что сред-

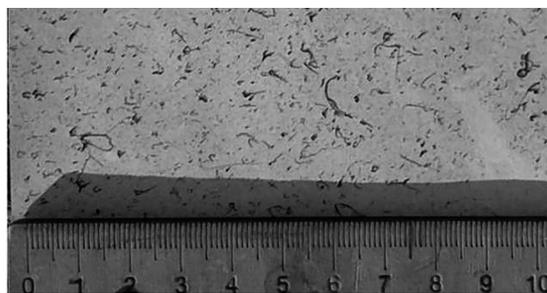


Рис. 5. Внешний вид нитевидных дымовых частиц

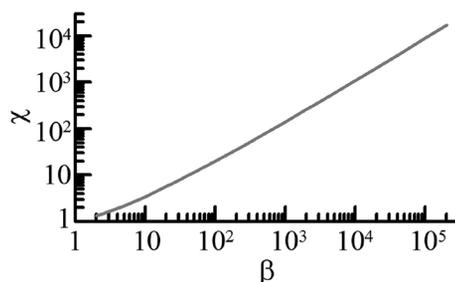


Рис. 6. Значения коэффициента формы для нитевидных аэрозольных частиц [7]

няя длина нитевидных частиц аэрозоля в опыте должна была составлять $l_p \approx 3,75$ мкм при среднем диаметре частиц $d_p \approx 1,5$ мкм. С другой стороны, согласно исследованиям [8] для частицы, по форме близкой к круглому цилиндру диаметром d_p и длиной l_p , коэффициент формы χ в уравнении (3) выражается формулой $\chi = 100,7/l_p$. Тогда средняя длина нитевидных частиц аэрозоля в опыте должна была составлять $l_p \approx 100,7/\chi \approx 66,7$ мкм.

Результаты представленных опытов и тестовых расчетов свидетельствуют, что математическое моделирование внутренней тепловой гравитационной конвекции АЗ в постановке, воспроизводящей условия опытов, позволяет восстановить более точную картину формирования в охраняемом помещении АЗ. В данном случае видно, что в опыте с изометрическим аэрозолем в боксе витали частицы среднего размера $d_p \approx 1,5$ мкм, а в опыте с нитевидным аэрозолем в течение довольно длительного времени (1...3 часа) витали частицы со средней длиной $l_p \approx 3,75...66,7$ мкм.

На рис. 8 графиками 3 и 4 показано изменение в экспериментальном боксе дальности видимости L в АЗ, созданной нитевидными и изометрическими аэрозолями. В расчетах значения L оценены по формулам (1) и (2) для освещения предмета охраны со стороны нарушителя [2].

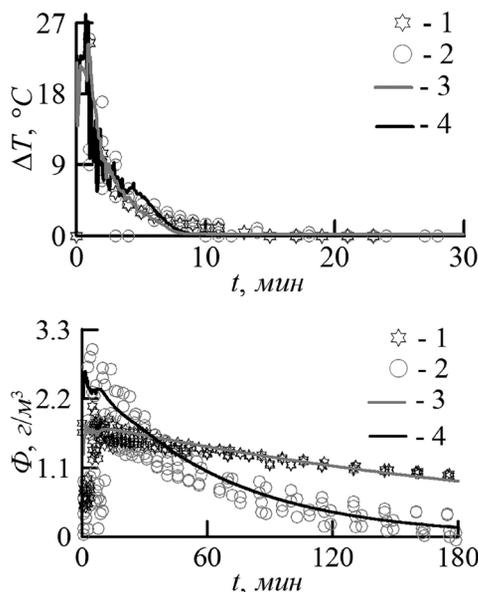


Рис. 7. Изменение в боксе параметров АЗ, созданной нитевидными и изометрическими аэрозолями

Сопоставление всей совокупности экспериментальных и расчетных данных на рис. 2, 4, 5, 7 и 8 свидетельствует о существенном влиянии на АЗ и внешних условий, и формы самих аэрозолей при применении в охраняемом помещении ГА в качестве нелетальных средств поражения нарушителей. В этом состоит существенное отличие в постановке АЗ на открытой местности и внутри охраняемого помещения.

Так, создание АЗ в охраняемом помещении, при соприкосновении с интерьером которого аэрозоль остывает и рассеивается, приводит к довольно длительному (в течение 0,5...1 часа, рис. 4) ограничению видимости в помещении в пределах $L = 1 \dots 2$. Использование в АЗ нитевидных аэрозолей повысит длительность ограничения видимости в помещении (рис. 8). То есть применение в охраняемом помещении в качестве нелетальных средств поражения нарушителей ГА, продуцирующих нитевидные аэрозоли, может привести к более длительному ограничению видимости L в помещении. То есть АЗ будет дольше оказывать дезориентирующее воздействие на нарушителя и скрывать (маскировать) предмет охраны. Отсюда следует предложение об использовании в дымовых нелетальных средствах поражения нарушителей веществ, продуцирующих нитевидные аэрозоли.

Продемонстрированный в настоящей статье масштабный эффект взаимодействия нагретой АЗ с интерьером помещения следует учитывать при оценке результатов испытаний ГА. Испытания ГА обычно проводят в боксах небольшого объема [5, 6]. При этом параметры назначения ГА оценивают по времени, в течение которого обеспечивается заданная дальность видимости L в АЗ (рис. 4 и 8). Неучет масштабного эффекта или формы аэрозолей приведет к перерасходу ресурсов (например, количества аэрозолеобразую-

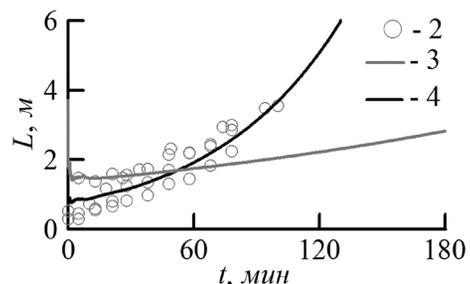


Рис. 8. Изменение в боксе дальности видимости в АЗ, созданной аэрозолями разной формы

щего вещества), обеспечивающих выполнение ГА требований к его параметрам назначения. Это же следует учитывать и при планировании применения ГА в охраняемых помещениях. Иначе помещение будет задымлено на большее время, что может создать затруднения при нейтрализации в нем нарушителей (террористов).

Результаты настоящего исследования будут полезны для специалистов родственных дисциплин (отраслей наук) — например, занимающихся пожарной безопасностью, созданием и введением технических средств пожарной охраны (дальности видимости в дымах пожаров).

Список источников

1. Бабкин А.В., Велданов В.А., Грязнов Е.Ф. и др. Средства поражения и боеприпасы: учебник; под общ. ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.

2. Филиппов В.С., Кветкин Е.И., Косяков С.И. Обоснование способа применения дымовых гранат в помещениях военных объектов // Боеприпасы XXI век. 2023. № 2. С. 231–234.

3. Пурис А.М., Косяков С.И., Сильников М.В., Филиппов В.С. Обоснование способа применения и режима эксплуатации дымовых машин при охране военных объектов // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 1–2 (163–164). С. 103–108.

4. Кветкин Е.И., Филиппов В.С., Пурис А.М., Косяков С.И. Анализ результатов испытаний дымовой гранаты посредством математического моделирования внутренней гравитационной конвекции дыма // Боеприпасы XXI век. 2022. № 2. С. 111–116.

5. Пурис А.М., Федоров Д.С., Косяков С.И., Матросов В.Н. Моделирование внутренней гравитационной конвекции аэрозольной среды при взрыве дымовой гранаты // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 1–2 (151–152). С. 46–52.

6. Пурис А.М., Федоров Д.С., Косяков С.И., Чернопрудов Д.М. Моделирование дымовой завесы в охраняемом помещении // Вопросы оборон-

ной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 1–2 (151–152). С. 91–97.

7. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1965. 380 с.

8. Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М.: Гос. изд-во технико-теоретической лит., 1955. 520 с.

References

1. Babkin A.V., Veldanov V.A., Gryaznov E.F. et al. Weapons and ammunition: Textbook; Under the editorship of V.V. Selivanov. M.: Publishing MGTU im. N.Uh. Bauman, 2008. 984 p.

2. Filippov V.S., Kvetkin E.I., Kosyakov S.I. Substantiation of the method of using smoke grenades in the premises of military facilities // Ammunition XXI century. 2023. No 2. Pp. 231–234.

3. Puris A.M., Kosyakov S.I., Silnikov M.V., Filippov V.S. Justification of the method of application and mode of operation of smoke machines for the protection of military facilities // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2022. No 1–2 (163–164). Pp. 103–108.

4. Kvetkin E.I., Filippov V.S., Puris A.M., Kosyakov S.I. Analysis of smoke grenade test results by mathematical modeling of internal gravitational smoke convection // Ammunition XXI century. 2022. No 2. Pp. 111–116.

5. Puris A.M., Fedorov D.S., Kosyakov S.I., Matrosov V.N. Modeling of the internal gravitational convection of an aerosol medium during a smoke grenade explosion // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2021. No 1–2 (151–152). Pp. 46–52.

6. Puris A.M., Fedorov D.S., Kosyakov S.I., Chernoprudov D.M. Simulation Of A Smoke Screen In A Protected Area // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2021. No 1–2 (151–152). Pp. 91–97.

7. Fuchs N.A. Mechanics of aerosols. M.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1965. 380 p.

8. Slezkin N.A. Dynamics of a viscous incompressible liquid. M.: State Publishing House of Technical and theoretical Literature, 1955. 520 p.

УДК 667.6

doi: 10.53816/23061456_2025_1–2_119

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ
МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ ТЕХНИКИ СПЕЦИАЛЬНОГО
НАЗНАЧЕНИЯ С УЧЕТОМ ЕГО ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ДЕФЕКТНОСТИ**

**THEORETICAL DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE
STRUCTURE OF A MULTILAYER COATING OF SPECIAL-PURPOSE
EQUIPMENT, TAKING INTO ACCOUNT ITS MANUFACTURING DEFECTS**

Канд. техн. наук А.Ю. Андриюшкин, Н.Ю. Хмелевской, А.Н. Шишленин

Ph.D. A.Yu. Andryushkin, N.Yu. Khmelevskoy, A.N. Shishlenin

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Надежность и живучесть техники специального назначения зависит от качества нанесенных на нее покрытий. Повышение качества покрытия достигается его послойным формированием из единичных слоев малой толщины. Производственная дефектность многослойного покрытия зависит от параметров структуры: число единичных слоев, и толщина единичного слоя. Проведено нормирование производственных дефектов покрытий. Предложена методика оценки производственной дефектности покрытия с учетом опасности дефектов различного вида. Разработан стохастический механизм образования дефектов в покрытии. Получены выражения для теоретического определения параметров структуры многослойного покрытия с учетом его производственной дефектности. Показано влияние производственной дефектности покрытия на число единичных слоев и толщину единичного слоя.

Ключевые слова: многослойное покрытие, производственная дефектность, дефект, нормирование, отказ, предельное состояние.

The reliability and survivability of special-purpose equipment depends on the quality of the coatings applied to it. Improving the quality of the coating is achieved by its layer-by-layer formation from single layers of small thickness. The production defectiveness of a multilayer coating depends on the structure parameters: the number of single layers and the thickness of a single layer. Standardization of production defects in coatings was carried out. A method for assessing the production defectiveness of a coating is proposed, taking into account the danger of various types of defects. A stochastic mechanism for the formation of defects in the coating has been developed. Expressions are obtained for the theoretical determination of the parameters of the structure of a multilayer coating, taking into account its production defects. The influence of manufacturing defects in the coating on the number of single layers and the thickness of a single layer is shown.

Keywords: multilayer coating, manufacturing defect, defect, rationing, failure, limit condition.

Для обеспечения надежности и живучести техники специального назначения широко применяются различные покрытия, показатели качест-

ва которых (прочность, водопоглощение, износостойкость, коррозионная стойкость) обусловлены производственной дефектностью. Чаще всего из-

за усадочных явлений нанесенное на основу (подложку) покрытие подвержено растяжению, при этом случайно возникающие несплошности (поры, трещины, расслоения) неравномерно распределены по объему покрытия. Таким образом, разрушение покрытия из-за развития производственных дефектов носит вероятностный характер.

Количество дефектов и их размеры обусловлены технологией формирования покрытия, а также технологическими параметрами процесса. Конкретная технология характеризуется плотностью дефектов, то есть числом производственных дефектов, образующихся в объеме покрытия. Отклонения технологических параметров от оптимальных значений приводят к росту числа дефектов, а также возрастает вероятность появления недопустимых дефектов больших размеров, обуславливающих опасное событие: отказ покрытия по определенному показателю качества или наступление предельного состояния покрытия (разрушение покрытия), приводящего технику специального назначения в неработоспособное состояние [1–5].

Различные производственные дефекты по-разному влияют на показатели качества покрытия. Пористость полимерных покрытий в 1 % снижает прочность на 5 %, а усталостную долговечность — на 50 %. Поверхностные трещины снижают статическую прочность от 5 до 50 %, разнотолщинность покрытия уменьшает прочность от 5 до 25 % [3–7].

Снизить производственную дефектность покрытия можно последовательным нанесением на основу (подложку) единичных слоев, толщиной $H_{сл}$, достигая необходимой толщины покрытия (рис. 1):

$$H_{пок} = N_{сл} \cdot H_{сл}, \quad (1)$$

где $H_{пок}$ — толщина покрытия, м;

$N_{сл}$ — число единичных слоев, шт.;

$H_{сл}$ — толщина единичного слоя, м.

При формировании единичного слоя размер дефекта не может превышать его толщину. Кроме того, при нанесении последующего слоя материалом заполняются поверхностные дефекты (поры, трещины, сколы) предыдущего слоя. В многослойном покрытии вероятность появления недопустимых крупных дефектов уменьшается с увеличением числа единичных слоев. Поэтому актуально теоретическое определение

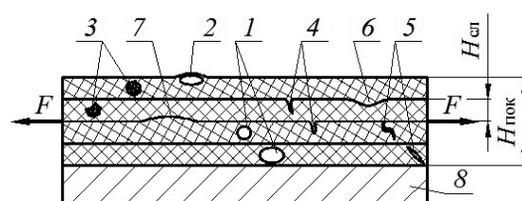


Рис. 1. Дефекты многослойного покрытия:
1 — пора; 2 — вздутие; 3 — инородное включение;
4 — поверхностная трещина; 5 — внутренняя трещина; 6 — вмятина; 7 — наплыв;
8 — подложка (основа); $H_{пок}$ — толщина покрытия;
 $H_{сл}$ — толщина единичного слоя;
 F — сила, растягивающая покрытие

параметров структуры (число единичных слоев и толщина единичного слоя) многослойного покрытия техники специального назначения с учетом его производственной дефектности.

Цель исследования: установление влияния производственной дефектности на структуру многослойного покрытия.

Задачи исследования.

1. Нормирование дефектов и оценка производственной дефектности покрытия.
2. Оценка опасности производственных дефектов различного вида.
3. Разработка стохастического механизма образования дефектов в покрытии.
4. Определение параметров структуры многослойного покрытия с учетом его производственной дефектности.

Нормирование дефектов и оценка производственной дефектности покрытия

Рассмотрим производственный дефект с характерной площадью s . Введем множество нормированных значений размеров производственного дефекта $S_{норм}$, определяющих состояние покрытия, $S_{норм} = \{S_{гар}, S_{отк}, S_{пред}\}$ [8, 9]:

– при размере $s \leq S_{гар}$, где $S_{гар}$ — максимальная площадь дефекта, не влияющая на показатели качества покрытия;

– при $S_{гар} < s \leq S_{отк}$ размер дефекта находится в поле допуска, его наличие не приводит к отказу покрытия, где $S_{отк}$ — максимальная площадь дефекта, не приводящая к отказу покрытия по определенному показателю качества;

– при $S_{отк} < s \leq S_{пред}$ наблюдается отказ покрытия по показателю качества, но оно не переходит

в предельное состояние, где $S_{\text{пред}}$ — максимальная площадь дефекта, не приводящая к предельному состоянию покрытия по показателю качества;

– при $S_{\text{пред}} < s$ наблюдается предельное состояние покрытия по показателю качества, эксплуатация техники специального назначения с таким покрытием опасна и нецелесообразна.

Дефект с размерами $S_{\text{отк}} < s \leq S_{\text{пред}}$ влияет на надежность техники специального назначения (наступает отказ), а с размерами $s > S_{\text{пред}}$ — на безопасность и живучесть техники специального назначения (наступает предельное состояние). При формировании покрытия производственный дефект с размером $S_{\text{отк}} < s$ является недопустимым.

При большой площади покрытия его контроль проводят, предварительно разбив ее на одинаковые контролируемые участки (рис. 2) [8, 9]:

$$S_{\text{уч}} = \frac{S_{\text{пок}}}{N_{\text{уч}}},$$

где $S_{\text{пок}}$ — площадь всего покрытия, м²;

$S_{\text{уч}}$ — площадь одного участка покрытия, м²;

$N_{\text{уч}}$ — число участков покрытия, шт.

При нарушении технологии формирования покрытия обычно возникают множественные производственные дефекты определенного вида, например, область, состоящая из множества пор. Если расстояние между дефектами $L_{\text{мдеф}}$ меньше трехкратного максимального размера самого крупного дефекта, то эти множественные дефек-

ты рассматриваются как один групповой дефект. Если расстояние между дефектами $L_{\text{мдеф}}$ больше трехкратного максимального размера самого крупного дефекта, то дефекты рассматриваются отдельно, как два дефекта (рис. 2). В зависимости от расстояния между дефектами их разбивают на единичные и групповые дефекты [8, 9]:

$$N_{\text{деф}} = N_{\text{едеф}} + N_{\text{гдеф}},$$

где $N_{\text{деф}}$ — число производственных дефектов в покрытии, шт.;

$N_{\text{едеф}}$ — число единичных производственных дефектов, шт.;

$N_{\text{гдеф}}$ — число групповых производственных дефектов, шт.

Далее находят площадь каждого единичного $S_{\text{едеф}}$ и каждого группового дефекта $S_{\text{гдеф}}$ [8, 9]:

$$S_{\text{гдеф}} = L_{\text{деф}} \cdot B_{\text{деф}},$$

где $S_{\text{гдеф}}$ — площадь группового производственного дефекта определенного вида, м²;

$L_{\text{деф}}, B_{\text{деф}}$ — длина и ширина группового дефекта, равная расстоянию между двумя наиболее удаленными дефектами в рассматриваемом направлении.

Производственная дефектность покрытия (рис. 2) [9]:

$$g_{\text{деф}} = \frac{1}{N_{\text{уч}}} \cdot \sum_i^{N_{\text{уч}}} g_{\text{деф уч}} \leq [g_{\text{деф}}],$$

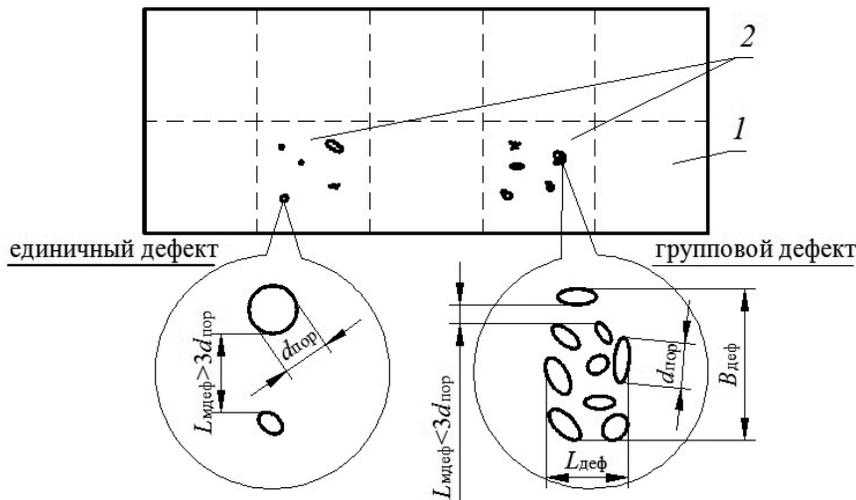


Рис. 2. Схема разбивки покрытия на контрольные участки: $d_{\text{пор}}$ — диаметр наибольшей поры; $L_{\text{мдеф}}$ — расстояние между соседними дефектами; 1 — контролируемый участок; 2 — участок с дефектами

где $g_{\text{деф}}$ — производственная дефектность покрытия;

$g_{\text{деф}_{\text{уч}}}$ — производственная дефектность участка;

$[g_{\text{деф}}]$ — допускаемая производственная дефектность покрытия.

Производственная дефектность участка [9]:

$$g_{\text{деф}_{\text{уч}}} = \sum_i^{N_{\text{вд}}} (g_{\text{деф}_{\text{вд}_i}} \cdot k_{\text{опас}_{\text{вд}_i}}), \quad (2)$$

где $g_{\text{деф}_{\text{вд}_i}}$ — производственная дефектность определенного вида на участке;

$N_{\text{вд}}$ — число видов производственных дефектов на участке;

$k_{\text{опас}_{\text{вд}_i}}$ — коэффициент опасности, характеризующий вид производственного дефекта.

Производственная дефектность определенного вида на участке $g_{\text{деф}_{\text{вд}_i}}$ [9]:

$$g_{\text{деф}_{\text{вд}_i}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{елеф}}} S_{\text{елеф}_i} + \sum_{j=1}^{N_{\text{галеф}}} S_{\text{галеф}_j}}{S_{\text{уч}}} = \frac{S_{\text{деф}_{\text{уч}}}}{S_{\text{уч}}},$$

где $g_{\text{деф}_{\text{вд}_i}}$ — производственная дефектность определенного вида на участке;

$S_{\text{елеф}}$ — площадь единичного производственного дефекта определенного вида, м^2 ;

$S_{\text{деф}_{\text{уч}}}$ — площадь производственных дефектов определенного вида на участке, м^2 .

Определяемая по выражению (2) производственная дефектность участка $g_{\text{деф}_{\text{уч}}}$ учитывает размеры, количество, виды производственных дефектов, а также их опасность, путем приведения к эквивалентной относительной площади (эквивалентной относительной длине или объему или другому аналогичному показателю).

Далее выявляют участок с максимальной производственной дефектностью $g_{\text{деф}_{\text{уч}}}^{\text{max}}$, при этом покрытие можно считать годным, если

$$g_{\text{деф}_{\text{уч}}}^{\text{max}} \leq [g_{\text{деф}_{\text{уч}}}],$$

где $[g_{\text{деф}_{\text{уч}}}]$ — допускаемая производственная дефектность участка. Если на участке выявлен один дефект, то оценивают его максимальную площадь S_{max} и сопоставляют с нормированным значением площади $S_{\text{норм}}$, должно выполняться условие $S_{\text{max}} \leq S_{\text{норм}}$ [9].

По результатам производственного контроля покрытия можно оценить объемную плотность дефектности, характеризующую конкретную технологию формирования покрытия:

$$\rho_{\text{деф}} = \frac{g_{\text{деф}}}{W_{\text{пок}}} = \frac{g_{\text{деф}}}{S_{\text{пок}} \cdot H_{\text{пок}}},$$

где $\rho_{\text{деф}}$ — объемная плотность дефектности покрытия, м^{-3} ;

$W_{\text{пок}}$ — объем покрытия, м^3 .

Таким образом, нормированы дефекты покрытий, предложена методика оценки дефектности покрытия.

Оценка опасности производственных дефектов различного вида

Опасность производственных дефектов неодинакова, вид дефекта специфически влияет на показатели качества покрытия. Например, производственные дефекты многих видов являются в той или иной мере концентраторами напряжений, но при этом их воздействие на прочность покрытия различно. Охарактеризовать опасность производственного дефекта конкретного вида можно коэффициентом опасности $k_{\text{опас}_{\text{вд}}}$, входящим в выражение (2) [9].

Для нормирования опасности производственных дефектов разного вида выбирают базовый вид дефекта, например пору, и принимают ее коэффициент опасности равным единице, то есть $k_{\text{опас}_{\text{пор}}} = 1$. Зная производственную дефектность определенного вида и производственную дефектность пор, можно найти коэффициент опасности [9]:

$$k_{\text{опас}_{\text{вд}}} = \frac{g_{\text{деф}_{\text{пор}}}}{g_{\text{деф}_{\text{вд}}}}, \quad (3)$$

где $k_{\text{опас}_{\text{вд}}}$ — коэффициент опасности, характеризующий вид производственного дефекта;

$g_{\text{деф}_{\text{пор}}}$ — производственная дефектность пор;

$g_{\text{деф}_{\text{вд}_i}}$ — производственная дефектность определенного вида.

Коэффициенты опасности для пор (прямая 1) и для трещин (прямая 2), можно определить по их влиянию, например, на прочность покрытия (рис. 3).

С увеличением производственной дефектности прочность покрытия уменьшается, при этом минимально допускаемое значение прочности $[\sigma_{\min}]$ достигается для пор при дефектности $g_{\text{деф,пор}} = 20\%$, а для трещин — $g_{\text{деф,тр}} = 5\%$. Учитывая, что для пор $k_{\text{опас,пор}} = 1$, тогда коэффициент опасности для трещин $k_{\text{опас,тр}}$ определим по выражению (3):

$$k_{\text{опас,тр}} = \frac{g_{\text{деф,пор}}}{g_{\text{деф,тр}}} = \frac{20}{5} = 4.$$

Таким образом, коэффициент опасности $k_{\text{опас,ад}}$ характеризует вид производственного дефекта и позволяет оценить дефектность покрытия, в котором находятся дефекты различного вида (поры, трещины, расслоения, сколы и другие).

Стохастический механизм образования дефектов в покрытии

Предположим, что растяжению силой F подвергается покрытие с объемной плотностью дефектности $\rho_{\text{деф}}$ (рис. 1), в объеме покрытия дефекты распределены по закону редких событий или распределению Пуассона. Если в произвольном объеме W покрытия имеется хотя бы один дефект, характерный размер которого превышает нормированное значение $s > S_{\text{норм}}$, то наблюдается соответствующее событие, например, отказ покрытия $s > S_{\text{отк}}$ или наступление предельного состояния $s > S_{\text{пред}}$ (разрушение покрытия). Вероятность появления дефекта с размером $s > S_{\text{норм}}$ [10–16]:

$$P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}}) = 1 - \int_0^{S_{\text{норм}}} f(s) ds, \quad (4)$$

где $P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}})$ — вероятность появления дефекта с размером $s > S_{\text{норм}}$;

$S_{\text{норм}}$ — нормированная площадь производственного дефекта, м^2 ;

$f(s)$ — плотность вероятности распределения размеров обнаруженных производственных дефектов в покрытии.

$$V(s > S_{\text{норм}} / W) = \sum_{N_{\text{деф}}} \left(P_{N_{\text{деф}}} \cdot (P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}}))^{N_{\text{деф}}} \right) = \sum_{N_{\text{деф}}} \frac{(\rho_{\text{деф}} \cdot W)^{N_{\text{деф}}}}{N_{\text{деф}}!} \cdot \exp(-\rho_{\text{деф}} \cdot W) \cdot (P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}}))^{N_{\text{деф}}} = 1 - \exp\left(-\rho_{\text{деф}} \cdot W \cdot (P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}}))\right), \quad (6)$$

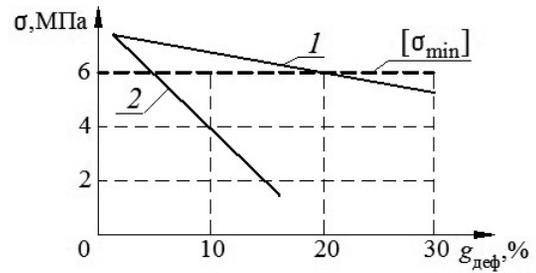


Рис. 3. Зависимость прочности покрытия от производственной дефектности определенного вида: 1 — поры; 2 — трещины; $g_{\text{деф}}$ — производственная дефектность; $[\sigma_{\min}]$ — минимально допускаемая прочность покрытия

Примем, что плотность вероятности распределения размеров обнаруженных производственных дефектов в покрытии подчиняется распределению Вейбулла [10–16]:

$$f(s) = \frac{m}{\theta} \cdot \left(\frac{s}{\theta}\right)^{(m-1)} \cdot \exp\left(-\left(\frac{s}{\theta}\right)^m\right), \quad (5)$$

где θ , m — параметр масштаба и параметр формы ($m > 0$) распределения Вейбулла.

По закону Пуассона вероятность того, что в произвольном объеме W покрытия находится $N_{\text{деф}}$ дефектов [15, 16]:

$$P_{N_{\text{деф}}} = \frac{\rho_{\text{деф}} \cdot W}{N_{\text{деф}}!} \cdot \exp(-\rho_{\text{деф}} \cdot W),$$

где $P_{N_{\text{деф}}}$ — вероятность нахождения $N_{\text{деф}}$ дефектов в произвольном объеме W покрытия.

Вероятность наличия в произвольном объеме W покрытия хотя бы одного дефекта, удовлетворяющего условию $s > S_{\text{норм}}$, равна произведению вероятностей: $P_{N_{\text{деф}}} \cdot (P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}}))^{N_{\text{деф}}}$.

В произвольном объеме W покрытия может находиться различное число дефектов, тогда по формуле полной вероятности условная вероятность того, что объем W содержит, по крайней мере, один дефект с размером $s > S_{\text{норм}}$ [15–16]:

где $V(s > S_{\text{норм}}/W)$ — условная вероятность появления в произвольном объеме W покрытия дефекта с размером $s > S_{\text{норм}}$.

Из выражения (6) следует, что вероятность наступления в покрытии объемом W опасного события (отказ, предельное состояние) зависит от объемной плотности дефектности покрытия $\rho_{\text{деф}}$, обусловленной технологией формирования покрытия, и вероятности появления дефекта с размером, превышающим нормативное значение, $P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}})$.

Условная плотность вероятности $f(s > S_{\text{норм}}/W)$ появления дефекта с размером $s > S_{\text{норм}}$ в произвольном объеме W покрытия представляет собой первую производную от функции условной вероятности $V(s > S_{\text{норм}}/W)$ [15, 16]:

$$\begin{aligned} f(s > S_{\text{норм}}/W) &= \frac{dV(s > S_{\text{норм}}/W)}{W} = \\ &= \rho_{\text{деф}} \cdot (P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}})) \times \\ &\times \exp\left(\left(-\rho_{\text{деф}} \cdot W\right) \cdot (P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}}))\right). \end{aligned} \quad (7)$$

Можно рассчитать средний объем покрытия, содержащий, по крайней мере, один де-

фект с размером $s > S_{\text{норм}}$, согласно выражению (7):

$$W_{\text{ср}} = f\left(\frac{s > S_{\text{норм}}}{W}\right) \cdot W dW = \frac{1}{\rho_{\text{деф}} \cdot (P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}}))}, \quad (8)$$

где $W_{\text{ср}}$ — средний объем покрытия, содержащий, по крайней мере, один дефект с размером $s > S_{\text{норм}}$, м³.

Подставим выражение (8) в выражение (6), найдем вероятность опасного события (отказ, предельное состояние) в покрытии объемом W [15, 16]:

$$V = 1 - \exp\left(-\frac{W}{W_{\text{ср}}}\right), \quad (9)$$

где V — вероятность опасного события (отказ, предельное состояние) в покрытии объемом W .

Прологарифмируем выражение (9) и найдем объем покрытия W , при котором наступает опасное событие (отказ, предельное состояние) с вероятностью V :

$$W = -W_{\text{ср}} \cdot \ln(1 - V) = \frac{-\ln(1 - V)}{\rho_{\text{деф}} \cdot (P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}}))} = \frac{-\ln(1 - V)}{\rho_{\text{деф}} \cdot 1 - \int_0^{S_{\text{норм}}} f(s) ds}. \quad (10)$$

Таким образом, по выражению (10) можно найти объем покрытия, в котором наступит опасное событие (отказ, предельное состояние) с вероятностью V , при данной технологии, характеризующейся объемной плотностью дефектности $\rho_{\text{деф}}$, при плотности вероятности распределения размеров обнаруженных производственных дефектов в покрытии $f(s)$, а также нормированных значений размеров производственного дефекта $S_{\text{норм}} = \{S_{\text{гар}}, S_{\text{отк}}, S_{\text{пред}}\}$.

Определение параметров структуры многослойного покрытия с учетом его производственной дефектности

С учетом выражения (1) определим объемом $W_{\text{пок}}$ многослойного покрытия (рис. 1):

$$W_{\text{пок}} = S_{\text{пок}} \cdot H_{\text{пок}} = S_{\text{пок}} \cdot H_{\text{сл}} \cdot N_{\text{сл}} = W_{\text{сл}} \cdot N_{\text{сл}}, \quad (11)$$

где $W_{\text{пок}}$ — объем многослойного покрытия, м³;

$W_{\text{сл}}$ — объем единичного слоя, м³.

Для предотвращения наступления опасного события из-за появления в многослойном покрытии производственного дефекта с размером $s > S_{\text{норм}}$ необходимо выполнение условия: $W_{\text{сл}} < W$. Тогда из выражения (11) с учетом выражения (10) следует:

$$W_{\text{сл}} = \frac{W_{\text{пок}}}{N_{\text{сл}}} < \frac{-\ln(1 - V)}{\rho_{\text{деф}} \cdot 1 - \int_0^{S_{\text{норм}}} f(s) ds}. \quad (12)$$

Разделим выражение (12) на площадь покрытия $S_{\text{пок}}$ и получим основной параметр структуры многослойного покрытия — толщину единичного слоя покрытия, при условии наличия дефектов с размером $s > S_{\text{норм}}$:

$$H_{\text{сл}}(s > S_{\text{норм}}) = \frac{H_{\text{пок}}}{N_{\text{сл}}} < \frac{-\ln(1 - V)}{S_{\text{пок}} \cdot \rho_{\text{деф}} \cdot \left(1 - \int_0^{S_{\text{норм}}} f(s) ds\right)}. \quad (13)$$

При заданной толщине покрытия $H_{\text{пок}}$ из выражения (13) определяем толщину единичного слоя, достижимую при выбранной технологии нанесения покрытия, $H_{\text{слт}}(s < S_{\text{норм}}) < H_{\text{сл}}(s < S_{\text{норм}})$, и число единичных слоев $N_{\text{сл}}(s < S_{\text{норм}})$:

$$N_{\text{сл}}(s < S_{\text{норм}}) = \frac{H_{\text{пок}}}{H_{\text{слт}}(s < S_{\text{норм}})}, \quad (14)$$

где $H_{\text{слт}}(s < S_{\text{норм}})$ — толщина единичного слоя, достижимая при выбранной технологии нанесения покрытия, м.

Таким образом, с учетом производственной дефектности для конкретной технологии формирования многослойного покрытия определены параметры его структуры: число единичных слоев, толщина единичного слоя.

Расчет параметров структуры многослойного покрытия с учетом его производственной дефектности

Определим параметры структуры покрытия при следующих исходных данных:

- площадь покрытия $S_{\text{пок}} = 10,0 \text{ м}^2$;
- толщина покрытия $H_{\text{пок}} = 0,012 \text{ м}$;
- вероятность опасного события $V = 0,5$;
- объемная плотность дефектности покрытия $\rho_{\text{деф}} = 240,0 \text{ м}^{-3}$;
- максимальная площадь дефекта, не влияющая на определенный показатель качества, $S_{\text{гар}} = 12,00 \text{ мм}^2$;
- максимальная площадь дефекта, не приводящая к отказу покрытия по определенному показателю качества, $S_{\text{отк}} = 17,45 \text{ мм}^2$;
- максимальная площадь дефекта, не приводящая к предельному состоянию покрытия по определенному показателю качества, $S_{\text{пред}} = 19,60 \text{ мм}^2$;
- параметры распределения Вейбулла: $\theta = 15$; $m = 5$.

Плотность вероятности распределения размеров обнаруженных дефектов в покрытии подчиняется распределению Вейбулла (5), тогда по выражению (4) определяем вероятность появления дефекта с размером, превышающим нормативное значение, $s < S_{\text{норм}}$:

- вероятность появления дефекта с размером $s < S_{\text{гар}}$ составляет $P_{\text{деф}}(s < S_{\text{гар}}) = 0,721$;
- вероятность появления дефекта с размером $s < S_{\text{отк}}$ составляет $P_{\text{деф}}(s < S_{\text{отк}}) = 0,119$;

- вероятность появления дефекта с размером $s < S_{\text{пред}}$ составляет $P_{\text{деф}}(s < S_{\text{пред}}) = 0,022$.

Определяем по выражениям (13) и (14) толщину единичного слоя и число слоев покрытия:

- отсутствие дефектов, влияющих на показатели качества покрытия, безопасное состояние покрытия: $H_{\text{сл}}(s < S_{\text{гар}}) = 0,41 \text{ мм}$; следовательно, $H_{\text{слт}}(s < S_{\text{гар}}) = 0,40 \text{ мм}$; $N_{\text{сл}}(s < S_{\text{гар}}) = 30 \text{ шт.}$;
- отсутствие дефектов, приводящих к отказу по показателю качества покрытия: $H_{\text{сл}}(s < S_{\text{отк}}) = 2,43 \text{ мм}$; следовательно, $H_{\text{слт}}(s < S_{\text{отк}}) = 2,40 \text{ мм}$; $N_{\text{сл}}(s < S_{\text{отк}}) = 5 \text{ шт.}$;
- отсутствие дефектов, приводящих к предельному состоянию по показателю качества покрытия: $H_{\text{сл}}(s < S_{\text{пред}}) = 13,0 \text{ мм}$; следовательно, $H_{\text{слт}}(s < S_{\text{пред}}) = 12,0 \text{ мм}$; $N_{\text{сл}}(s < S_{\text{пред}}) = 1 \text{ шт.}$

Анализ результатов расчета показывает, что формирование многослойного покрытия с малогабаритными дефектами $s < S_{\text{гар}}$, не влияющими на показатель качества, нетехнологично и трудоемко из-за большого числа единичных слоев $N_{\text{сл}}(s < S_{\text{гар}}) = 30 \text{ шт.}$ Нанесение покрытия с дефектами, имеющими размер $s < S_{\text{отк}}$, то есть не приводящими к отказу покрытия, технологично и целесообразно, так как число единичных слоев $N_{\text{сл}}(s < S_{\text{отк}}) = 5 \text{ шт.}$

На параметры структуры многослойного покрытия существенно влияет технология его формирования, характеризуемая объемной плотностью дефектности покрытия $\rho_{\text{деф}}$. При использованных выше исходных данных, оценим зависимость параметров структуры многослойного покрытия с дефектами, имеющими размер $s < S_{\text{отк}}$, то есть не приводящих к отказу, от объемной плотности дефектности покрытия, варьируемой в диапазоне $\rho_{\text{деф}} = 100 \div 500 \text{ м}^{-3}$. Увеличе-

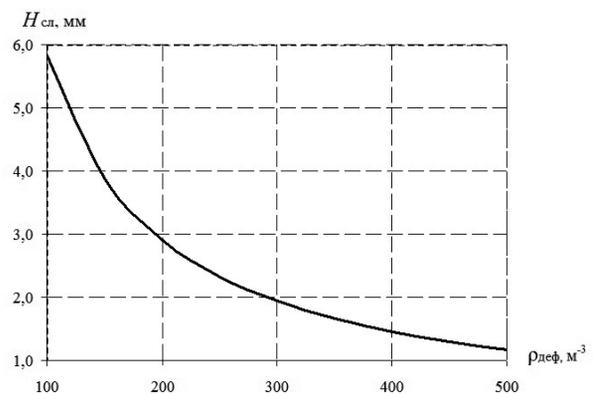


Рис. 4. Зависимость толщины единичного слоя $H_{\text{сл}}$ от объемной плотности дефектности покрытия $\rho_{\text{деф}}$

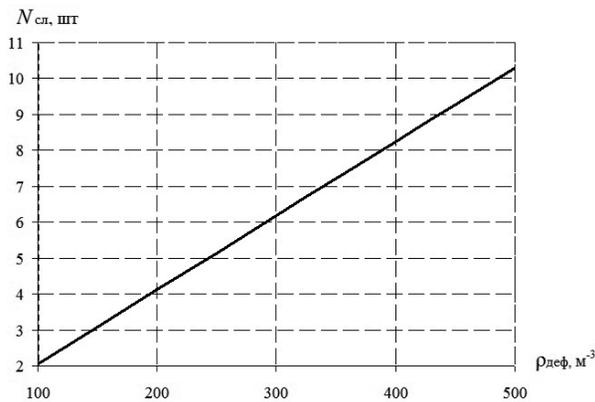


Рис. 5. Зависимость числа единичных слоев $N_{\text{сл}}$ от объемной плотности дефектности покрытия $\rho_{\text{деф}}$

ние объемной плотности дефектности покрытия $\rho_{\text{деф}}$ со 100 м^3 до 500 м^3 приводит к уменьшению толщины единичного слоя в 5 раз (рис. 4) и увеличению числа единичных слоев в 5 раз (рис. 5).

Результаты расчета показывают, что объемная плотность дефектности покрытия $\rho_{\text{деф}}$, характеризующая конкретную технологию, существенно влияет на параметры структуры (толщина единичного слоя и число единичных слоев) многослойного покрытия, а следовательно, на качество покрытия.

Список источников

1. Анастасиади Г.П., Окрепилов В.В., Сильников М.В. Управление качеством промышленной продукции. СПб.: Санкт-Петербургская издательско-книготорговая фирма «Наука», 2014. 412 с.
2. Николаева Е.А. Основы механики разрушения. Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2010. 103 с.
3. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, 2008. 334 с.
4. Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. Новосибирск: Наука, 2017. 724 с.
5. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушений. М.: Физматлит, 2006. 328 с.
6. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций

из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2007. № 4. С. 23–32.

7. Бутусова Е.Н., Мишакин В.В. Исследование влияния старения на зарождение трещин коррозионного растрескивания под напряжением малоуглеродистой стали // Вопросы материаловедения. 2019. № 2 (98). С. 102–109.

8. Нефедов С.В., Панов М.Ю., Силкин В.М., Столов В.П. Вероятностный анализ допустимых уровней дефектности участков линейной части магистральных газопроводов // Научно-технический сборник Вести газовой науки. 2014. № 1 (17). С. 35–40.

9. Андрияшкин А.Ю. Применение сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа для снижения вероятности отказа многослойных функциональных покрытий: монография. СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2021. 258 с.

10. Шульга С.Н. Методика оценки живучести и определение остаточного ресурса подкраново-подстропильных ферм с трещиноподобными дефектами // Наука и безопасность. 2014. № 4 (13). С. 2–32.

11. Насонов М.Ю. Методика оценки остаточного ресурса металлоконструкций горных машин при наличии растущих трещин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2012. № 3 (91). С. 33–36.

12. Кучерявый В.И., Власов В.П., Коновалов М.Н. Моделирование циклической трещиностойкости элементов конструкции // Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения. 2016. № 1 (3). С. 6–10.

13. Арутюнян А.Р., Арутюнян Р.А. Коррозионный рост трещин и усталостная прочность сложных технических систем // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 9 (44). С. 42–48.

14. Логанина В.И. Влияние толщины лакокрасочного покрытия на вероятность его растрескивания // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Т. 23. № 2. С. 25–30.

15. Андрияшкин А.Ю., Изюмова Е.А., Богданов И.П. Теоретическая оценка влияния многослойности и однородности функционального покрытия техники специального назначения на его прочность // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 1–2 (175–176). С. 138–144.

16. Андрияшкин А.Ю., Изюмова Е.А., Романат Н. Теоретическое обоснование многослойности функционального покрытия техники специального назначения для снижения вероятности его отказа при наличии недопустимых производственных дефектов // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 3–4 (177–178). С. 104–108.

References

- Anastasiadi G.P., Okrepilov V.V., Silnikov M.V. Quality management of industrial products. St. Petersburg: St. Petersburg publishing and bookselling company Nauka, 2014. 412 p.
- Nikolaeva E.A. Fundamentals of fracture mechanics. Perm: Publishing house of Perm State Technical University, 2010. 103 p.
- Botvina L.R. Destruction: kinetics, mechanisms, general patterns. M.: Science. Institute of Metallurgy and Materials Science named after A.A. Baikov RAS. 2008. 334 p.
- Makhutov N.A. Safety and risks: systemic research and development. Novosibirsk: Science, 2017. 724 p.
- Matvienko Yu.G. Models and criteria of fracture mechanics. M.: Fizmatlit, 2006. 328 p.
- Murashov V.V., Rumyantsev A.F. Defects of monolithic parts and multilayer structures made of polymer composite materials and methods for their detection. Part 1. Defects of monolithic parts and multilayer structures made of polymer composite materials // Control. Diagnostics. 2007. No 4. Pp. 23–32.
- Butusova E.N., Mishakin V.V. Study of the influence of aging on the initiation of stress corrosion cracking cracks in low-carbon steel // Questions of materials science. 2019. No 2 (98). Pp. 102–109.
- Nefedov S.V., Panov M.Yu., Silkin V.M., Stolov V.P. Probabilistic analysis of acceptable levels of defects in sections of the linear part of main gas pipelines // Scientific and technical collection of News of Gas Science. 2014. No 1 (17). Pp. 35–40.
- Andryushkin A.Yu. The use of supersonic gas-dynamic spraying with multi-jet gas supply to reduce the probability of failure of multilayer functional coatings: Monograph. St. Petersburg: BSTU «VOENMEKH» named after D.F. Ustinov. 2021. 258 p.
- Shulga S.N. Methodology for assessing survivability and determining the residual life of crane-rafter trusses with crack-like defects // Science and safety. 2014. No 4 (13). Pp. 2–32.
- Nasonov M.Yu. Methodology for assessing the residual life of metal structures of mining machines in the presence of growing cracks // Bulletin of Kuzbass State Technical University. 2012. No 3 (91). Pp. 33–36.
- Kucheryavyi V.I., Vlasov V.P., Kononov M.N. Modeling of cyclic crack resistance of structural elements // Resources of the European North. Technologies and economics of development. 2016. No 1 (3). Pp. 6–10.
- Harutyunyan A.R., Harutyunyan R.A. Corrosion crack growth and fatigue strength of complex technical systems // Engineering and Construction Journal. 2013. No 9 (44). Pp. 42–48.
- Loganina V.I. The influence of the thickness of the paint coating on the probability of its cracking // Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and architecture. 2023. Vol. 23. No 2. Pp. 25–30.
- Andryushkin A.Yu., Izyumova E.A., Bogdanov I.P. Theoretical assessment of the influence of multilayering and homogeneity of the functional coating of special-purpose equipment on its strength // Issues of defense technology. Episode 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 1–2 (175–176). Pp. 138–144.
- Andryushkin A.Yu., Izyumova E.A., Romanat N. Theoretical justification for multi-layer functional coating of special-purpose equipment to reduce the likelihood of its failure in the presence of unacceptable production defects // Issues of defense technology. Episode 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 3–4 (177–178). Pp. 104–108.

УДК 629.064.5

doi: 10.53816/23061456_2025_1–2_128

**МЕТОДИКА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВОЕННОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ
ТЕХНИКИ, ПРИМЕНЯЕМОЙ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА**

**METHODOLOGY FOR IMPROVING THE OPERATIONAL PROPERTIES
OF THE POWER SUPPLY SYSTEM FOR MILITARY VEHICLES USED
IN THE FAR NORTH**

В.А. Нечаева

V.A. Nechaeva

Военный институт (инженерно-технический)

Военная академия материально-технического обеспечения им. А.В. Хрулева

Все климатические районы Российской Федерации, кроме умеренного, создают особые условия для работы, хранения, обслуживания и ремонта образцов военной автомобильной техники, которые должны учитываться при организации эксплуатации. Особые условия, как правило, характеризуются сочетанием неблагоприятных факторов. Для районов Крайнего Севера свойственны не только низкая температура окружающего воздуха, ветры, но и эксплуатация в условиях бездорожья и, как следствие, движение с малой скоростью, что крайне отрицательно влияет на эксплуатационные свойства системы электроснабжения. В статье описан алгоритм реализации методики обеспечения совершенствования эксплуатационных свойств системы электроснабжения военной автомобильной техники, применяемой в условиях Крайнего Севера.

Ключевые слова: эксплуатационные свойства системы электроснабжения, коэффициент готовности, закон Джоуля — Ленца, температурный коэффициент напряжения, генераторная установка с импульсным регулированием напряжения, температура электролита.

All climatic regions of the Russian Federation, except temperate, create special conditions for the operation, storage, maintenance and repair of military vehicles, which must be taken into account when organizing operation. Special conditions are usually characterized by a combination of unfavorable factors. The regions of the Far North are characterized not only by low ambient temperatures and winds, but also by off-road operation and, as a result, low-speed movement, which has an extremely negative effect on the operational properties of the power supply system. The article describes an algorithm for implementing a methodology to ensure the improvement of the operational properties of the power supply system for military vehicles used in the Far North.

Keywords: operational properties of the power supply system, availability coefficient, Joule — Lenz law, temperature coefficient of voltage, generator set with pulse voltage regulation, electrolyte temperature.

Чем характерны особенности использования военной техники в условиях Крайнего Севера. Прежде всего, количество солнечных дней незначительно. В Южно-Курильске количество солнечных дней в году не превышает 69. Значительная часть года проходит в условиях полярной ночи или сумерек. Так, в районе поселка Диксон продолжительность полярной ночи превышает 80 суток, в районе Мурманска полярная ночь длится 46 суток. Зимой на Крайнем Севере продолжительность светового дня очень короткая. В Верхоянске продолжительность дня 22 декабря не превышает 49 минут, средняя продолжительность светового дня в зимний период не превышает 4 часов 42 минут. Более 19 часов в сутки солнце не показывается за горизонтом. В этот период ощущается полная темнота, но и после восхода солнца остается ощущение темноты, так как полностью над линией горизонта светило не появляется. Кроме того, районы Крайнего Севера, в том числе и в летние месяцы, подвержены сильным снегопадам, сопровождающимся снежными бурями. В Воркуте среднемесячные осадки января 2023 года в виде снега составили 78,2 мм. Разработанную методику предлагается использовать в районах Крайнего Севера, которые обусловлены сложными климатическими условиями с низкими температурными показателями, где температура окружающей среды понижается местами до минус 50 °С, именно в этих районах необходимо применять систему электроснабжения военной автомобильной техники с совершенствованными эксплуатационными свойствами.

Эксплуатационные свойства системы электроснабжения — это объективные особенности или признаки качества, которые характеризуют, в какой мере система соответствует требованиям эксплуатации. Совокупность эксплуатационных свойств можно разделить на общие, присущие всем видам электрооборудования, и специальные, имеющие значение для конкретных групп электрооборудования. К общим свойствам относятся надежность и технико-экономические свойства, а к специальным — технологические, энергетические, эргономические и другие свойства [1].

Реализация предлагаемой методики предполагает два этапа, которые являются равнозначными. На первом этапе обеспечивается совершенствование энергетических свойств системы

электроснабжения. Второй этап предусматривает выполнение процесса, направленного на повышение надежности. Алгоритм методики совершенствования эксплуатационных свойств системы электроснабжения военной автомобильной техники, применяемой в условиях Крайнего Севера, представлен на рис. 1.

Одним из комплексных показателей такого эксплуатационного свойства системы электроснабжения, как надежность, является коэффициент готовности, который характеризует вероятность того, что в данный момент времени система находится в работоспособном состоянии. Стационарное значение коэффициента готовности K_r определяется как:

$$K_r = \frac{t_o}{t_o + t_{o6}}, \quad (1)$$

где t_o — средняя наработка изделия между отказами, ч;

t_{o6} — среднее время, необходимое для обеспечения работоспособного состояния, ч.

Выражение (1) дает полный ответ на вопрос о том, как повысить значение комплексного показателя надежности системы электроснабжения. Коэффициент готовности будет стремиться к единице при снижении знаменателя, а именно его составной части, которой является среднее время, необходимое для обеспечения работоспособного состояния. При неработающем двигателе наиболее рационально это время будет расходоваться для поддержания работоспособного состояния источника электропитания, так как только с помощью аккумуляторной батареи (АБ) можно дать импульс остальным устройствам системы электрооборудования для их последующего использования по назначению.

ЭДС аккумуляторной батареи с понижением температуры электролита изменяется незначительно. В то же время вязкость электролита, а следовательно, и его сопротивление возрастают и, как следствие, увеличивается падение напряжения на внутреннем сопротивлении аккумуляторной батареи. Вязкость электролита увеличивает сопротивление прохождению электрического тока, затрудняет перемешивание, необходимое для проникновения свежего электролита в поры активной массы электродов. Внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи

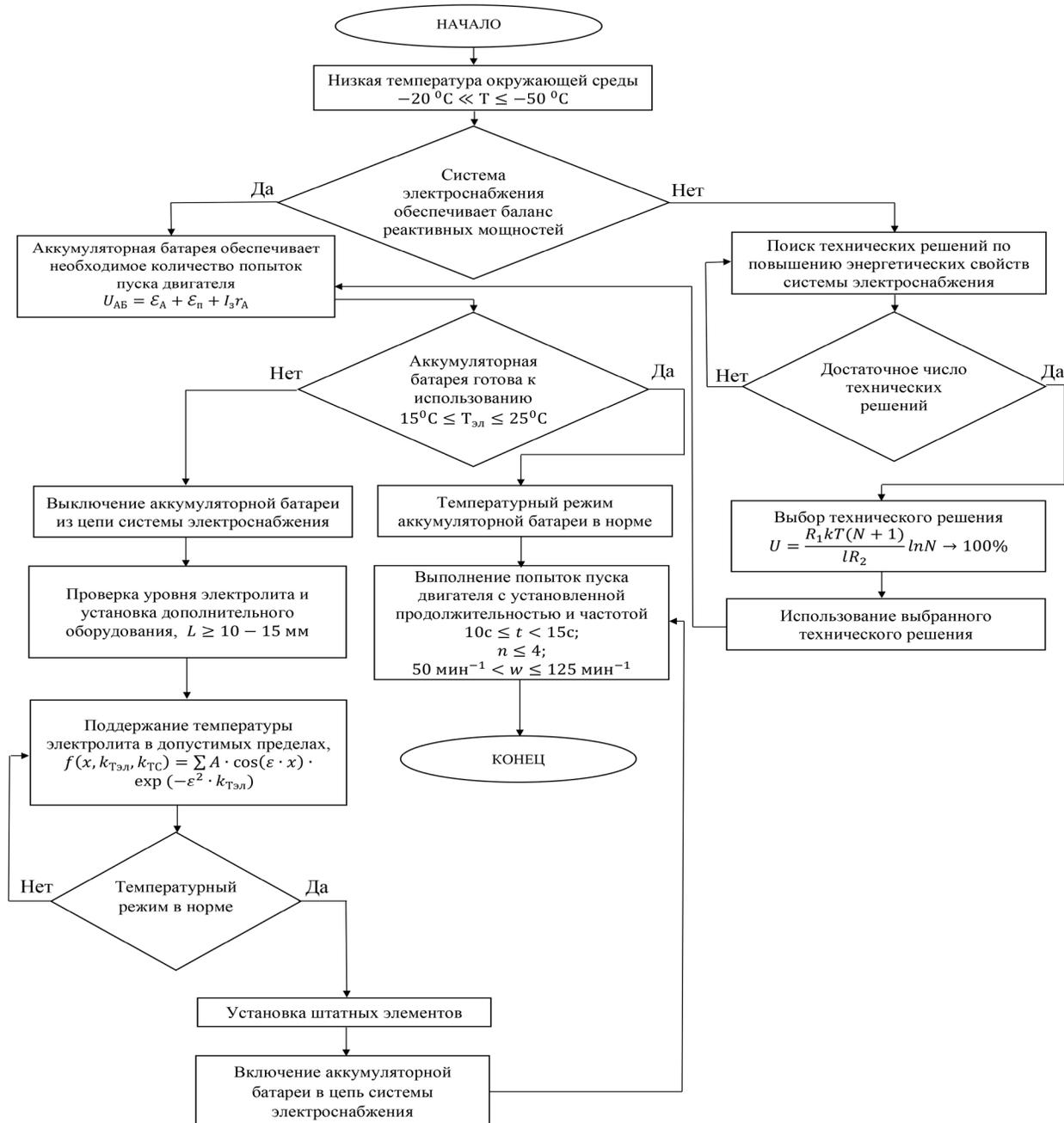


Рис. 1. Алгоритм методики совершенствования эксплуатационных свойств системы электроснабжения военной автомобильной техники, применяемой в условиях Крайнего Севера

непостоянно, изменяется с изменением температуры электролита. При низких температурах внутреннее сопротивление возрастает. Увеличение внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи при низких температурах существенно ухудшает условия пуска двигателя [2].

Повышение коэффициента готовности системы электроснабжения, повышение количест-

ва гарантированных попыток пуска двигателя внутреннего сгорания с установленной продолжительностью в тяжелых климатических условиях Крайнего Севера возможно за счет поддержания температурного режима электролита аккумуляторной батареи.

Взаимосвязь параметров тепловой подготовки электролита аккумуляторной батареи и

показателя готовности к пуску двигателя военной автомобильной техники в условиях низких температур можно представить выражением:

$$G_r = f(\tau_{\text{тп}}, T_{\text{эл}}),$$

где $\tau_{\text{тп}}$ — время температурного подогрева электролита, с;

$T_{\text{эл}}$ — температура электролита, °С.

Рассмотрим мероприятия, последовательная реализация которых позволит повысить значение коэффициента готовности системы электроснабжения и обеспечит необходимое количество попыток пуска силовой установки при длительном нахождении военной техники при неработающем двигателе с низкой температурой окружающего воздуха.

Смоделируем повседневную ситуацию, для чего предположим, что после выполнения определенного задания и отсутствия необходимости дальнейшей эксплуатации военную автомобильную технику устанавливают на стоянку закрытого или открытого типа. Размещать технику необходимо исключительно на ровной, горизонтальной поверхности для того, чтобы аккумуляторная батарея автомобиля находилась в горизонтальном положении и исключалась возможность ее наклона. Выполнять данную операцию следует для того, чтобы электролит был размещен по внутренней поверхности аккумуляторной батареи равномерно.

Математически горизонтальную плоскость можно описать при помощи уравнения, учитывающего положение и ориентацию плоскости, а следовательно, и размещенной на ней техники в трехмерном пространстве:

$$ax + by + cz + d = 0,$$

где a , b и c — коэффициенты, представляющие вектор нормали плоскости;

d — расстояние от начала координат по вектору нормали.

Затем останавливают двигатель, уточняют продолжительность времени нахождения военной автомобильной техники на стоянке. Кроме этого, уточняют прогноз температуры окружающей среды на период пребывания техники на стоянке и, в случае возникновения условий для продолжительного времени ее нахождения при

низкой температуре окружающей среды, в обязательном порядке обесточивают всю бортовую сеть. С этой целью разрывают электрическую цепь системы электрооборудования автомобиля, для чего отключают аккумуляторную батарею при помощи выключателя массы.

Следующим действием является демонтаж пробки заливной горловины третьего аккумулятора аккумуляторной батареи. Для наглядности выполняемых мероприятий используем рис. 2, на котором схематично отобразим и рассмотрим устройство, с помощью которого выясним процесс совершенствования эксплуатационных свойств системы электроснабжения военной автомобильной техники.

Затем проверяют уровень электролита в третьем аккумуляторе, который, при необходимости, корректируют, доводя до нормы, делая его выше 10–15 мм от поверхности пластин аккумуляторной батареи 2. Вместо выкрученной пробки заливной горловины третьего аккумулятора аккумуляторной батареи вкручивают термореле 4, корпус которого выполнен из кислотостойкого материала и соприкасается с поверхностью электролита, а контакты замыкаются при достижении минимально допустимой температуры электролита аккумуляторной батареи. Термореле конструктивно соединено с одной стороны с конденсатором 5. Заряд конденсатора 5 осуществляется через выпрямитель 7,

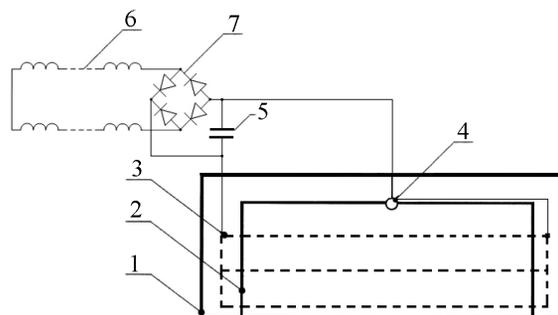


Рис. 2. Схема устройства, использование которого позволит обеспечить совершенствование эксплуатационных свойств системы электроснабжения военной автомобильной техники: 1 — аккумуляторный отсек; 2 — аккумуляторная батарея; 3 — электронагревательный элемент; 4 — термореле, с корпусом из кислотостойкого материала; 5 — конденсатор; 6 — рекуперативный амортизатор на основе линейного электродвигателя с постоянными магнитами; 7 — выпрямитель

выполненный по мостовой схеме, от рекуперативного амортизатора на основе линейного электродвигателя с постоянными магнитами 6. При движении транспортного средства по неровностям дороги рекуперативный амортизатор будет вырабатывать переменный ток. Этот ток преобразуется в постоянный выпрямителем 7. В результате произойдет заряд конденсатора. С другой стороны термореле 4 соединено с электронагревательным элементом 3. Электронагревательный элемент выполнен в виде греющей пленки, которая состоит из карбоновых полос, соединенных медной шиной с использованием специальных контактов из серебряной пасты. Карбоновые нагревательные элементы с двух сторон заламинированы в специальный электротехнический полиэстер, который обеспечивает полную водонепроницаемость пленки и высокую защиту от электрического пробоя [3].

Электронагревательный элемент также соединен с конденсатором и размещен равномерно по периметру аккумуляторного отсека 1, который, в свою очередь, выполнен из теплоизоляционного материала. Включается в работу электронагревательный элемент при снижении температуры электролита и достижения минимально допустимого значения 19,5 °С посредством замыкания контактов термореле 4. Таким образом обеспечивается повышение температуры электролита аккумуляторной батареи и, в случае достижения максимально допустимого значения 23,5 °С температуры электролита, электронагревательный элемент перестает функционировать посредством размыкания контактов термореле и прекращения подачи энергии от конденсатора.

Формализовано, для нагревателя можно записать тепловой баланс как:

$$\delta Q_1 = \delta Q_2 + \delta Q_3,$$

где δQ_1 — тепло, выделяемое нагревателем при заданном токе и времени;

δQ_2 — тепло, идущее на нагрев нагревателя;

δQ_3 — тепло рассеиваемое.

Используя закон Джоуля — Ленца, запишем:

$$I^2 R \tau = c_{p1} m_1 (T_k - T_0) + \alpha S_1 (T - T_0) \tau, \quad (2)$$

где I — ток, идущий через нагреватель, А;

R — сопротивление нагревателя, Ом;

τ — время, с;

c_{p1} — удельная теплоемкость нагревателя, Дж/К;

m_1 — масса нагревателя, кг;

T_k и T_0 — температуры в момент времени 0 и τ , К;

α — коэффициент теплоотдачи;

S_1 — площадь сечения аккумулятора, м²;

T — переменная температура в момент времени τ , К.

В условиях компактной сборки аккумуляторного отсека тепло, рассеиваемое аккумулятором, можно не учитывать. Тогда:

$$\delta Q_3 = \delta Q_4,$$

где Q_4 — тепло, идущее на нагрев аккумулятора. Справедлива будет разность:

$$\delta Q_1 - \delta Q_2 = \delta Q_4.$$

Используя выражение (2) получим:

$$I^2 R \tau - c_{p1} m_1 (T_k - T_0) = \alpha S_1 (T - T_0) \tau, \quad (3)$$

Из выражения (3) можно получить зависимости конечной температуры аккумулятора от параметров нагрева [4–5].

Температуру электролита в расчетной точке можно получить, используя выражение для вычисления избытка температуры в электролите:

$$\vartheta(X, K_{T_{\text{эл}}}, K_{T_{\text{с}}}) = \sum A \cdot \cos(\varepsilon \cdot X) \cdot \exp(-\varepsilon^2 \cdot K_{T_{\text{эл}}}),$$

где ϑ — избыток температуры, °С;

X — координата исследуемой точки нагрева;

$K_{T_{\text{эл}}}$ — уточняющий коэффициент влияния температуры электролита АБ на готовность к пуску двигателя, %;

$K_{T_{\text{с}}}$ — коэффициент эквивалентной толщины слоя электролита;

A — константа функции;

ε — коэффициент взаимосвязи координаты исследуемой точки нагрева и эквивалентного времени подготовки.

Процесс поддержания температурного режима электролита аккумуляторной батареи цикличен. При понижении температуры работа

устройства, изображенного на рис. 2, повторяется, тем самым обеспечивается поддержание температурного режима источника питания при неработающем двигателе военной автомобильной техники, эксплуатируемой в тяжелых климатических условиях Крайнего Севера, и повышается коэффициент готовности системы электроснабжения.

Завершающим этапом обеспечения совершенствования эксплуатационных свойств системы электроснабжения военной автомобильной техники посредством повышения коэффициента готовности является выполнение гарантированных попыток пуска двигателя. Количество гарантированных попыток должно быть не менее четырех, частота вращения коленчатого вала дизеля должна находиться в диапазоне от 50 мин⁻¹ до 125 мин⁻¹. При возникновении необходимости использовать военную технику выкручивают термореле и на его место устанавливают штатную пробку заливной горловины третьего аккумулятора аккумуляторной батареи. Включают в бортовую сеть аккумуляторную батарею и выполняют необходимое количество попыток пуска двигателя автомобиля с установленной продолжительностью.

Таким образом, выполнение перечисленных операций предлагаемой методики обеспечивает повышение количества гарантированных попыток пуска двигателя внутреннего сгорания с установленной продолжительностью за счет совершенствования такого эксплуатационного свойства системы электроснабжения, как надежность.

Наиболее важным энергетическим свойством системы электроснабжения является обеспечение баланса генерируемой и потребляемой мощностей. Баланс активных мощностей определяет главным образом частоту в системе электроснабжения, а баланс реактивных — напряжение в узлах. Этот баланс должен обеспечить выполнение необходимого количества попыток пуска двигателя военной техники с установленной продолжительностью [6].

Независимо от температуры окружающей среды эксплуатации военной автомобильной техники снижение степени заряженности аккумуляторной батареи и увеличение ее внутреннего сопротивления неизбежно приведут к снижению средней частоты вращения коленчатого вала. Эти параметры связаны и зависят друг

от друга. Причиной снижения средней частоты прокручивания механизмов двигателя в стартовом режиме является тот факт, что внутреннее сопротивление аккумулятора непостоянно. Оно зависит как от степени заряженности, так и от изменения температурных показателей. В свою очередь заряженность аккумуляторной батареи также зависит от внутреннего сопротивления, которое оказывает влияние на состояние активной массы электродов аккумуляторной батареи [7–8].

Напряжение аккумуляторной батареи при ее заряде можно определить, используя следующую зависимость:

$$U_{AB} = \mathcal{E}_A + \mathcal{E}_n + I_3 r_A,$$

где \mathcal{E}_n — ЭДС поляризации, В;

\mathcal{E}_A — ЭДС аккумулятора, В;

I_3 — сила зарядного тока, А;

r_A — внутреннее сопротивление аккумулятора, Ом.

Со временем, особенно при интенсивной эксплуатации военной автомобильной техники на незначительные расстояния при низких температурах, активная масса электродов теряется, изменяется их структура и уменьшается рабочая поверхность. В результате внутреннее сопротивление аккумулятора заметно увеличивается, а заряженность, как было установлено, уменьшается. С понижением температуры вязкость электролита возрастает. Сульфат свинца, который неизбежно образуется в результате разряда аккумуляторной батареи, практически является изолятором, и, как следствие, сопротивление электродов и электролита увеличивается. Все перечисленное и является причиной снижения заряженности аккумуляторной батареи и ухудшения условий пуска двигателя при низких температурах [9].

Если аккумуляторная батарея заряжена не на сто процентов, то минимальная температура, при которой возможен пуск, становится, естественно, еще выше. Из этого и следует вывод о необходимости повысить требования к обеспечению увеличения степени заряженности аккумуляторной батареи при эксплуатации военной автомобильной техники в условиях Крайнего Севера с низкими температурами окружающей среды.

Для обеспечения гарантированного пуска двигателя необходимо создать условия, при которых аккумуляторная батарея постоянно была бы практически полностью заряжена, а температура электролита соответствовала бы допустимой. Регулярное нахождение аккумуляторной батареи в состоянии полного заряда в значительной степени положительно влияет на продолжительность ее срока службы.

Анализ конструкции и способов использования системы электроснабжения позволяет утверждать, что существующие методы заряда аккумуляторных батарей в период непосредственной эксплуатации военной техники не позволяют решить задачу поддержания ее в полностью заряженном состоянии, необходимом для обеспечения гарантированного пуска двигателя при эксплуатации в условиях низких температур. Причинами этого являются: игнорирование температурной зависимости ЭДС полностью заряженного аккумулятора и значительная погрешность в выборе напряжения, при котором производят заряд батарей. Становится очевидной необходимость использования в условиях низких температур окружающей среды специализированной системы электроснабжения с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Недостатком эксплуатируемых в настоящее время систем электроснабжения военной автомобильной техники является использование в их составе генераторных установок с регуляторами напряжения, в которых источником опорного напряжения являются параметрические стабилизаторы. Эксплуатация таких регуляторов напряжения в обязательном порядке приводит к чувствительной температурной погрешности регулирования. Доказательство данного утверждения заключается в следующем: действительно, разность напряжений между эмиттерами транзисторов, включенных по схеме, показанной на рис. 3, определяется выражением [10]:

$$\Delta U = \frac{kT}{e} \ln N,$$

где k — постоянная Больцмана, Дж/К;
 T — абсолютная температура, К;
 e — заряд электрона, Кл;

N — отношение токов коллекторов транзисторов, задаваемое выбором сопротивлений, включенных в цепи коллекторов.

Значение этого напряжения может быть определено с использованием другого математического выражения:

$$\Delta U = I_2 R_3.$$

Сопоставив оба выражения, получим:

$$I_2 = \frac{kT}{eR_3} \ln N.$$

Тогда ток через сопротивление R_4 можно найти, применив следующую зависимость:

$$I_4 = \frac{kT(N+1)}{eR_3} \ln N.$$

Напряжение на этом сопротивлении будет определяться как отношение:

$$U_4 = \frac{R_4 kT(N+1)}{eR_3} \ln N.$$

Если напряжение U_4 сложить с напряжением между базой и эмиттером транзистора, то получим напряжение на базах транзисторов. Установив в узле «а» напряжение, численно равное ширине запрещенной зоны полупроводника, выходное опорное напряжение источника становится фактически не зависящим от температуры.

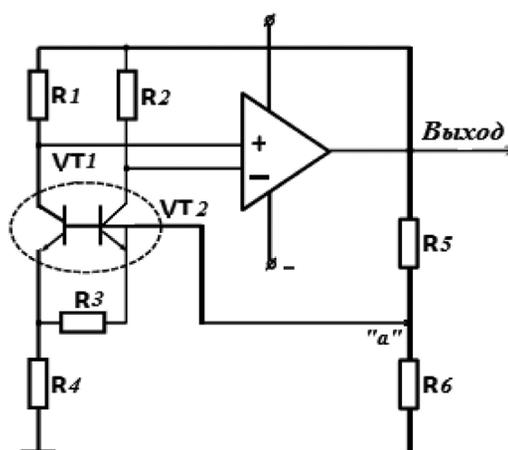


Рис. 3. Стабилизатор с «шириной запрещенной зоны полупроводника»

В основе работы описанной схемы находится разность напряжений между прямосмещенными p - n -переходами. Указанная разность чрезвычайно незначительна и составляет всего ~ 20 мВ. По этой причине работа рассмотренной схемы возможна при наличии операционного усилителя, в качестве которого предлагается модульный многокаскадный усилитель, обладающий достаточно высоким коэффициентом усиления.

В отдельных случаях полная компенсация температурной зависимости не отвечает требованиям, предъявляемым к источнику со стороны потребителей. Именно это относится к процессу заряда аккумуляторной батареи, ЭДС которой изменяется в зависимости от температуры подкапотного пространства. Из этого следует, что выходное напряжение стабилизатора должно зависеть от температуры. Эту зависимость необходимо установить такой же, как и температурная зависимость ЭДС батареи [11].

Регулировка температурного коэффициента напряжения возможна путем варьирования двух переменных: N или R_4 . Отношение токов коллекторов транзисторов N чаще всего выбирают порядка десяти и поддерживают неизменным на заданном уровне с помощью операционного усилителя. Следовательно, регулировку температурного коэффициента напряжения целесообразно осуществлять путем изменения величин резисторов R_3 или R_4 .

Эффект компенсации отрицательного температурного коэффициента напряжения между базой и эмиттером биполярного транзистора достигается за счет пониженного (по сравнению со схемой с нулевым температурным коэффициентом напряжения) потенциала точки соединения входов дифференциального усилителя на транзисторах.

Напряжение на сопротивлении R_4 линейно зависит от температуры и может использоваться при построении схем в качестве датчика температуры [12].

Делается вывод о том, что совершенствование эксплуатационных свойств, а именно энергетических свойств системы электроснабжения возможно посредством применения в ее структуре технического решения в виде генераторной установки с импульсным регулированием напряжения. Это достигается использованием в схеме генераторной установки регулятора напряжения,

содержащего рассмотренный стабилизатор и операционный усилитель. Использование указанных элементов позволит повысить коэффициент полезного действия и точность регулирования напряжения заряда аккумуляторной батареи в установленных пределах.

Таким образом, предлагаемая методика совершенствования эксплуатационных свойств системы электроснабжения позволяет выполнить контроль и обеспечить готовность источника электроэнергии военной техники при неработающем двигателе, повысить энергетические свойства военной автомобильной техники.

Список источников

1. Малкин В.С. Теоретические основы технической эксплуатации: конспект лекций для студентов ВУЗов. Тольятти: ТГУ, 2004. 242 с.
2. Набоких В.А. Электрооборудование автомобилей и тракторов: учебник для студентов учреждений среднего профессионального образования. М.: Издательский центр «Академия», 2013. 240 с.
3. Нечаев В.В., Воробьев Е.В., Тарасенко А.А. Методики технического диагностирования цилиндропоршневой группы дизелей холодной пусковой прокруткой коленчатого вала // Инженерный вестник Дона. 2018. № 3 (50). 23 с.
4. Нечаев В.В. Методика поиска и распознавания видов отказа автомобильной техники // Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника. Вып. 7. М.: Инновационное машиностроение, 2020. С. 21–27.
5. Нечаев В.В., Нечаева В.А. Конструкция генераторной установки для современного образца военной автомобильной техники // Наука и военная безопасность. 2022. № 3 (30). С. 22–27.
6. Программа для расчета скорости движения двухзвенной гусеничной машины на плаву: свид. о госуд. рег. програм. для ЭВМ № 2023661584 Рос. Федерация. № 2023660233; заявл. 11.05.2023; опублик. 01.06.2023.
7. Нечаев В.В. Метод диагностирования автомобильной аккумуляторной батареи // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 1–1 (80). С. 12–18.
8. Нечаев В.В. Моделирование системы регламентированного технического обслуживания автомобильной техники // Строительные и до-

рожные машины. Вып. 12. М.: Инновационное машиностроение, 2019. С. 37–40.

9. Чижков Ю.П. Электрооборудование автомобилей и тракторов: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Транспортные машины и транспортно-технологические комплексы». М.: Машиностроение, 2007. 654 с.

10. Гармаш Ю.В. Улучшение эксплуатационных характеристик системы электроснабжения автомобиля // Новые информационные технологии в научных исследованиях: Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязанский государственный радиотехнический университет. 2011. С. 266–267.

11. Аринин И.Н. Техническая эксплуатация автомобиля: учеб. пособие для вузов. Ростов: Феникс, 2015. 308 с.

12. Ютт В.Е. Электрооборудование автомобилей: учеб. для студентов Вузов. М: Горячая Линия–Телеком, 2009. 439 с.

References

1. Malkin V.S. Theoretical foundations of technical operation: lecture notes for university students. Tolyatti: TSU, 2004. 242 p.

2. Nabokikh V.A. Electrical equipment of cars and tractors: textbook for students of institutions of secondary vocational education. M.: Publishing center «Academy», 2013. 240 p.

3. Nechaev V.V., Vorobyov E.V., Tarasenko A.A. Methods of technical diagnostics of the cylinder piston group of diesel engines by cold cranking // Engineering Bulletin of the Don. 2018. № 3 (50). 23 p.

4. Nechaev V.V. Methods of searching and recognizing types of failure of automotive equip-

ment // Truck: transport complex, special equipment. Issue 7. Moscow: Innovative Mechanical Engineering, 2020. Pp. 21–27.

5. Nechaev V.V., Nechaeva V.A. Design of a generator set for a modern model of military automotive equipment // Science and military security. 2022. № 3 (30). Pp. 22–27.

6. Certificate of state registration of a computer program No. 2023661584 Russian Federation. A program for calculating the speed of a two-link tracked vehicle afloat : No. 2023660233 : application 05/11/2023 : published 06/01/2023.

7. Nechaev V.V. Method of diagnosing an automobile battery // The world of transport and technological machines. 2023. № 1–1 (80). Pp. 12–18.

8. Nechaev V.V. Modeling of the system of regulated maintenance of automotive equipment // Construction and road vehicles. Issue 12. Moscow: Innovative Mechanical Engineering, 2019. Pp. 37–40.

9. Chizhkov Yu.P. Electrical equipment of cars and tractors [Text]: textbook for students of higher educational institutions studying in the field of training «Transport vehicles and transport and technological complexes». Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 2007. 654 p.

10. Garmash, Yu.V. Improvement of the operational characteristics of the car's power supply system // New information technologies in scientific research: Proceedings of the XVI All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Young Scientists and Specialists. Ryazan State Radio Engineering University. 2011. Pp. 266–267.

11. Arinin I.N. Technical operation of the car: A textbook for universities. Rostov: Feniks Publ., 2015. 308 p.

12. Yutt V.E. Electrical equipment of cars: a textbook for university students. Moscow: Hotline – Telecom, 2009. 439 p.

УДК 623.4

doi: 10.53816/23061456_2025_1–2_137

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ИЗ СТЕКЛА И КАРБОНА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕРМОПЛАСТОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

THE EFFECT OF GLASS AND CARBON FIBER ADDITIVES ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THERMOPLASTICS FOR 3D PRINTING

Канд. техн. наук К.С. Кулаков, Ю.П. Крылов, Н.Ю. Тархов

Ph.D. K.S. Kulakov, Y.P. Krylov, N.Y. Tarhov

НПО Спецматериалов

В статье исследована возможность применения армированных карбоном, стеклом и минеральными волокнами термопластов. Представлены результаты испытаний физико-механических свойств готовых изделий, напечатанных на 3D-принтере FDM типа. На основе полученных данных проведен анализ механических свойств армированных термопластов. Показано несоответствие механических свойств, заявленных производителем, с реальными. Установлено, что армирование в большинстве случаев негативно сказалось на физико-механических свойствах изделий. На основе полученных данных сделан вывод, что термопласты с добавками из стекла и карбона не рекомендуется использовать для производства изделий, требующих высоких механических характеристик, однако благодаря увеличенной внешней спекаемости они могут быть применены в декоративных и нетребовательных к механическим свойствам изделиях. Определены новые направления исследований в области изучения физико-механических свойств термопластов.

Ключевые слова: макетирование, аддитивные технологии, механические свойства материалов, прототипирование, армированные термопласты, 3D-печать.

The article examines the possibility of using thermoplastics reinforced with carbon, glass and mineral fibers. The results of tests on the physical and mechanical properties of finished products printed on an FDM type 3D printer are presented. Based on the data obtained, the analysis of the mechanical properties of reinforced thermoplastics was carried out. The discrepancy between the mechanical properties declared by the manufacturer and the real ones is shown. It was found that reinforcement in most cases had a negative effect on the physical and mechanical properties of the products. Based on the data obtained, it is concluded that such materials are not recommended for the production of products requiring high mechanical characteristics, however, due to the increased external sinterability, they can be used in decorative and undemanding products with mechanical properties. New directions of research in the field of studying the physico-mechanical properties of thermoplastics have been identified.

Keywords: prototyping, additive technologies, mechanical properties of materials, prototyping, reinforced thermoplastics, 3D printing.

Аддитивные технологии (3D-печать) все больше используются в современном производстве и проектировании. Например, для деталей авионики и космонавтики, медицинских имплантатов и протезов, а также инструментов и оснастки. В числе очевидных плюсов аддитивного производства может быть отмечено следующее:

- возможность создания сложных по форме деталей с высокой точностью;
- получение улучшенных свойств итогового продукта;
- скорость производства сложных деталей и элементов конструкций.

Чаще всего аддитивные технологии используются для выпуска малых партий, производства сложных по форме деталей, макетирования и прототипирования. При прототипировании изделия главной задачей выступает быстрое получение работающего опытного образца изделия, на котором возможна отработка базовых функций. При этом зачастую прототип неоднократно изменяется и повторно тестируется, в данном случае 3D-печать позволяет сократить сроки разработки за счет уменьшения времени на внесение изменений и создание прототипа [1].

Для некоторых видов задач предъявляются повышенные требования к физико-механическим свойствам материалов [2]. Решением может стать армирование материалов стеклом, карбоном или минеральными волокнами. Помимо этого способа армирования также существует еще армирование соэкструзией [3], ламинирование [4], а также армирование полостей в готовом изделии [5]. Тем не менее, влияние добавок на физикомеханические характеристики конечного продукта остается недостаточно изученным.

Для производства конструктивных элементов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) необходимы материалы, обладающие низкой плотностью при высокой механической прочности, а также достаточно высокой температурой плавления. Это обусловлено тем, что в процессе продолжительных полетов материалы могут накапливать значительное количество солнечного излучения, а двигатели БПЛА генерируют значительное количество тепла [6, 7]. Помимо этого, в корпусировании, функциональных, статичных изделиях и т.д. требуются более

высокие механические свойства без каких-либо требований к массе изделия.

Необходимость использования материалов с высокими физико-механическими свойствами требует дополнительного исследования влияния добавок на свойства материалов, сравнение указанных производителями свойств с реальными. Одним из основных недостатков информации, предложенной в открытых источниках, является отсутствие у большинства производителей данных о процентном содержании добавок, а также недостоверность свойств, заявленных производителем. Стоит отметить, что на отечественном и зарубежном рынке представлено малое разнообразие материалов с различными добавками.

Армированные термопласты, используемые для создания испытуемых изделий, были выполнены в виде пластиковой нити, армированной при производстве малыми рублеными частицами добавок, с процентом их содержания указанных в наименовании группы изделий. Исследуемые показатели и использованные методики испытаний приведены в табл. 1. В данной статье рассматриваются изделия, изготовленные из термопластов PLA (полилактид) и ABS (акрилонитрилбутадиенстирол). Изделия были поделены на группы согласно углу наклона модели (рис. 1) к печатному столу для каждого вида пластика, а также по содержанию тех или иных добавок (карбона, стекла, минеральных волокон). В итоге получилось 24 испытуемых группы. Для каждой группы выбраны два типа образцов, первый тип 1А (согласно ГОСТ 11262–2017 [8]) для исследования прочности на растяжение и относительного удлинения при разрыве, второй тип — рекомендуемый образец (согласно ГОСТ 4648–2014 [9]) для исследования усадки, плотности и

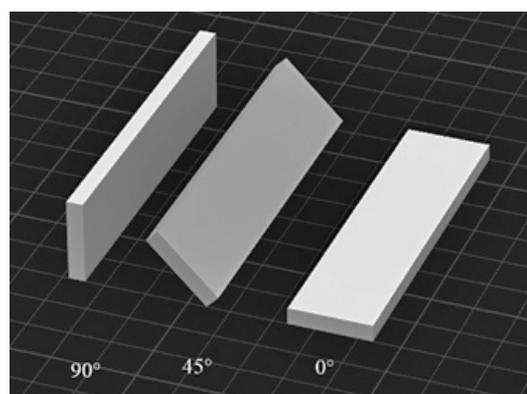


Рис. 1. Пример положения наклона модели к столу

прочности на статический изгиб. Для каждого типа образцов было изготовлено по 5 экземпляров.

Образцы изготавливались на 3D-принтере Creality K1 Max, обеспечивающем скорость печати до 500 мм/с, температуру сопла до 300 °С, ширину линии от 0,1 до 0,8 мм.

Исследование готовых изделий на усадку выполнялось с помощью цифрового штангенциркуля Энкор 10740 с погрешностью измерений не более 5 мкм. Для каждого линейного размера проводилось не менее трех индивидуальных измерений, после чего вычислялось среднеарифметическое для каждого размера. Результатом испытаний является разница между измеренными значениями размеров изготовленного образца и используемой для печати 3D-модели, выраженная в процентах.

Исследование готовых изделий на кажущую плотность выполнялось с помощью цифрового штангенциркуля Энкор 10740 с погрешностью измерений не более 5 мкм, и весов с точностью измерений до 0,01 г. Для вычисления объема образца линейные размеры брались из результатов обмера образцов на усадку. Каждый образец взвешивался, результат фиксировался с точностью до 4 значащих цифр. Кажущаяся плотность вычислялась по формуле:

$$\rho_k = \frac{m}{V},$$

где m — масса образца, г;

V — объем образца, см³.

Результатом испытаний принималось среднеарифметическое значение вычислений кажущейся плотности.

Исследование готовых изделий на статический изгиб выполнялось согласно ГОСТ 4648–2014 [9] с использованием машины

испытательной универсальной МИМ.1-5-2.1-15.1-1.1.1. Испытуемый образец прямоугольного поперечного сечения, свободно лежащий на опорах, подвергался изгибу с постоянной скоростью в середине между опорами до его разрушения или до достижения образцом заданной величины относительной деформации или прогиба. Во время испытания измерялась нагрузка, прикладываемая к образцу, и соответствующие значения прогиба посередине между опорами.

Исследование готовых изделий на растяжение выполнялось согласно ГОСТ 11262–2017 [8] с использованием машины испытательной универсальной МИМ.1-5-2.1-15.1-1.1.1. Перед испытанием измерялись толщина и ширина образцов в трех местах узкой части, после чего рассчитывались среднеарифметические значения полученных результатов, используя которые вычислялось начальное поперечное сечение образца. Образцы, у которых минимальное и максимальное значение толщины или ширины различались более чем на 0,2 мм, не допускались до испытаний. Максимальная скорость растяжения выбиралась так, чтобы время от момента приложения нагрузки к образцу до его разрушения составляло не менее 1 мин. Нагрузка и удлинение образца измерялись непрерывно.

В ходе исследования плотности материалов установлено, что плотности готового изделия отличаются от заявленной производителем, что показано в табл. 2. Эти отклонения обусловлены наличием микрополостей в детали между нитями материала, возникающих в результате особенностей печати методом FDM [10–15].

Исследование усадки готовых изделий (табл. 3) показало незначительную зависимость усадки от материала, и угла наклона модели к столу. Допустимыми значениями усадки принимаются показатели не более 0,5 %.

Таблица 1

Исследуемые характеристики деталей, изготовленных с помощью 3D-принтеров

Показатель	Метод испытаний	Единицы измерений
Усадка	–	%/мм
Кажущаяся плотность	–	г/см ³
Прочность на растяжение	ГОСТ 11262–2017	МПа
Относительное удлинение при разрыве	ГОСТ 11262–2017	%
Прочность на статический изгиб	ГОСТ 4648–2014	МПа

Таблица 2

Сравнение заявленной производителем плотности с измеренной

Материал	Заявленная плотность, г/см ³	Измеренная кажущаяся плотность, г/см ³	Кажущаяся плотность материала без добавок, г/см ³
PLA-GF16	1,31	1,24	1,15
PLA-CF4	1,21	1,16	1,15
PLA-CF10	1,22	1,15	1,15
PLA-CF20	–	1,19	1,15
ABS-GF4	1,1	0,96	0,99
ABS-GF12	1,16	1,05	0,99
ABS-CF5	–	0,95	0,99
ABS-CF15	1,11	0,96	0,99
ABS-MF5	–	1	0,99

Примечание:

GF — Grass Fiber (наполненный стеклом);

CF — Carbon Fiber (наполненный карбоном);

MF — Mineral Fiber (наполненный минеральными волокнами).

Число после типа наполнения — процентное объемное содержание добавки

В ходе исследования прочности при растяжении образцов установлено, что заявленные производителем характеристики не совпадают с измеренными. Результаты исследования прочности на растяжение приведены в табл. 4.

Таблица 3

Результаты исследования усадки

Материал	Усадка, %	Усадка изначального материала, %
PLA-GF16	0,9	0,4
PLA-CF4	0,8	0,4
PLA-CF10	0,5	0,4
PLA-CF20	0,5	0,4
ABS-GF4	0,4	0,8
ABS-GF12	0,4	0,8
ABS-CF5	0,2	0,8
ABS-CF15	0,2	0,8
ABS-MF5	1,0	0,8

В ходе проведения измерений изгибающего напряжения образцов также выявлено несоответствие заявленных производителем характеристик с измеренными, что показано в табл. 5. Также установлено, что чем больше процент армирования, тем выше визуальная спекаемость (рис. 2). Процесс проведения испытания приведен на рис. 3.

Помимо этого, установлено, что при 3D-моделировании требуется в обязательном порядке учитывать усадку материала, для того чтобы физические размеры изготавливаемого изделия соответствовали требуемым. Исследования показали, что в подавляющем большинстве случаев армирование термопластов не оказывает значительного положительного влияния на основные физико-механические характеристики материалов. В худшем случае прочность при

Таблица 4

Результаты исследования прочности на растяжение

Партия	Прочность при растяжении, МПа	Прочность при растяжении, заявленная производителем, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное удлинение, заявленное производителем, %
PLA-GF16	58,1	59,3	6,4	8,0
PLA-CF4	26,7	39,0	1,1	4,3
PLA-CF10	30,2	38,0	1,2	3,2
PLA-CF20	25,8	–	1,0	–
ABS-GF4	25,7	–	8,7	–
ABS-GF12	12,0	60,0	7,8	3,0
ABS-CF5	17,6	–	4,0	–
ABS-CF15	15,3	22,7	4,1	2,1
ABS-MF5	37,9	–	11,3	–

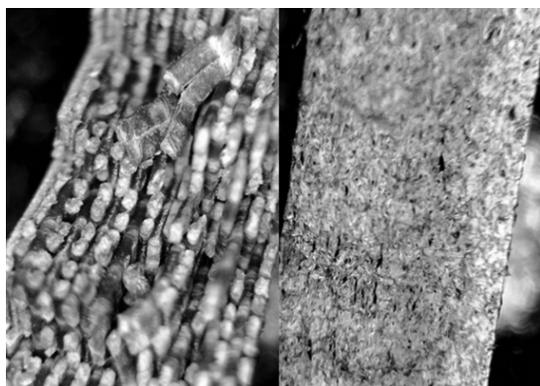


Рис. 2. Фотографии разломов PLA и ABS-GF12 в масштабе 16:1

растяжении материала уменьшалась на 69,9 %, изгибающее напряжение — на 44,1 %, а относительная деформация — на 61 %. Однако некоторые композиционные пластики, например ABS-CF5, продемонстрировал улучшение изгибаемого напряжения на 26,4 % и относительного удлинения на 16,8 %, что является наилучшим результатом среди исследованных материалов. Остальные полимерные композиции продемонстрировали либо незначительные улучшения, либо ухудшение их физико-механических свойств по сравнению с оригинальными материалами.

Проведенные исследования основных физико-механических свойств термопластов, армированных карбоновыми, стеклянными и минеральными волокнами, в контексте 3D-печати показали, что использование армирования оказывает неоднозначное влияние на характеристики материалов. В целом армирование не продемон-

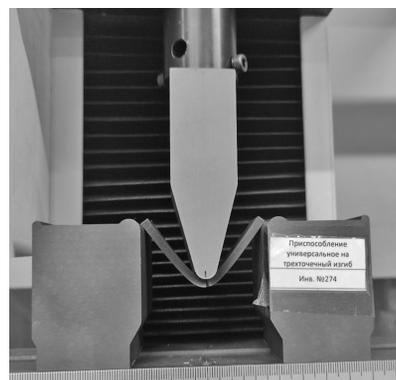


Рис. 3. Проведение испытаний на статический изгиб образца из исследуемой группы PLA-CF20

рировало значительного улучшения основных свойств, таких как прочность при растяжении, изгибающее напряжение и относительная деформация.

Заключение

В ходе данной работы решены следующие задачи:

- исследована возможность применения термопластов, армированных карбоном, стеклом и минеральными волокнами для изготовления изделий (конструктивных элементов БПЛА);
- исследованы основные механические свойства материалов для 3D-печати, армированных карбоном, стеклом и минеральными волокнами, что позволит создавать более точные трехмерные и числовые модели. Позволит быстрее и точнее переходить от прототипа к изделию, а

Таблица 5

Результаты исследования прочности на изгиб изделий из термопластов

Партия	Изгибающее напряжение, МПа	Изгибающее напряжение, заявленное производителем, МПа	Относительная деформация, %	Относительная деформация, заявленная производителем, %
PLA-GF16	62,9	85,0	2,4	8,0
PLA-CF4	64,4	103,0	3,9	4,3
PLA-CF10	61,8	89,0	3,3	3,2
PLA-CF20	49,3	–	3,2	–
ABS-GF4	50,0	–	3,7	–
ABS-GF12	55,7	–	3,5	–
ABS-CF5	63,0	–	2,9	–
ABS-CF15	53,0	74,8	2,4	2,1
ABS-MF5	58,4	–	3,9	–

также производить конечные изделия с помощью аддитивных технологий;

– выявлено отсутствие прямой корреляции между содержанием добавок из стекла и карбона на механические свойства термопластов;

– установлено значительное расхождение между заявленными и измеренными физико-механическими свойствами, что свидетельствует о необходимости проведения обязательной проверки этих характеристик при производстве изделий;

– определено, что для печати составных частей БПЛА нецелесообразно использовать армированные термопласты, из-за большей плотности и хрупкости готового изделия;

– проведены испытания на механические свойства готовых изделий (элементов конструкции БПЛА), напечатанных на 3D-принтерах FDM типа.

Помимо этого, в дальнейшем планируется проведение:

– исследований других механических и физических свойств изделий, получаемых при помощи аддитивного производства;

– исследования способов увеличения прочностных характеристик составных частей БПЛА, получаемых при помощи 3D-печати;

– исследования возможности использования гибких (резиновых) материалов для 3D-печати для создания частей БПЛА, например резиновых прокладок или виброгасящих стоек;

– исследования устойчивости материалов 3D-печати к ультрафиолетовому излучению.

Список источников

1. Кулаков К.С., Крылов Ю.П., Красников В.И. Применение аддитивных технологий для прототипирования и изготовления составных частей БПЛА // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2024. № 5–6 (191–192). С. 130–136.

2. Прошин А.А., Горячев Н.В., Горячева Е.П. и др. Область применения 3D-принтеров: робототехника и системный анализ: сб. науч. ст. / Пензенский государственный технологический университет. Пенза. Том. 1. 2015. С. 95–105.

3. Торубаров И.С., Дроботов А.В., Плотников А.Л., Гушин И.А. Развитие технологии 3D-

печати с армированием непрерывным волокном // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 8. С. 81–86.

4. Rahmani H., Najafi S.H. M., Ashori A. Mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminated composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2014. Т. 33. № 8. Pp. 733–740.

5. Никонов В.А., Акимов В.В., Осипчик В.С., Олихова Ю.В и др. Эпоксидные связующие для композитной 3D-печати // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. 31, № 11 (192). С. 82–84.

6. Каримов А.Х. Особенности проектирования беспилотных авиационных систем нового поколения // Труды МАИ. 2011. № 47. 6 с.

7. Иванов А.А., Горшков С.С. Проектирование и эксплуатация беспилотных летательных аппаратов. М.: Изд-во «Компания программных продуктов», 2019. 146 с.

8. ГОСТ 11262–2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М.: Стандартинформ, 2018. 24 с.

9. ГОСТ 4648–2014. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. М.: Стандартинформ, 2016. 25 с.

10. Смирнов М.А., Рыбкин Н.О., Ксенофонта О.Л. FDM-технология: особенности применения, преимущества, недостатки; сб. науч. тр. вузов России / «Проблемы экономики, финансов и управления производством». 2021. № 48. С. 115–122.

11. Кондрашов С.В., Пыхтин А.А., Ларионов С.А., Сорокин А.Е. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 10 (82). С. 34–49.

12. Фомина Е.А., Ваниев М.А., Нилидин Д.А. и др. Исследование влияния параметров 3D-печати на свойства изделий из АБС-пластика // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2023. № 5 (276). С. 113–118.

13. Тимошенко М.В., Кошечкина К.С., Балабанов С.В., Сычев М.М. Влияние параметров 3D-печати на физико-механические характеристики материалов // Физика и химия стекла. 2022. Т. 48, № 4. С. 484–492.

14. Михальченко А.А., Невзорова А.Б., Одарченко И.Б. Влияние режимов 3D-печати термопластами на прочностные свойства изделий //

Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2023. № 1. С. 31–40.

15. Бондаренко Б.А., Баязов В.А., Корнев О.О. и др. Подбор составов смесей для 3D-печати // Вестник Евразийской науки. 2021. Том 13, № 3. 12 с.

References

1. Kulakov K.S., Krylov Yu.P., Krasnikov V.I. Application of additive technologies for prototyping and manufacturing of UAV components // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2024. No 5–6 (191–192). Pp. 130–136.

2. Proshin A.A., Goryachev N.V., Goryacheva E.P. et al. 3D-printer's application area: robotics and system analysis: a collection of scientific articles / Penza State Technological University. Penza. Vol. 1. 2015. Pp. 95–105.

3. Torubarov I.S. et al. Development of 3D-printing technology with continuous fiber reinforcement // Proceedings of the Volgograd State Technical University. 2021. No 8. Pp. 81–86.

4. Rahmani H., Najafi S.H. M., Ashori A. Mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminated composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2014. Vol. 33, No 8. Pp. 733–740.

5. Nikonov V.A. et al. Epoxy binders for composite 3D-printing // Advances in chemistry and chemical technology. 2017. Vol. 31. No 11 (192). Pp. 82–84.

6. Karimov A.H. Design features of unmanned aircraft systems of the new generation // Proceedings of MAI. 2011. No 47. 6 p.

7. Ivanov A.A., Gorshkov S.S. Design and operation of unmanned aerial vehicles. M.: Publishing house «Software Products Company», 2019. 146 p.

8. GOST 11262–2017. Plastics. Tensile testing method. Moscow: Standartinform, 2018. 24 p.

9. GOST 4648–2014. Plastics. Static bending test method. Moscow: Standartinform, 2016. 25 p.

10. Smirnov M.A., Rybkin N.O., Ksenofontova O.L. FDM technology: application features, advantages, disadvantages // Collection of scientific papers of Russian universities «Problems of economics, finance and production management». 2021. No 48. Pp. 115–122.

11. Kondrashov S.V., Pikhtin A.A., Lariov S.A., Sorokin A.E. Influence of technological modes of FDM-printing and composition of used materials on physical and mechanical characteristics of FDM-models (review) // Proceedings of VIAM. 2019. No 10 (82). Pp. 34–49.

12. Fomina E.A., Vaniev M.A., Nilidin D.A. et al. Investigation of the influence of 3D-printing parameters on the properties of ABS-plastic products // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2023. No 5 (276). Pp. 113–118.

13. Timoshenko MV, Koshevaya KS, Balabanov SV, Sychev MM Influence of 3D-printing parameters on the physical and mechanical characteristics of materials // Physics and Chemistry of Glass. 2022. T. 48, No 4. Pp. 484–492.

14. Mikhilchenko A.A., Nevzorova A.B., Odarchenko I.B. Influence of the modes of 3D-printing with thermoplastics on the strength properties of products // Vestnik of State Technical University named after P.O. Sukhoi. 2023. No 1. Pp. 31–40.

15. Bondarenko B.A., Bayazov V.A., Kornev O.O. et al. Selection of mixture compositions for 3D-printing // Bulletin of Eurasian Science. 2021. Vol. 13, No 3. 12 p.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОПОЛИТИКА И ОБОРОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Кахраманов И.М.* Логистически-интеграционная оценка устойчивости системы материально-технического обеспечения группировки войск (сил) в новых регионах Российской Федерации3
- Куклин Р.В.* Прогнозирование параметров функционирования разведывательно-огневой системы в условиях высокотехнологичных военных конфликтов 11

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, РАСЧЕТЫ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

- Привалов А.Е., Бугайченко П.Ю., Александров М.А.* Генетический алгоритм обоснования требований к характеристикам технических систем 15
- Каптюх А.Н., Мишаков А.М.* Методика определения рационального количества ремонтных органов для выполнения ремонта военной техники23
- Коньков Д.И.* Модель сети радиосвязи как основа частотного планирования.....28
- Багрецов С.А., Петров Д.М., Гаврилов А.В., Петлик С.С.* Механизмы коррекции и методы оценки динамики изменения работоспособности исполнителя топографо-геодезических и картографических работ39

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ТЕРРОРИЗМУ

- Курков С.Н., Курков Д.С., Моргунов Д.В.* Модель определения оптимального времени противодействия боевого охранения автоколонны при нападении диверсионно-разведывательной группы 47
- Бойко А.П., Кузин П.И., Шевченко А.А.* Применение модели оптической транспортной сети специального назначения на фоне несанкционированных воздействий52
- Михайлов С.В., Бударин Я.С.* Системный подход при математическом моделировании противодействия силам противника в ходе совершения марша61
- Маслаков П.А., Бучинский Д.И., Копалов Ю.Н.* Оценка воздействия непреднамеренных импульсных помех с линейной частотной модуляцией на канал передачи данных с OFDM модуляцией66
- Гук И.В., Спивак А.И., Сауткин А.Н., Васильева С.Н.* Исследование возможности создания мобильного комплекса локализации взрыва на базе устройств для защиты от взрыва контейнерного типа..... 75
- Пучков А.С., Спивак А.И., Лебедкин А.В.* К вопросу применения взрывозащитных урн (контейнеров) для обеспечения защиты объектов критической инфраструктуры при совершении террористических актов85

Петрожицкая О.А., Новак О.С., Гук И.В. Разработка и испытания прототипов противоминной защиты нижних конечностей 100

Шафигуллин И.Ш., Александров М.А., Зубачев А.М. Учебный пункт управления как новая форма автоматизированных обучающих систем в подготовке военных специалистов 107

МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНОЛОГИИ И ИССЛЕДОВАНИЯ

Кветкин Е.И., Косяков С.И., Филиппов В.С. Маскирующие аэрозоли в нелетальных средствах поражения нарушителей 113

Андрюшкин А.Ю., Хмелевской Н.Ю., Шишленин А.Н. Теоретическое определение параметров структуры многослойного покрытия техники специального назначения с учетом его производственной дефектности 119

Нечаева В.А. Методика совершенствования эксплуатационных свойств системы электроснабжения военной автомобильной техники, применяемой в условиях Крайнего Севера 128

Кулаков К.С., Крылов Ю.П., Тархов Н.Ю. Влияние добавок из стекла и карбона на физико механические свойства термопластов для 3D-печати 137

СПИСОК АВТОРОВ СТАТЕЙ

Александров Максим Андреевич, канд. техн. наук, доцент, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7 (961) 609-24-22. E-mail: maks.aleksandrov.vka@mail.ru

Андрюшкин Александр Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Тел.: +7 (921) 634-14-80. E-mail: Sascha1a@mail.ru

Багрецов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, профессор, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7 (911) 779-86-94. E-mail: vka@mail.ru

Бойко Алексей Павлович, канд. техн. наук, доцент кафедры, Военная академия связи им. С.М. Буденного. Тел.: +7 (812) 247-98-02. E-mail: varenyxa007@rambler.ru

Бугайченко Павел Юрьевич, канд. воен. наук, старший преподаватель, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7 (812) 347-95-58. E-mail: vka@mail.ru

Бударин Ярослав Сергеевич, слушатель программы МРА, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации. Тел.: +7 (914) 000-88-73. E-mail: y.s.budarin@mail.ru

Бучинский Дмитрий Игоревич, канд. техн. наук, преподаватель кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7 (926) 015-82-74. E-mail: reys-rd@yandex.ru

Васильева Светлана Николаевна, младший научный сотрудник научно-исследовательского института специальных материалов АО «НПО Спецматериалов». Тел.: +7 (812) 542-87-70, доб. 2268. E-mail: VasilyevaSN@npo-sm.ru

Гаврилов Алексей Витальевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7 (911) 083-68-54. E-mail: vka@mail.ru

Гук Игорь Владимирович, канд. техн. наук, заместитель директора научно-исследовательского института специальных материалов АО «НПО Спецматериалов». Тел.: +7 (812) 542-87-70, доб. 2364. E-mail: guk@npo-sm.ru

Зубачев Алексей Михайлович, канд. техн. наук, заместитель начальника кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского.

Тел.: +7 (812) 347-95-58. E-mail: vka@mail.ru

Каптюх Александр Николаевич, канд. воен. наук, профессор, начальник отдела научно-исследовательского института, Военная академия материально-технического обеспечения им. А.В. Хрулева. E-mail: vattnio4@yandex.ru

Кахраманов Илгар Мариш оглы, начальник академии, Военная академия материально-технического обеспечения им. А.В. Хрулева. Тел.: +7 (927) 143-60-21. E-mail: sergei-stulov007@mail.ru

Кветкин Евгений Игоревич, старший научный сотрудник, 12 ЦНИИ Минобороны России. Тел.: +7 (920) 228-91-58. E-mail: kvetk1n@mail.ru

Коньков Денис Иванович, адъюнкт, Военная академия связи им. С.М. Буденного. Тел.: +7 (953) 732-16-43. E-mail: den.konkov.94@mail.ru

Копалов Юрий Николаевич, канд. техн. наук, преподаватель кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7 (999) 200-18-04. E-mail: yury.kopalov.s@mail.ru

Косяков Сергей Иванович, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, 12 ЦНИИ Минобороны России. Тел.: +7 (916) 036-46-15. E-mail: ksi1972.02@mail.ru

Крылов Юрий Павлович, специалист научно-исследовательского института специальных материалов АО «НПО Спецматериалов». Тел.: +7 (812) 542-87-70. E-mail: yuri.krylov@pro-sm.ru

Кузин Павел Игоревич, канд. техн. наук, доцент кафедры, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова. Тел.: +7 (952) 203-30-67. E-mail: kuzik78@mail.ru

Куклин Роман Викторович, канд. техн. наук, докторант, Михайловская военная артиллерийская академия. Тел.: +7 (981) 680-55-50.

Кулаков Константин Сергеевич, канд. техн. наук, начальник специального конструкторского бюро АО «НПО Спецматериалов». Тел.: +7 (812) 542-87-70.

Курков Дмитрий Сергеевич, д-р техн. наук, профессор кафедры, военный учебный центр, Пензенский государственный универси-

тет. Тел.: +7 (962) 473-11-70. E-mail: hammer22@bk.ru

Курков Сергей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры, Военная академия материально-технического обеспечения им. А.В. Хрулева, (филиал г. Пенза). Тел.: +7 (965) 634-13-50. E-mail: doc.kurkov@mail.ru

Лебедкин Александр Владимирович, инженер научно-исследовательского института специальных материалов АО «НПО Спецматериалов». Тел.: +7 (812) 542-87-70. доб. 2268. E-mail: lebedkin@npo-sm.ru

Маслаков Павел Андреевич, канд. техн. наук, доцент кафедры, кафедры «Космических радиотехнических систем», Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7 (911) 083-36-89. E-mail: maslakov345@yandex.ru

Михайлов Сергей Владимирович, командир, войсковая часть 59968. Тел.: +7 (395) 237-16-64.

Мишаков Александр Михайлович, канд. техн. наук, заместитель начальника отдела организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров, Военная академия материально-технического обеспечения им. А.В. Хрулева. E-mail: vatnio4@yandex.ru

Моргунов Дмитрий Валерьевич, адъюнкт, Военная академия материально-технического обеспечения им. А.В. Хрулева, (филиал г. Вольск). Тел.: +7 (999) 371-69-75. E-mail: morgani52@mail.ru

Нечаева Вероника Анатольевна, преподаватель, Военная академия материально-технического обеспечения им. А.В. Хрулева. Тел.: +7 (965) 874-44-77. E-mail: nechver@mail.ru

Новак Ольга Сергеевна, начальник производства полимерной брони, АО «НПО Спецматериалов». E-mail: o.novak@npo-sm.ru.

Петлик Степан Сергеевич, канд. воен. наук, доцент кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7 (911) 083-68-54. E-mail: vka@mil.ru

Петров Дмитрий Михайлович, д-р экон. наук, доцент, профессор кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7 (921) 934-06-75. E-mail: vka@mil.ru

Петрожицкая Ольга Анатольевна, глав-

ный конструктор производства полимерной брони, АО «НПО Спецматериалов». Тел.: +7 (905) 220-03-27. E-mail: o.petrozhitskaya@npo-sm.ru

Привалов Александр Евгеньевич, канд. техн. наук, старший преподаватель, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7 (812) 347-95-58. E-mail: vka@mail.ru

Пучков Андрей Сергеевич, директор научно-исследовательского института специальных материалов АО «НПО Спецматериалов». Тел.: +7 (812) 542-87-70.

Сауткин Александр Николаевич, канд. техн. наук, доцент, ведущий инженер по научно-технической работе и внезаводским испытаниям, ЛМЗ им. К. Либкнехта. Тел.: +7 (921) 916-25-67.

Спивак Александр Иванович, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского института специальных материалов АО «НПО Спецматериалов». Тел.: +7 (812) 291-45-03.

Тархов Николай Юрьевич, студент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова. Тел.: +7 (812) 294-58-97.

Филиппов Виталий Сергеевич, заместитель начальника главного центра 12 ГУ Минобороны России. Тел.: +7 (929) 562-56-27. E-mail: filat_1982@mail.ru

Хмельевской Никита Юрьевич, магистрант, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Тел.: +7 (905) 159-50-34. E-mail: nkhmelevskof@gmail.com

Шафигуллин Ильдар Шайхутдинович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7 (812) 347-95-58. E-mail: vka@mil.ru

Шевченко Александр Александрович, канд. техн. наук, научный сотрудник научного исследовательского центра, Военная академия связи им. С.М. Буденного. Тел.: +7 (812) 247-98-02.

Шишленин Александр Николаевич, аспирант, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Тел.: +7 (921) 329-04-24. E-mail: shishlenin@yandex.ru

LIST OF AUTHORS OF ARTICLES

Aleksandrov Maksim Andreevich, Candidate of Sciences, Associate Professor in Voennokosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhaiskogo. Ph.: +7 (961) 609-24-22. E-mail: maks.aleksandrov.vka@mail.ru

Andryushkin Aleksandr Yur'evich, Candidate of Sciences, associate professor, Head of the Department in Baltiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet «VOENMEKh» im. D.F. Ustinova. Ph.: +7 (921) 634-14-80. E-mail: Saschala@mail.ru

Bagretsov Sergey Alekseevich, Doctor of Sciences, professor, Professor in Voennokosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhaiskogo. Ph.: +7 (911) 779-86-94. E-mail: vka@mil.ru

Boiko Alexey Pavlovich, Candidate of Sciences, Professor in Voennaya akademiya svyazi im. S.M. Budennogo. Ph.: +7 (812) 247-98-02. E-mail: varenysa007@rambler.ru

Buchinsky Dmitry Igorevich, Candidate of Sciences, lecturer of the Department in Voennokosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhaiskogo. Ph.: +7 (926) 015-82-74. E-mail: reys-rd@yandex.ru

Budarin Iaroslav Sergeevich, MBA student in Rossiyskaya akademiya narodnogo khoziaistva i gosudarstvennoi sluzhby pri Prezidente Rossiiskoi Federatsii. Ph.: +7 (914) 000-88-73. E-mail: y.s.budarin@mail.ru

Bugaichenko Pavel Iurevich, Candidate of Sciences, senior lecturer in Voennokosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhaiskogo. Ph.: +7 (812) 347-95-58. E-mail: vka@mail.ru

Filippov Vitalii Sergeevich, Deputy Head of the Main Center in 12 GU Minoborony Rossii. Ph.: +7 (929) 562-56-27. E-mail: filat_1982@mail.ru

Gavrilov Alexey Vitalievich, Candidate of Sciences, associate professor, Associate Professor of the Department in Voennokosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhaiskogo. Ph.: +7 (911) 083-68-54. E-mail: vka@mil.ru

Guk Igor Vladimirovich, Candidate of Sciences, Deputy Director in NPO Spetsmaterialov. Ph.: +7 (812) 542-87-70. E-mail: guk@npo-sm.ru

Kahramanov Ilgar Marish ogly, Head of the Voennaya akademiya materialno-tekhnicheskogo obespecheniya im. A.V. Khruleva. Ph.: +7 (927) 143-60-21. E-mail: sergei-stulov007@mail.ru

Kaptiukh Aleksandr Nikolaevich, Candidate of Sciences, professor, Head of the Department of the Research Institute, in Voennaya akademiya materialno-tekhnicheskogo obespecheniya im. A.V. Khruleva. E-mail: vattnio4@yandex.ru

Khmelevskoi Nikita Iurevich, undergraduate in Baltiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet «VOENMEKh» im. D.F. Ustinova. Ph.: +7 (905) 159-50-34. E-mail: nkhmelevskof@gmail.com

Konkov Denis Ivanovich, Associate in S.M. Budyonny Military Academy of the Signal Corps. Ph.: +7 (953) 732-16-43. E-mail: den.konkov.94@mail.ru

Kopalov Iurii Nikolaevich, Candidate of Sciences, lecturer of the Department in Voennokosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhaiskogo. Ph.: +7 (999) 200-18-04. E-mail: yury.kopalov.s@mail.ru

Kosiakov Sergei Ivanovich, Candidate of Sciences, associate professor, Senior Researcher in 12 TsNII Minoborony Rossii. Ph.: +7 (916) 036-46-15. E-mail: ksi1972.02@mail.ru

Krylov Iurii Pavlovich, specialist in NPO Spetsmaterialov. Ph.: +7 (812) 542-87-70. E-mail: yuri.krylov@npo-sm.ru

Kuklin Roman Viktorovich, Candidate of Sciences, doctoral student in Mikhailovskaya voennaya artilleriyskaya akademiya. Ph.: +7 (981) 680-55-50.

Kulakov Konstantin Sergeevich, Candidate of Sciences, Head in NPO Spetsmaterialov. Ph.: +7 (812) 542-87-70.

Kurkov Dmitry Sergeevich, Doctor of Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department, in Penzenskii gosudarstvennyi universitet Ph.: +7 (962) 473-11-70. E-mail: hammer22@bk.ru

Kurkov Sergey Nikolaevich, Doctor of Sciences, professor, Professor of the Department in Voennaya akademiya materialno-tekhnicheskogo obespecheniya im. A.V. Khruleva, (filial g. Penza). Ph.: +7 (965) 634-13-50. E-mail: doc.kurkov@mail.ru

Kuzin Pavel Igorevich, Candidate of Sciences, Associate Professor in Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi lesotekhnicheskii universitet im. S.M. Kirova. Ph.: +7 (952) 203-30-67. E-mail: kuzik78@mail.ru

Kvetkin Evgenii Igorevich, Senior Researcher in 12 TsNII Minoborony Rossii. Ph.: +7 (920) 228-91-58. E-mail: kvetk1n@mail.ru

Lebedkin Aleksandr Vladimirovich, the engineer in NPO Spetsmaterialov. Ph.: +7 (812) 542-87-70. E-mail: lebedkin@npo-sm.ru

Maslakov Pavel Andreevich, Candidate of Sciences, Associate Professor in Voenno-kosmicheskaja akademiia im. A.F. Mozhaiskogo. Ph.: +7 (911) 083-36-89. E-mail: maslakov345@yandex.ru

Mikhailov Sergei Vladimirovich, Commander in voiskovaja chast' 59968. Ph.: +7 (395) 237-16-64.

Mishakov Aleksandr Mikhailovich, Candidate of Sciences, Deputy Head in Voennaia akademiia materialno-tekhnicheskogo obespecheniia im. A.V. Khruleva. E-mail: vattnio4@yandex.ru

Morgunov Dmitrij Valer'evich, Associate in Voennaia akademiia materialno-tekhnicheskogo obespecheniia im. A.V. Khruleva, (filial g. Volsk). Ph.: +7 (999) 371-69-75. E-mail: morgun152@mail.ru

Nechaeva Veronika Anatolevna, lecturer in Voennaia akademiia materialno-tekhnicheskogo obespecheniia im. A.V. Khruleva. Ph.: +7 (965) 874-44-77. E-mail: nechver@mail.ru

Novak Olga Sergeevna, the chief designer in NPO Spetsmaterialov. E-mail: o.novak@npo-sm.ru

Petlik Stepan Sergeevich, Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department in Voenno-kosmicheskaja akademiia im. A.F. Mozhaiskogo. Ph.: +7 (911) 083-68-54. E-mail: vka@mil.ru

Petrov Dmitry Mikhailovich, Doctor of Sciences, associate professor, Professor of the Department in Voenno-kosmicheskaja akademiia im. A.F. Mozhaiskogo. Ph.: +7 (921) 934-06-75. E-mail: vka@mil.ru

Petrozhitskaja Olga Anatolevna, in NPO Spetsmaterialov. Ph.: +7 (905) 220-03-27. E-mail: o.petrozhitskaya@npo-sm.ru

Privalov Aleksandr Evgenevich, Candidate of Sciences, senior lecturer in Voenno-kosmicheskaja akademiia im. A.F. Mozhaiskogo. Ph.: +7 (812) 347-95-58. E-mail: vka@mail.ru

Puchkov Andrej Sergeevich, in AO «NPO Spetsmaterialov». Ph.: +7 (812) 542-87-70.

Sautkin Aleksandr Nikolaevich, Candidate of Sciences, associate professor, leading engineer in scientific and technical Work and off-site testing, Director in LMZ im. K. Libknekhta. Ph.: +7 (921) 916-25-67.

Shafigullin Ildar Shaikhutdinovich, Candidate of Sciences, associate professor, the head, the associate professor of the department, in Voenno-kosmicheskaja akademiia im. A.F. Mozhaiskogo. Ph.: +7 (812) 347-95-58. E-mail: vka@mil.ru

Shevchenko Alexander Alexandrovich, Candidate of Sciences, Researcher in Voennaia akademiia sviazi im. S.M. Budennogo. Ph.: +7 (812) 247-98-02.

Shishlenin Aleksandr Nikolaevich, postgraduate in Baltiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet «VOENMEKh» im. D.F. Ustinova. Ph.: +7 (921) 329-04-24. E-mail: shishlenin@yandex.ru

Spivak Aleksandr Ivanovich, Candidate of Sciences, associate professor, senior researcher in NPO Spetsmaterialov. Ph.: +7 (812) 291-45-03. E-mail: spivak@npo-sm.ru

Tarkhov Nikolai Iurevich, student in Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi lesotekhnicheskii universitet im. S.M. Kirova. Ph.: +7 (812) 294-58-97.

Vasil'eva Svetlana Nikolaevna, junior researcher in NPO Spetsmaterialov. Ph.: +7 (812) 542-87-70. E-mail: VasilyevaSN@npo-sm.ru

Zubachev Aleksei Mikhailovich, Candidate of Sciences, the deputy head in Voenno-kosmicheskaja akademiia im. A.F. Mozhaiskogo. Ph.: +7 (812) 347-95-58. E-mail: vka@mil.ru

ПАМЯТКА АВТОРУ

по подготовке к публикации научно-технической статьи

Структура статьи

1. Аннотация (реферат). Повествует о содержании работы и показывает, что, по мнению автора, наиболее ценно и применимо в выполненной им работе.

2. Вводная часть. Обоснование актуальности темы: важность, особенность, известный вариант решения, недостатки его.

3. Основная часть. Описание предлагаемого варианта решения: начальные условия решения задачи, проведение исследования (место исследования, основные данные о предмете исследования), сущность предлагаемого варианта решения, методы (наблюдение, эксперимент, моделирование, расчёт, разработка, конструирование, проектирование, изготовление, методы управления и пр.), технические средства реализации, экспериментальная проверка.

Оценка предлагаемого варианта решения (определение степени новизны результата): особенности предлагаемого варианта решения (преимущества перед аналогами, эквивалентные результаты, недостатки явные, предполагаемые), сведения об авторских свидетельствах и патентах, экономическая, технологическая оценка, внедрения.

Необходимо представить результаты в наглядной форме: в виде таблиц, графиков, диаграмм. Применение математики для объяснения полученных результатов должно быть минимальным (не загромождать текст формулами).

Не следует приводить пространные рассуждения и описания, повторять в тексте подрисовочные подписи при ссылках на рисунки, один и тот же материал представлять в различной форме: в тексте и таблице, в формуле и графике, в таблице и графике и т.п.

4. Выводы. Должны показывать, что получено и иметь характер тезисов, не могут быть слишком многочисленными.

5. Список литературы. Важно правильно оформить ссылку на источник в списке, указывая при этом фамилии и инициалы авторов, название журнала (монографии), год издания, выпуск (том), номер, страницы. Читатель должен иметь возможность найти указанный источник. Количество источников должно быть не менее 10. Оформление библиографических списков необходимо осуществлять по ГОСТам: ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка». Общие требования правила составления и ГОСТ Р 7.0.12-2011 «Библиографическая запись. Сокращение слов и словосочетаний на русском языке. Общие требования и правила».

Структура представления материалов для публикации

Авторский оригинал статьи должен в обязательном порядке содержать следующие элементы:

На русском и английском языках:

- название статьи;
- индекс УДК;
- фамилия, имя, отчество авторов полностью, ученая степень, место работы, e-mail;
- аннотация — размером 600–800 знаков;
- ключевые слова;
- список литературы, не менее 10 источников.

На русском языке:

- основной текст, содержащий в себе формулы, таблицы и иллюстрации.

Требования к оформлению публикации

Заголовок статьи набирать исключительно строчными буквами.

Текст: материалы набираются в текстовом редакторе Microsoft Word с расширением *.rtf или *.doc, шрифт Times New Roman Cyr, размер 12, **без стилового оформления.**

Текст должен быть отредактирован, набран без переносов слов, разрядка текста исключается.

В статье не должно быть повторов, излишних подробностей, частных деталей, известных положений, **громоздких таблиц и формул.** Следует избегать сокращений. Все имеющиеся в тексте аббревиатуры, сокращения и условные обозначения должны быть расшифрованы.

Не допускается использование сносок, закладок, нумерованных списков (нумерацию пунктов, подразделов). Для заголовков и подзаголовков **запрещается** использовать специальные стили и подчеркивания. Ссылки в тексте на литературу даются в квадратных скобках.

Таблицы представляются **без использования сканирования**, цветного фона, размер шрифта — 10 пт (параметры таблицы, ширина × высота, не более 165 × 240 мм).

Иллюстрации (графики, рисунки) должны быть черно-белые и выполнены в форматах *.jpeg или *.tif с разрешением не менее 300 dpi для штриховых изображений (схем, чертежей, графиков) и не менее 600 dpi для полутоновых (фотографии и т.п.); иметь линейные размеры не превышающие 165 × 240 мм. Дополнительно каждая иллюстрация прилагается отдельным файлом. В имени файла следует указать порядковый номер иллюстрации.

Все буквенные и цифровые обозначения, приведенные на иллюстрациях, поясняются или в основном тексте, или в подписи.

Иллюстрации, таблицы должны иметь порядковый номер и название.

Математические формулы следует набирать **исключительно в редакторе формул Math Type** (размеры символов: обычный — 11 пт, крупный индекс — 8 пт, мелкий индекс — 5 пт, крупный символ — 15 пт, мелкий символ — 10 пт. Шрифты: Times New Roman — для стилей Текст, Функция, Переменная, Матрица-вектор; Symbol — для стилей Греческий, Символ. Для стиля Переменная следует выбирать наклонное начертание, для стиля Матрица-вектор — полужирное). Нумерация формул производится с правой стороны. Расшифровка формульных обозначений дается в тексте после слова «где» без абзацного отступа. **Использование сканированных формул запрещается.**

Единицы физических величин следует приводить в системе СИ.

В редакцию предоставляются электронная версия и контрольная распечатка статьи, которая должна быть подписана всеми авторами. Электронная и бумажная версии статьи должны быть полностью идентичными.

Объем статьи должен быть не более 10 листов формата А4.

Все статьи должны сопровождаться экспертными заключениями о допустимости публикации материала статьи в открытой печати.

К статьям прилагаются рецензии внешних рецензентов.

Материалы представляются в электронном виде (CD, флеш-карта) или по e-mail: vot@npo-sm.ru

Плата за публикацию статей с авторов, в том числе с аспирантов не взимается.

Материалы, не отвечающие требованиям, не рассматриваются

ISSN 2306-1456

ПОДПИСКА
на 2025 год

ВОПРОСЫ ОБОРОННОЙ ТЕХНИКИ
Серия 16. Технические средства
противодействия терроризму

Подписной индекс № 41271
в объединенном каталоге
«Пресса России»

НПО Спецматериалов

195277, г. Санкт-Петербург, Б. Сампсониевский пр., д. 28-а, литера Б

БАНКОВСКИЕ РЕКВИЗИТЫ

АО «НПО Спецматериалов»

Р/с 40702810900000000547	БИК 044030889	К/счет 30101810400000000889	
В ЗАО «Экспортно-импортный банк», г. Санкт-Петербург			
ИНН 7806125671	Код ОКОНХ 17210	Код по ОКПО 31041642	КПП 780201001

СЧЕТ № *

Дата: « _____ » _____ 2025 г.

Предмет счета	Кол-во комплектов	Цена одного комплекта (руб.)	Сумма (руб.)
Подписка на журнал «ВОТ. Серия 16» На 2025 год – 6 сдвоенных номеров (январь–декабрь)		6360-00	
НДС 10%		636,00	
Итого с учетом НДС		6996,00	

Всего к оплате (в т.ч. НДС): шесть тысяч девятьсот девяносто шесть рублей 00 копеек

**Счёт на подписку будет выставлен после подачи заявки на эл. почту: commerce@npo-sm.ru*

Начальник ЦРСИ

Бухгалтер



/В. П. Кныш/

/Г. И. Фёдорова/

ВНИМАНИЕ!

В платежном поручении в графе «Назначение платежа» обязательно укажите:

- * наименование издания в период подписки
- * номер счета, на основании которого производится оплата
- * контактный телефон
- * подробный почтовый адрес, на который будет высылаться журнал

ОТДЕЛ АДРЕСНОЙ ПОДПИСКИ

Тел. : (812) 600-75-54
Факс: (812) 542-75-58
E-mail: vot@npo-sm.ru

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Ответственность за достоверность информации, точность фактов, цифр и цитат, а также за то, что в материалах нет данных, не подлежащих открытой публикации, несут авторы. В соответствии с Законом РФ «О средствах массовой информации» редакция имеет право не вступать в переписку с авторами. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Вопросы оборонной техники» обязательна.

Вопросы оборонной техники. Серия 16.
Технические средства противодействия терроризму. 2025. Вып. 1–2 (199–200)

Компьютерная верстка — М.А. Лаурман
Корректор — Е.А. Красикова, А.К. Райхчин

Подписано в печать 11.02.2025
Формат 60x90 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л.
Тираж 600 экз. Заказ №
Отпечатано в типографии «Любавич».
ООО «Первый издательско-полиграфический холдинг»,
Санкт-Петербург, Б. Сампсониевский пр., 60, лит. «У».
Тел.: (812) 603 25 25.
Цена свободная.