

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 11–12 (209–210)



Москва • 2025

Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. — М.: ВНИИ «Центр». — СПб.: АО «НПО Спецматериалов». — СПб.: Любавич. 2025. Вып. 11–12 (209–210).

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

**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
и Единый государственный перечень научных изданий — «Белый список».

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. Н.М. Сильников, д.т.н., профессор О.А. Финько,
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. N.M. Silnikov, D.Sc. O.A. Fin'ko,
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 621.296

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_3

**МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В РАЙОНЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ СЕТИ АБОНЕНТСКОГО РАДИОДОСТУПА**

**A TECHNIQUE FOR INCREASING THE RELIABILITY OF ESTIMATING
PARAMETERS OF THE ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT IN THE AREA
OF OPERATION OF ELEMENTS OF THE RADIO ACCESS NETWORK**

*А.С. Ефанов, д-р техн. наук С.А. Иванов, канд. техн. наук Е.В. Вершенник,
д-р воен. наук Ю.И. Стародубцев*

A.S. Efanov, D.Sc. S.A. Ivanov, Ph.D. E.V. Vershennik, D.Sc. Yu.I. Starodubtsev

Военная академия связи им. С.М. Буденного

В статье рассмотрены вопросы оценки функционирования сети абонентского радиодоступа для удовлетворения потребностей ее высококомобильных потребителей в предоставляемых услугах. Известные методики оценки показателей качества радиосвязи [1–4] опираются на допущение об единообразии типа подстилающей поверхности на интервале радиосвязи и известном уровне помех. Объективное состояние радиоканала далеко от этого допущения, что связано с уникальным уровнем шума в конкретном месте приема и большим разнообразии типов подстилающей поверхности на интервале радиосвязи, а также изменениями диэлектрической проницаемости среды. Представленная методика позволяет с заданной достоверностью оценить качество обеспечения услугами связи потребителей сети абонентского радиодоступа.

Ключевые слова: сеть абонентского радиодоступа, подстилающая поверхность, электромагнитная обстановка, качество услуг.

This article examines the performance assessment of a subscriber radio access network to meet the service needs of its highly mobile consumers. Known methods for assessing radio communication quality [1–4] rely on the assumption of uniformity in the underlying surface type over the radio link interval and a known interference level. The objective state of a radio channel deviates from this assumption due to the unique noise level at a specific reception location and the wide variety of underlying surface types over the radio link interval, as well as variations in the permittivity of the medium. The presented method enables the quality of service provision to subscribers of a subscriber radio access network to be assessed with a given degree of reliability.

Keywords: subscriber radio access network, indicator, evaluation, integral indicator.

Появление нового класса объектов (например, робото-технических комплексов (РТК) роевого типа [5, 6]), ограниченных по времени функционирования, энергетике, возможностям и другим показателям, определили ужесточение подходов к планированию их применения. Ограничение этих по-

казателей требует качественно более детализированных исходных данных об обстановке в районе их применения [7] в части касающейся организации каналов их управления и обмена информацией (как между собой, так и с оператором), что и определило необходимость разработки методики.

Распространение радиоволн сопровождается искажением сигналов, обусловленным особенностями среды распространения [8]. Кроме того, затухание радиоволн в процессе их распространения зависит от диапазона рабочих частот радиолинии, механизма их распространения, относительной высоты подвеса антенн, типа подстилающей поверхности на линии связи, диэлектрической проницаемости среды, относительной длинной линии связи (для учета или не учета сферичности Земли) и от других параметров.

Необходимо отметить, что тип подстилающей поверхности и диэлектрическая проницаемость среды могут отличаться даже в пределах одной линии связи, что связано прежде всего с многообразием природных условий и факторами техногенного характера. Это определило традиционный «усредненный» подход к учету этих параметров.

Сети абонентского радиодоступа можно представить как совокупность линий связи и средств связи, связывающих абонентов между собой. На рис. 1 буквами A, B, C, D и E обозначены абоненты; n_2 и n_3 представляют собой индивидуальные средства связи, а n_1 — средство связи коллективного пользования.

Радиолиния состоит из следующих частей [9, 10]: тракта передачи; среды, в которой происходит распространение электромагнитных волн (радиоволн); тракта приема и подстилающей по-

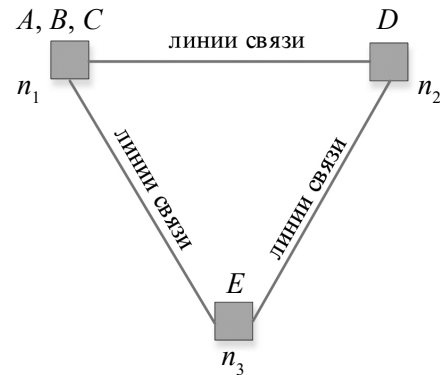


Рис. 1. Обобщенная схема сети абонентского радиодоступа

верхности. На рис. 2 представлены: передающее устройство с выходной мощностью P_1 ; фидер передающего устройства с коэффициентом затухания $\eta_{\phi 1}$; антенна передающего устройства с подводимой мощностью P_{1A} и коэффициентом усиления G_1 , входящие в тракт передачи; приемное устройство, принимающее полезный сигнал с мощностью P_c и помеху с мощностью P_n ; фидер приемного устройства с коэффициентом затухания $\eta_{\phi 2}$; антенна приемного устройства с подводимой мощностью P_{2A} и коэффициентом усиления G_2 . На распространение радиоволн также влияет характер подстилающей поверхности и диэлектрическая проницаемость среды, поглощающие их энергию, вызывая затухание по мере удаления от передающей антенны.

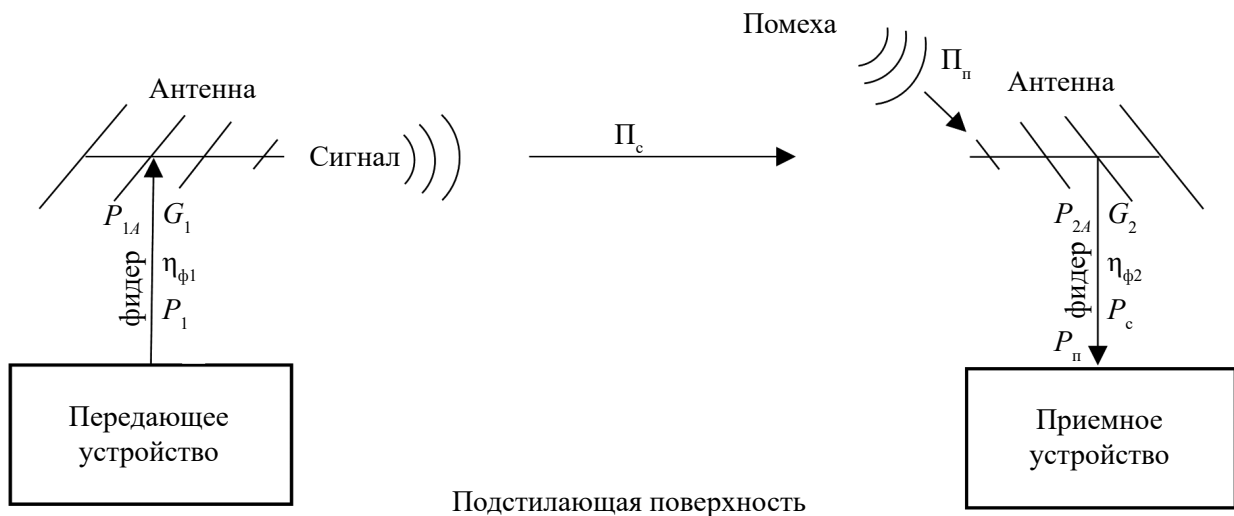


Рис. 2. Обобщенная схема радиолинии

Известные методики расчета радиолинии опираются на допущение об единообразии типа подстилающей поверхности и диэлектрической проницаемости среды на линии связи и известном уровне помех в месте приема. Объективная реальность свидетельствует об обратном: уровень шума в конкретном месте приема всегда уникален, большое разнообразие типов подстилающей поверхности на линии связи может наблюдаться даже на расстоянии в 1 км, а запыленность среды распространения, ее влажность или электромагнитная обстановка (природного и техногенного характера) фактически не поддаются расчету и являются вариативными в зависимости от погодных условий, времени года и суток. Данные обстоятельства снижают точность и достоверность проводимых математических расчетов, необходимых как для создания тактико-технических требований на разработку телекоммуникационных

модулей в составе РТК, так и на планирование применения уже существующих.

На приемную сторону сигнал приходит с измененными характеристиками, что связано с внутренними шумами передатчика, влиянием среды распространения (в том числе электромагнитная обстановка) и внутренними шумами самого приемника. Кроме того, внутренние шумы зависят от условий функционирования приемника или передатчика, и в каждом конкретном случае они могут быть различны (в зависимости от температуры окружающей среды, атмосферного давления, электромагнитной обстановки и других параметров).

Таким образом, задача оценки влияния внешних факторов на ведение радиосвязи и прогнозирование уровня сигнала на выходе приемника имеет большое практическое значение для организации и ведения радиосвязи, а большое



Рис. 3. Обобщенная структура блок-схемы методики оценки функционирования сети абонентского радиодоступа

разнообразие способов ведения радиомониторинга (мониторинга) и методик расчета ослабления радиолинии лишь подтверждает их неточность или ограниченную применимость.

Структура методики включает в себя 4 основных блока (рис. 3):

– в первом блоке осуществляется формирование исходных данных по требованиям к состоянию радиоканала;

– во втором блоке осуществляется ведение радиомониторинга и накопление статистических данных;

– в третьем блоке осуществляется дотраивание системы радиомониторинга до достижения требуемого уровня корреляции исследуемых показателей;

– в четвертом блоке осуществляют вычисление интегрального показателя, учитывающего диэлектрическую проницаемость среды и электрическую проводимость подстилающей поверхности.

Исходными данными являются:

1. Площадь района ведения радиомониторинга S , координатная сетка для привязки средств мониторинга к местности, координаты исследуемой территории (x, y) ;

2. Множество средств радиосвязи, которые являются средством радиомониторинга:

$$\{R\} = \{R_1\} \cup \{R_2\} \cup \{R_i\},$$

и их тактико-технические характеристики

$$\{R_i\} = \{F_i; \Delta F_i; P_i; \Delta P_i; M_i; V_i; \Delta V_i; G_i; \eta_{\text{фи}}; \dots\},$$

где F_i — частотный диапазон работы средства мониторинга, МГц;

ΔF_i — шаг перестройки частоты средства мониторинга, МГц;

P_i — мощность средства связи, Вт;

ΔP_i — шаг перестройки мощности передатчика средства мониторинга, Вт;

M_i — вид модуляции;

V_i — скорость передачи данных;

ΔV_i — шаг изменения скорости передачи данных;

G_i — коэффициент усиления антенны;

$\eta_{\text{фи}}$ — коэффициент затухания фидера и др.;

3. Требуемое значение коэффициента корреляции уровня шума $K_{\text{корр.ур.ш.}}$;

4. Требуемая точность вычисления коэффициента корреляции $\rho_{\text{коэф.бит.ош.тр.}}$;

5. Периодичность измерений уровня шума $\Delta t_{\text{ур.ш.}}$;

6. Содержание и размер тестовых последовательностей;

7. Периодичность отправки тестовых последовательностей $\Delta t_{\text{тест.п.}}$;

8. Требуемое значение коэффициента битовой ошибки $K_{\text{коэф.бит.ош.тр.}}$;

9. Алгоритм задействования средств радиомониторинга;

10. Идентификаторы радиоприемных и радиопередающих устройств средств радиомониторинга;

11. Эталонная кодовая комбинация.

Ограничением является утверждение, что дистанционное управление средствами радиомониторинга реализовано.

На первом этапе осуществляют аппроксимацию формы района ведения радиомониторинга прямоугольной геометрической фигурой, описанной вокруг района радиомониторинга, что позволяет быстро вычислять ее геометрические параметры, такие как длина, ширина, площадь, а также вычислять расстояния между средствами радиомониторинга и определять их местоположение. При ведении радиосвязи земной волной геометрические размеры прямоугольника можно принять равным 25 на 30 км. В случае, если район радиомониторинга превышает эти размеры, то он разбивается на n прямоугольников.

Далее размещают средства радиомониторинга на углах прямоугольной геометрической фигуры и определяют их координаты.

Дистанционно с центра управления радиомониторингом включаются все радиоприемные устройства средств радиомониторинга в сканирующем режиме в заданном диапазоне частот F_i с заданным шагом перестройки ΔF_i и измеряется уровень шума $P_{\text{п}}$ на заданных частотах, результаты измерений передаются в центр управления радиомониторингом. При этом уровень шума измеряется на выходе демодулятора, что позволяет учесть при планировании трасс радиолиний внутренние шумы приемника, зависящие от условий его функционирования.

Шаг времени Δt выбирается в зависимости от требуемых значений точности или ограни-

чений на размер памяти. Чем меньше значение Δt , тем выше точность прогнозирования уровня шума в конкретный момент времени, но при этом необходимо хранить больше количество данных.

Шаг времени Δt может быть увеличен после статистической обработки уровня шума в заданной точке и выявления периодов его квазистационарности для различных диапазонов частот, что обусловит уменьшение занимаемой данными объема памяти, а также снизит нагрузку на сеть связи, за счет передачи меньшего количества результатов измерений.

Осуществляя статистическую обработку результатов измерений, определяют: функцию распределения; погрешность измерения; математическое ожидание; дисперсию; среднее квадратическое отклонение; моду; медиану, а при необходимости и другие параметры [11].

Проведя статистическую обработку, осуществляется корреляционная обработка статистических данных об уровне шума на сходных интервалах времени, полученных приемными устройствами, для чего вычисляют коэффициент корреляции значения уровня шума для каждой пары средств радиомониторинга.

Для установления наличия корреляционной связи рассчитывается коэффициент корреляции Пирсона r , представляющий собой меру корреляции, подходящую для двух метрических переменных, измеренных на одной и той же выборке [12]:

$$r = \frac{\sum z_x z_y}{n - 1},$$

где $z_x = \frac{X_i - \bar{X}}{S_x}$ — отклонение уровня шума от среднего значения;

$$z_y = \frac{Y_i - \bar{Y}}{S_y} \text{ — отклонение расстояния между}$$

приемным и передающим средством радиомониторинга от среднего значения.

Сравнивая вычисленный коэффициент корреляции с требуемым, при его малом значении принимается решение об увеличении количества радиоприемных устройств средств радиомониторинга, начиная с уменьшения максимальной

дистанции между радиоприемными устройствами средств радиомониторинга, или приступают к оценке качества радиосвязи для каждой пары приемного и передающего устройства средств радиомониторинга при его равном или превышающем значении.

Для чего, для каждого средства радиомониторинга: с шагом времени измерения Δt для диапазона частот F_i ; с шагом перестройки частоты ΔF_i , для диапазона мощности P_i ; с шагом изменения ΔP_i , для всех видов модуляции M_i и диапазона скоростей $V_i \pm$ осуществляется передача тестовой последовательности с заданным алгоритмом. Принимая тестовую последовательность с помощью всех радиоприемных устройств средств радиомониторинга, она сравнивается с эталонной и вычисляется коэффициент битовой ошибки:

$$K_{\text{коэф.бит.ош.}} = \frac{N_{\text{прав.}}}{N_{\text{общ.}}} \quad (1)$$

Осуществив передачу результатов вычисления значения коэффициента битовой ошибки, значения частот, мощности, скорости и алгоритма модуляции, идентификаторов времени и идентификаторов приемного и передающего устройств средств радиомониторинга в центр управления радиомониторингом, сравнивают значение полученного $K_{\text{коэф.бит.ош.}}$ с заданным; при его больших значениях определяются места размещения дополнительных радиоприемных средств (размещают радиоприемные устройства на прямой линии, соединяющей радиопередающие и радиоприемные устройства средств радиомониторинга, пропорционально значению коэффициента битовой ошибки и запоминают их координаты). Причем, чем больше значение коэффициента битовой ошибки, тем больше должен быть уменьшен интервал между радиопередающими и радиоприемными устройствами средств радиомониторинга. Если коэффициент битовой ошибки меньше или равен заданному значению, то его значение запоминается с идентификаторами приемного и передающего устройств средств радиомониторинга и идентификаторами времени, значением частот, мощности, скорости и алгоритма модуляции.

На заключительном этапе вычисляется интегральный показатель влияния среды распрост-

ранения, характеризующий состояние радиоканала. Его суть заключается в объединении значений влияния диэлектрической проницаемости среды ϵ и электрической проводимости подстилающей поверхности σ для заданной трассы между конкретными приемниками и передатчиками в указанный момент времени.

Для идеальных условий известно уравнение радиопередачи [7]:

$$P_{AR} = \frac{P_{AT} G_T G_R \lambda^2}{(4\pi d)^2} f_T^2 f_R^2,$$

где P_{AR} — мощность на приемной антенне;
 P_{AT} — мощность на передающей антенне;
 G_T — усиление передающей антенны;
 G_R — усиление приемной антенны;
 λ — длина волны;
 f_T — функция диаграммы направленности передающей антенны;
 f_R — функция диаграммы направленности приемной антенны;
 d — расстояние между приемной и передающей антеннами.

Выражение (1) не учитывает влияние диэлектрической проницаемости среды ϵ и электрической проводимости подстилающей поверхности σ .

Диэлектрическая проницаемость среды ϵ представляет собой физическую величину, характеризующую свойства вещества, показывающую, во сколько раз сила взаимодействия зарядов в данном веществе меньше силы их взаимодействия в вакууме. Электрическая проводимость подстилающей поверхности σ представляет собой физическую величину, характеризующую свойства подстилающей поверхности, показывающую во сколько раз происходит ослабление электромагнитной волны над данной средой по сравнению с вакуумом. Трасса про-

хождения радиоволн может пролегать над разными подстилающими поверхностями (болото, песок, вода, лес, камни и другие) в различных погодных условиях (различная влажность, температура и другие), что делает вычисления σ довольно затруднительным процессом с высокой вероятностью ошибки.

Таким образом, выражение (1) принимает вид:

$$P_{AR} = \frac{P_{AT} G_T G_R \lambda^2}{(4\pi d)^2} f_T^2 f_R^2 \epsilon \sigma.$$

Зная параметры антенн, мощности на передающей и приемной антеннах, можно вычислить совместное влияние ϵ и σ для данной трассы в заданный момент времени, которое будет представлять собой значение интегрального коэффициента влияния среды распространения I :

$$I = \frac{P_{AR} (4\pi d)^2}{P_{AT} G_T G_R \lambda^2 f_T^2 f_R^2}.$$

Проведя измерения, выбираются все пары приемных и передающих средств радиомониторинга, у которых коэффициент битовой ошибки и интегральный коэффициент влияния среды распространения, характеризующий состояние радиоканала, больше заданного, либо перемещают средства радиомониторинга до удовлетворения условий, когда указанные параметры будут в допустимых пределах.

Определив среднeperесеченную местность размером 30 на 40 км, создается база данных об уровне шума, интегральном показателе, расстоянии от исходного места (или координатах предполагаемого места размещения потребителя услуг связи), мощности передатчика и частотах, на которых проводились измерения, для интервала радиосвязи. Собирая данные, например, с помо-

Таблица

Пример представления измеренных характеристик

	t_1	t_1	t_1	t_1	t_1	t_1	t_1	...
$P_{ш}$, дБ	0,01	0,1	0,021	0,25	0,15	0,36	0,3	...
I	0,01	0,02	0,14	0,42	0,32	0,03	0,23	...
l , м	100	100	100	100	100	100	100	...
F , МГц	433,125	433,25	433,375	433,5	433,625	433,75	433,875	...

щью беспилотного летательного аппарата, с полезной нагрузкой в виде стандартного телекоммуникационного модуля, характерного для планируемого к использованию РТК, сохраняют их в базу данных в виде таблицы.

Проводя анализ таблицы можно сделать вывод, что для расстояния в 100 м наиболее пригодной являются частота 433,125 МГц, имеющая самый низкий уровень шума 0,01 дБ и самый низкий интегральный коэффициент влияния среды распространения 0,01. Подход может быть и другим: например, подбирать места размещения для каждого приемника и передатчика в районе выполнения задачи по заданному уровню шума, исходя из их частотного диапазона. Данные показатели в конечном итоге влияют на коэффициент ошибки, характеризующий достоверность предоставляемых услуг потребителям сети абонентского радиодоступа.

Задав необходимые ограничения по мощности шума в месте приема, значению интегрального коэффициента влияния среды распространения, выбираются частоты наиболее пригодные для предоставления услуг связи потребителям, в качестве которых могут быть, например РТК, потребители сети абонентского радиодоступа и другие.

Таким образом, полученные результаты в ходе радиомониторинга с высокой достоверностью и точностью описывают состояние канала, а статистический набор этих данных за большой промежуток времени позволяет с достаточной вероятностью утверждать о возможности связи между потребителями сети абонентского радиодоступа для конкретных мест их размещения и времени суток или года (периода), что является важным для применения нового класса телекоммуникационных объектов, ограниченных по времени функционирования, энергетике, возможностям и другим показателям.

Разработанная методика оценки функционирования сети абонентского радиодоступа позволяет оценить с высокой точностью и заданным качеством канал связи между потребителями высококачественной сети абонентского радиодоступа, имеющей повышенные требования к ним.

Новизна представленной модели заключается в учете диэлектрической проницаемости среды и электрической проводимости подстилающей поверхности за счет рационального размещения

средств радиомониторинга с заданным коэффициентом корреляции измеряемых параметров.

Разработка представленной методики оценки обусловлена появлением нового класса телекоммуникационных объектов, ограниченных по времени функционирования, энергетике, возможностям и другим показателям, характеризующихся локализованной, высокодинамичной спецификой применения их значений.

Методика является универсальной и позволяет оценивать с высокой точностью измеряемые параметры средств радиосвязи, необходимые для решения оптимизационной задачи по их распределению.

Список источников

1. Контрольно-измерительная система мониторинга: пат. 2662726 Рос. Федерация. № 2017140340; заявл. 20.11.17; опубл. 30.07.18. Бюл. № 22. 2 с.
2. Способ обработки результатов радиомониторинга: пат. 2736329 Рос. Федерация. № 2019139549; заявл. 03.12.19; опубл. 13.11.20. Бюл. № 32. 3 с.
3. Контрольно-измерительная система радиомониторинга: пат. 2459218 Рос. Федерация, № 2011125014/07; заявл. 17.06.11; опубл. 20.08.12. Бюл. № 23. 3 с.
4. Стародубцев Ю.И., Иванов С.А., Закалкин П.В., Вершенник Е.В. Методика определения оптимальной периодичности контроля состояния сложного объекта // Вопросы оборонной техники. Научно-технический журнал. Технические средства противодействия терроризму. Серия 16. 2021. № 3–4. С. 81–89.
5. Иванов В.Г., Лукьянчик В.Н., Поляков Д.Н. Повышение устойчивости управления и связи робототехническими комплексами военного назначения в современных операциях // Телекоммуникации и связь. 2024. № 1. С. 16–28.
6. Соловьев А.Э., Ивутин А.Н., Прохорцов А.В., Чукова О.В. Роевые системы беспилотных объектов: современное состояние и перспективы // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2024. № 4 (134). С. 65–70.
7. Иванов С.А., Ефанов А.С., Стародубцев Ю.И. Задачи организации сетей радиосвязи

при использовании разнотипных средств связи // Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции «Технологии получения и обработки информации о динамических объектах и системах», 5 октября 2023 г. М.: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Экспертно-аналитический центр». 2023. С. 330–335.

8. Назаров Л.Е. Модели искажений цифровых сигналов при распространении в природных средах спутниковых радиолиний / Акусто-оптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации // Труды XVI Межд. научно-тех. конф. (Суздаль, 9–12 октября 2023 года). Москва, 2023. С. 45–48.

9. Антенны КВ и УКВ. М.: ИП РадиоСофт, 2016. 744 с.

10. Антенны и распространение радиоволн: учебник / В.Т. Еременко [и др.]. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2017. 329 с.

11. Сара Бослаф. Статистика для всех; пер. с англ. П.А. Волкова, И.М. Флямер, М.В. Либерман, А.А. Галицына. М.: ДМК Пресс, 2015. 586 с.

12. Наследов А.Д. Профессиональный статистический анализ данных. СПб.: Питер, 2011. 400 с.

References

1. Control and measuring monitoring system: pat. 2662726 Russian Federation. No. 2017140340; application no. 11/20/17; publ. 07/30/18. Bul. No 22. 2 p.

2. Method of processing the results of radio monitoring: pat. 2736329 Russian Federation. No. 2019139549; application no. 03.12.19; publ. 13.11.20. Bul. No 32. 3 p.

3. The control and measuring system of radio monitoring: pat. 2459218 Russian Federation, No. 2011125014/07; application no. 17.06.11; publ. 20.08.12. Bul. No 23. 3 p.

4. Starodubtsev Yu.I., Ivanov S.A., Zakalkin P.V., Vershennik E.V. Methodology for deter-

mining the optimal frequency of monitoring the condition of a complex object // Issues of defense technology. Scientific and technical journal. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2021. No. 3–4. Pp. 81–89.

5. Ivanov V.G., Lukyanchik V.N., Polyakov D.N. Increasing the stability of control and communication of military robotic systems in modern operations // Telecommunications and communications. 2024. No 1. Pp. 16–28.

6. Soloviev A.E., Ivutin A.N., Prokhorov A.V., Chukova O.V. Swarm systems of unmanned objects: current state and prospects // Bulletin of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences. 2024. No 4 (134). Pp. 65–70.

7. Ivanov S.A., Efanov A.S., Starodubtsev Yu.I. Tasks of organizing radio communication networks using various types of communication tools // Collection of materials of the IV All-Russian scientific and practical conference «Technologies for obtaining and processing information about dynamic objects and systems», October 5, 2023, Moscow: Federal State Budgetary Scientific Institution «Expert-Analytical the center». 2023. Pp. 330–335.

8. Nazarov L.E. Models of digital signal distortions during satellite radio link propagation in natural environments / Acousto-optic and radar methods of measurement and information processing // Proceedings of the XVI Int. scientific-technical conf. (Suzdal, October 9–12, 2023). Moscow, 2023. Pp. 45–48.

9. HF and VHF antennas. Moscow: IP RadioSoft, 2016. 744 p.

10. Antennas and radio wave propagation: textbook / V.T. Eremenko [et al]. Ore: OSU named after I.S. Turgenev, 2017. 329 p.

11. Sarah Boslough. Statistics for everyone. Translated from English by P.A. Volkova, I.M. Flamer, M.V. Liberman, A.A. Galitsyn. M.: DMK Press, 2015. 586 p.

12. Nasledov A.D. Professional statistical data analysis. St. Petersburg: Peter, 2011. 400 p.

УДК 623.451

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_11

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ РЕАКЦИИ АРТИЛЛЕРИЙСКОГО ВЫСТРЕЛА
В ТАРЕ НА ВНЕШНИЕ НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫЕ ДЕЙСТВИЯ
БЫСТРЫМ НАГРЕВОМ**

**METHODS FOR CALCULATING THE REACTION TIME OF AN ARTILLERY
SHOT IN A CONTAINER TO EXTERNAL UNAUTHORIZED ACTIONS
BY RAPID HEATING**

Д.Ф. Филиппов

D.F. Filippov

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

В статье приведены методы расчета времени реакции артиллерийского выстрела в таре на внешние несанкционированные действия быстрым нагревом, включающие кинетический метод расчета и расчет с помощью программных средств, основанных на методе конечных элементов, отличающийся от известных тем, что методы используются для элементов артиллерийского выстрела, находящегося в таре, и прогрев элементов выстрела рассматривается по реальной цилиндрической схеме. Получены результаты расчета времени реакции выстрела, которые показали, что расчет, основанный на методе конечных элементов более точен, и может быть использован для прогнозирования времени наступления реакции с артиллерийскими выстрелами различных калибров. Так как одним из основных видов внешнего несанкционированного действия на боеприпасы является тепловое действие, создающее пожары на территории арсеналов и полевых артиллерийских складов, поэтому именно этому вопросу и посвящены проведенные исследования. **Ключевые слова:** артиллерийский выстрел, боеприпас, снаряд, метательный заряд, несанкционированное действие, быстрый нагрев, экспериментальные исследования.

The article presents methods for calculating the reaction time of an artillery shot in a container to external unauthorized actions by rapid heating, including a kinetic calculation method and calculation using software based on the finite element method, which differs from the known methods in that the methods are used for the elements of an artillery shot in a container, and the heating of the shot elements is considered according to a real cylindrical scheme. The results of calculating the reaction time of a shot were obtained, which showed that the calculation based on the finite element method is more accurate and can be used to predict the reaction time with artillery shots of various calibers. Since one of the main types of external unauthorized action on ammunition is thermal action, which creates fires on the territory of arsenals and field artillery depots, therefore, the conducted research is devoted to this issue.

Keywords: artillery shot, ammunition, projectile, propellant charge, unauthorized action, rapid heating, experimental research.

В последние годы особое внимание при разработке боеприпасов (БП) уделяется вопросам обеспечения их безопасности, сохранности и защищенности на всех стадиях жизненного цикла, моделирования аварийных ситуаций и прогнозирования их последствий, повышения безопасности БП при несанкционированных действиях [1].

БП представляют собой источник повышенной опасности. При непредусмотренных воздействиях, вызванных стихийными явлениями, пожарами, неправильным обращением, террористическими действиями, нападением со стороны противника, БП могут выделять накопленную в них энергию несанкционированно. Это может происходить в местах хранения, при загрузке боеприпасов на носители (самоходные артиллерийские установки, танки, автомобили, самолеты, корабли, железнодорожный транспорт и т.д.), транспортировке, при ведении боевых действий и т.д. Если такое воздействие не ограничивается единичным БП, а передается на другие с их полным срабатыванием, то происходит цепная реакция, вызывающая техногенную катастрофу с людскими потерями и значительными материальными убытками [2, 3].

Эксплуатационная безопасность изделий из высокоэнергетических веществ (ВЭВ) определяется устойчивостью последних к внешним воздействиям различного рода. Наиболее распространенным видом является тепловое воздействие [4].

Время до воспламенения изделий при воздействии теплового потока (аэродинамический нагрев, лазерное излучение, нагретый ствол пушки, пожар) можно определять расчетными и экс-

периментальными методами. Расчетные методы позволяют не проводить дорогостоящие эксперименты, они работают с идеализированными системами. Главное достоинство таких методов — относительно простое получение зависимости времени до воспламенения изделия от различных параметров конструкционных материалов.

Экспериментальные методы определения времени до воспламенения позволяют получать реальную картину процесса воспламенения БП, однако только многочисленные опыты позволяют определить направления совершенствования БП ввиду трудно повторяемых конструктивных особенностей БП и защитных слоев.

Поэтому сочетание расчетных и экспериментальных методов позволит решить поставленную проблему (задачу) с оптимизацией затрат времени и материальных средств.

Для расчета теплового состояния изделий в настоящее время разработаны программы, основанные на решении уравнений теплопроводности и кинетики тепловыделения с заданными начальными и граничными условиями.

Поэтому рассмотрим разработанные подходы, позволяющие получить необходимые параметры процесса теплового воспламенения БП или минимизации последствий взрыва одиночного или штабеля с БП, а также необходимые условия получения кинетики разложения взрывчатых веществ (ВВ) при тепловых нагрузках [5].

Артиллерийские выстрелы, как правило, хранятся в деревянной и полимерной таре, где снаряд и заряд находятся вместе [6] (рис. 1).

Рассмотрим кинетический метод расчета времени реакции 125-мм артиллерийского выстрела ЗВОФ36 в таре на внешние несанкциониро-



а



б

Рис. 1. Артиллерийский выстрел в полимерной таре

ванные действия быстрым нагревом (открытого пламени огня).

При рассмотрении данной модели для определения времени реакции снаряжения боеприпасов на внешний нагрев, то есть времени до самовоспламенения, взрыва ВВ или пороха, необходимо составить схему теплопередачи от нагретого воздуха (НВ) снаряжению боеприпаса.

В кинетической модели быстрого нагрева метательного заряда (МЗ) от внешнего источника использовались исходные данные, относящиеся как к самому БП, так и к таре (ящику), и внешней воздействующей опасной среде (пламени от пожара) (рис. 2):

1) коэффициент теплопроводности пенала, вставки, сгорающей гильзы (СГ) и корпуса снаряда — $\lambda_{\text{пен}}, \lambda_{\text{вст}}, \lambda_{\text{сг}}, \lambda_{\text{сн}}$, Вт/(м·°С);

2) теплоемкость пенала, вставки, СГ и корпуса снаряда — $c_{\text{пен}}, c_{\text{вст}}, c_{\text{сг}}, c_{\text{сн}}$, Дж/(кг·°С);

3) плотность материала пенала, вставки, СГ и корпуса снаряда — $\rho_{\text{пен}}, \rho_{\text{вст}}, \rho_{\text{сг}}, \rho_{\text{сн}}$, кг/м³;

4) температура воздуха — T_0 , °С;

5) коэффициент теплопроводности материала тары (ящика) — $\lambda_{\text{ящ}}$, Вт/(м·°С);

6) теплоемкость материала тары — $c_{\text{ящ}}$, Дж/(кг·°С);

7) плотность материала тары — $\rho_{\text{ящ}}$, кг/м³.

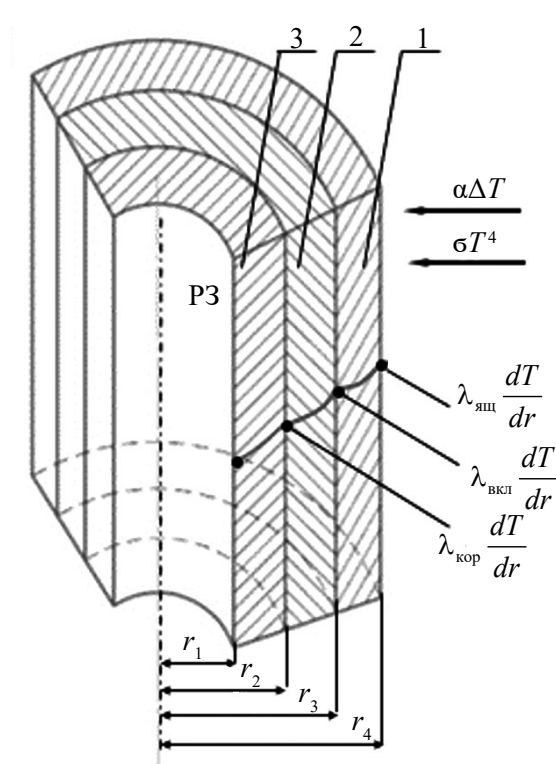
На рис. 2 имеются следующие обозначения:

σT^4 — излучение тепловыделения за счет нагрева;

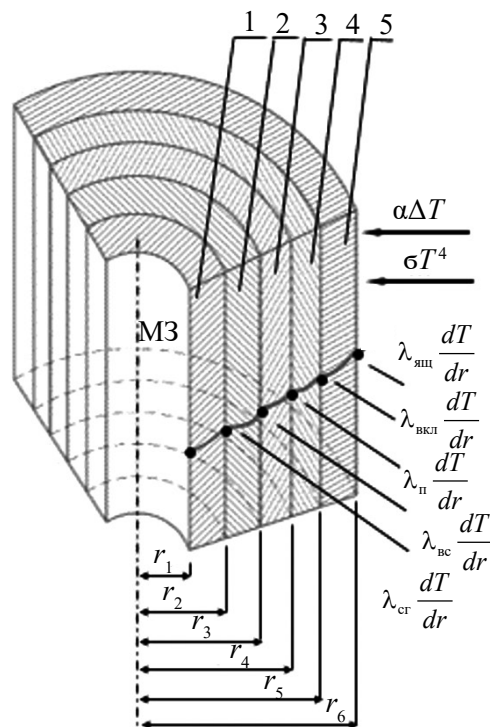
$\alpha \Delta T$ — подводимое тепло за счет кондуктивной передачи;

$\lambda_i \frac{dT}{dr}$ — теплопроводность на границе слоев.

Очевидно, что любая математическая модель работает при определенной системе допущений. В данном случае целесообразно допустить, что:



а



б

Рис. 2. Расчетная схема теплопередачи от нагретого воздуха к пороху и разрывному заряду:

а — для снаряда: 1 — корпус снаряда; 2 — вкладыш; 3 — тара;

б — для метательного заряда: 1 — сгорающая гильза; 2 — вставка;

3 — пенал; 4 — вкладыш; 5 — тара

1) толщина воздушных прослоек между элементами заряда практически близка к нулю;

2) метательный заряд (СГ и навеска пороха) непосредственно контактируют с внутренней поверхностью вставки, поэтому можно считать температуру наружной стенки СГ $t_{МЗ}$ равной температуре внутренней поверхности вставки;

3) наиболее вероятным можно считать нагрев МЗ через поверхность боковых стенок вкладыша тары, так как толщина дна вкладыша в углублении, где размещен МЗ значительно меньше, чем в других местах тары.

Из схемы, рис. 2, видно, что тепловой поток от нагретого окружающего воздуха сначала нагревает стенки ящика (тары).

К настоящему времени имеются разработанные программы для решения системы уравнений, позволяющие определять тепловое состояние тела заданной формы (плоскость, цилиндр, шар) при определенных начальных и граничных условиях.

Температура внешней и внутренней поверхностей ящика рассчитывается по уравнениям [7]:

$$c_i \rho_i \frac{dT}{d\tau} = \lambda_i \left(\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} \right); \quad (1)$$

$$\left(\lambda_i \frac{dT}{dr} \right)_{i-0} = \left(\lambda_{i+1} \frac{dT}{dr} \right)_{i+0}; \quad (2)$$

граничные условия: $\tau = 0, T = T_0, r = r_0$

$$-\lambda_i \frac{dT}{dr} = \alpha \Delta T + \sigma T^4, \quad (3)$$

где c_i — теплоемкость слоев изделия;

ρ_i — плотность слоев изделия;

λ_i — теплопроводность слоев изделия;

r — текущая координата изделия;

r_0 — характерный размер изделия;

T — текущая температура;

T_0 — температура окружающей среды;

τ — время.

Однако из практики известно, что штатная деревянная тара при прямом воздействии открытого огня прогорает примерно через 360 с (6 мин), через это время пламя огня напрямую начинает воздействовать на элементы выстрела. Поэтому если выстрел размещен не в полимерную тару, то температуру нагрева стенок снаряда и МЗ следует считать без учета температуры стенок тары.

Температура внешней и внутренней поверхностей слоев МЗ, а также защитного слоя тары (вкладыша) из полиуретана рассчитывается аналогично уравнениям (1) и (2).

Для расчета теплового состояния энергосыщенного материала, каким является СГ, необходимо иметь и кинетические уравнения теплопроводности с нелинейным членом тепловыделения, при разложении состава. Уравнения имеют вид:

$$Q \frac{d\eta}{d\tau};$$

$$c_i \rho_i \frac{dT}{d\tau} = \lambda_i \left(\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + Q \frac{d\eta}{d\tau} \right); \quad (4)$$

$$\left(\lambda_i \frac{dT}{dr} \right)_{i-0} = \left(\lambda_{i+1} \frac{dT}{dr} \right)_0;$$

граничные условия: $\tau = 0, T = T_0, r = r_0, \frac{dT}{dr} = 0$;

$$\frac{d\eta}{d\tau} = f(E, \eta),$$

где η — глубина превращения (разложения);

Q — теплота реакции разложения;

E — энергия активации разложения.

Разрывной заряд снаряда, как правило, представляет собой бризантный взрывчатый состав (ВС), размещенный в корпусе БП без взрывателя. ВС непосредственно контактирует с внутренней стенкой снаряда, поэтому в качестве допущения можно принять температуру внутренней стенки снаряда равной температуре ВС.

Следует также учитывать и то, что толщина корпуса снаряда является переменной величиной, поэтому расчет необходимо вести при наименьшем значении этого параметра.

Температура внешней и внутренней поверхностей ящика рассчитывается по уравнениям (1)–(3), температура внешней и внутренней поверхностей слоев снаряда и вкладыша тары рассчитывается по уравнениям (1) и (2).

Аналогично, как и для расчета теплового состояния МЗ, необходимо включить кинетическое уравнение теплопроводности с нелинейным членом тепловыделения, при разложении ВС в снаряде. Рассчитывается по уравнению (4).

Для оценки теплового состояния тела помимо теплофизических характеристик необходимо иметь и кинетическое уравнение (модель) разложения состава или индивидуального энергоемкого вещества.

Вопрос количественного описания различных процессов рассматривался относительно давно. В работе [8] систематизируется накопленный опыт исследований протекания процессов в гомогенной и гетерогенной средах 20-го столетия. При описании процесса разложения ВВ и пороха использовали уравнение автокатализа первого порядка.

$$\frac{d\eta}{d\tau} = k_1(1-\eta) + k_2(1-\eta)\eta,$$

где η — доля прореагировавшего вещества к моменту времени τ ;

$\frac{d\eta}{d\tau}$ — скорость разложения.

Предполагается, что температурная зависимость скоростей реакций термического разложения (k_1, k_2) подчиняется закону Аррениуса и записывается в следующем виде:

$$k_1 = K_{01} \cdot \exp\left(\frac{-E_1}{RT}\right);$$

$$k_2 = K_{02} \cdot \exp\left(\frac{-E_2}{RT}\right),$$

где K_{01}, K_{02} — предэкспонентный множитель;

E_1, E_2 — энергии активации (прямая и обратная реакция).

При исследовании кинетики разложения при больших плотностях заполнения объема реакционной ячейки начальная скорость много меньше скорости разложения на стадии ускорения.

При $k_2 \gg k_1, \tau(\eta^*) = \text{const}$;

$$\exp\left(\frac{-(E_1 + E_2)}{\frac{R}{T}}\right),$$

где $\tau(\eta^*)$ — время достижения глубины разложения η^* при заданной температуре T .

Такая зависимость не позволяет точно определить по отдельности E_1 и E_2 . Для однозначного разделения величин E_1 и E_2 используют прибор измерительно-вычислительного комплекса

(ИВК) «Вулкан», позволяющий определять величину E_1 . Использование двух приборов — комплекса тепловых исследований (КТИ) «Тепло» и ИВК «Вулкан», позволяет не только определить скорость разложения веществ при больших плотностях заполнения объема реакционной ячейки, но и определить величины E_1 и E_2 [9]. Результаты проведенных исследований кинетики тепловыделения при разложении ВС, экспериментальные и расчетные данные представлены на рис. 3.

Была разработана «Программа расчета теплового воспламенения», позволяющая рассчитывать тепловое поле в изделии, используя вышеперечисленные уравнения и полученное кинетическое уравнение для конкретного энергонасыщенного материала (ЭНМ).

При проведении расчетов получены следующие результаты нагрева элементов выстрела ЗВОФ36 в деревянной таре, представленные в табл. 1, 2 [10].

На рис. 4 представлены зависимости времени до воспламенения снаряда и МЗ выстрела калибром 125 мм.

Далее рассмотрим расчет времени реакции артиллерийского выстрела в таре на внешние несанкционированные действия быстрым нагревом методом конечных элементов, на примере выстрела ЗВОФ36.

Для исследования этих процессов было проведено компьютерное моделирование теплового взрыва со 125-мм выстрелом ЗВОФ36 в штатном снаряжении в деревянной таре, при быстром нагреве.

Расчет времени реакции выстрела проводился с применением метода конечных элементов [11]. При моделировании поведения МЗ и разрывного заряда (РЗ) снаряда в составе выстрела при воздействии на него повышенной температуры предполагалось, что температура окружающей газовой среды (воздуха) в начальный момент времени составляет 0 °С и воздействие открытого пламени с температурой 800 °С до момента завершения реакции боеприпаса.

При определении времени расчета реакции с МЗ 4Ж40 выстрела ЗВОФ36 при несанкционированном нагреве были использованы следующие исходные данные:

1) характеристики СГ, металлического пенала и вставки:

Q1:5200		BC	BC (1,5) exp	BC (2.0) exp
Q2:500	Вещество	BC	BC (1,5)	BC -2 (2,0)
K1:15,5	Масса вещества	10,00	10,00	10,00
E1:42500,00	Теплоемкость вещества	0,10	0,10	0,10
K2:8,62	Масса ампулы	1,0	1,0	1,0
E2:25000,00	Теплоемкость ампулы	0,05	0,05	0,05
	Теплоотдача	0,01	0,01	0,01
	№ опыта	1	1	1
	Дата	19.04.2024 9:45	20.04.2024 9:52	21.04.2024 9:25

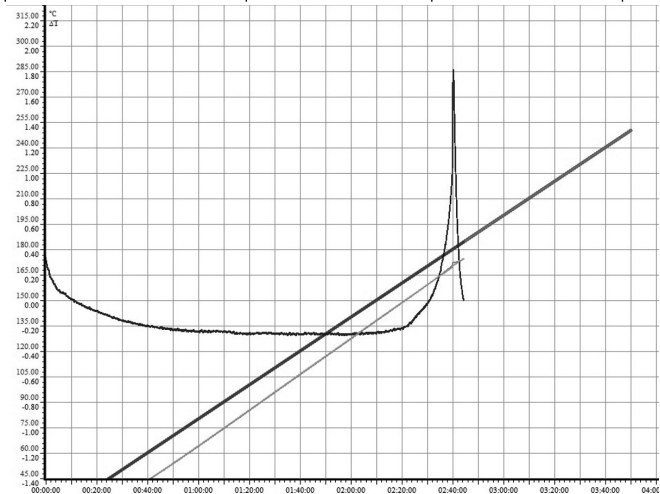


Рис. 3. Экспериментальные данные кинетики тепловыделения при разложении BC (определение E_1 , E_2 и K_{01} , K_{02})

Таблица 1

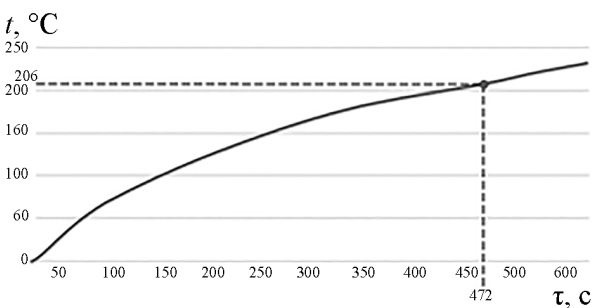
Результаты расчета нагрева снаряда

Температура взрывчатого состава	Значения температуры BC снаряда при внешнем нагреве, °C											
	время нагрева, с											
	50	100	150	200	250	300	400	450	472	500	550	600
t_{BC}	39	71	102	126	143	162	175	199	205	212	225	240

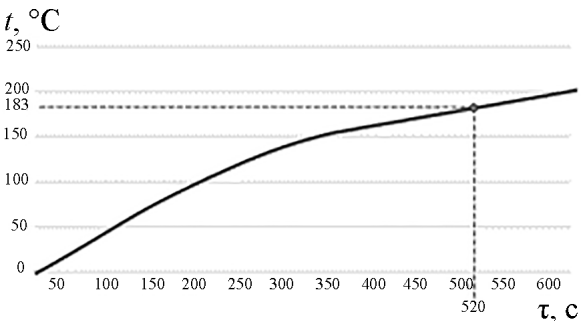
Таблица 2

Результаты расчета нагрева метательного заряда

Температура стенки СГ	Значения температуры стенок метательного заряда при внешнем нагреве, °C											
	время нагрева, с											
	50	100	150	200	250	300	350	450	500	510	550	600
t_{CG}	29	48	75	99	125	141	152	169	180	188	192	202



а



б

Рис. 4. Зависимость роста температуры: а — BC снаряда при внешнем нагреве; б — СГ при внешнем нагреве

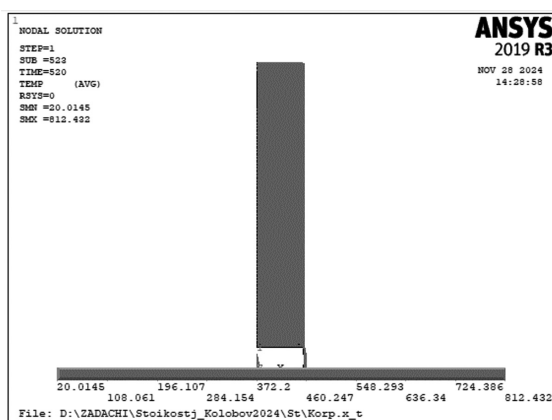
- толщина стенки СГ, металлического пенала, вкладыша: $\delta_{\text{сг}}$ (δ_3), $\delta_{\text{пен}}$, $\delta_{\text{вст}}$, м;
- плотность материала корпуса СГ, металлического пенала, вставки: $\rho_{\text{сг}}$, $\rho_{\text{пен}}$, $\rho_{\text{вст}}$, кг/м³;
- коэффициент теплопроводности материала СГ, металлического пенала, вставки: $\lambda_{\text{сг}}$, $\lambda_{\text{пен}}$, $\lambda_{\text{вст}}$ Вт/(м·°C);
- теплоемкость корпуса СГ, металлического пенала, вставки: $c_{\text{сг}}$, $c_{\text{пен}}$, $c_{\text{вст}}$, Дж/(кг·°C);
- время прогрева СГ, металлического пенала, вставки: $\tau_{\text{сг}}$, $\tau_{\text{пен}}$, $\tau_{\text{вст}}$, с;
- 2) характеристики порохов МЗ:
 - температура реакции (тепловая стойкость) штатных порохов 12/7 ВА и 185/1Тр ВА, ВТХ-20 — $t_p = 173$ °C, ДРП — $t_p = 308$ °C;
 - температура реакции (тепловая стойкость) СГ $t_p = 188$ °C.

На рис. 5 представлено распределение температурных полей в МЗ и снаряде непосредственно перед тепловым взрывом и зависимости роста температуры при быстром нагреве.

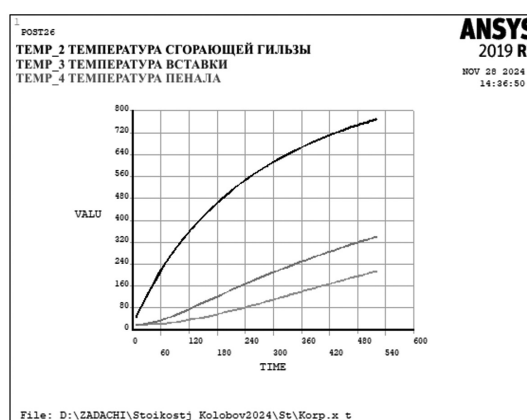
При проведении расчетов получены следующие результаты нагрева элементов МЗ и снаряда (табл. 3, 4). Верификация результатов теоретических расчетов времени реакции артиллерийского выстрела в деревянной таре на внешнее тепловое действие представлена в табл. 5.

Выводы

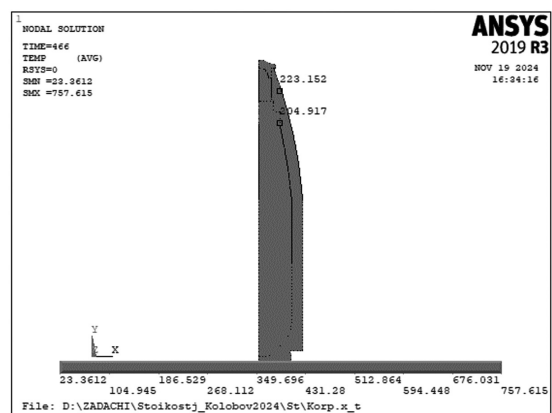
Таким образом, рассматриваемая совокупность методов расчета времени реакции артиллерийского выстрела в таре на внешние несанкцио-



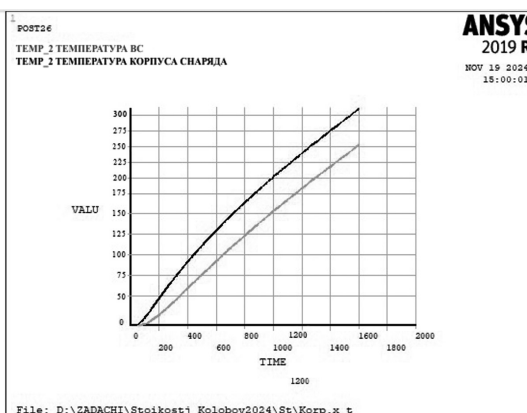
а



б



в



г

Рис. 5. Распределение температурных полей в МЗ и снаряде непосредственно перед тепловым взрывом и зависимости роста температуры при быстром нагреве:

- а — распределение температурных полей в МЗ 4Ж40 перед началом реакции;
- б — зависимость роста температуры от времени для МЗ при быстром нагреве;
- в — распределение температурных полей в МЗ 4Ж40 перед началом реакции;
- г — зависимость роста температуры от времени для МЗ при быстром нагреве

Таблица 3

Результаты нагрева стенок МЗ

Температуры стенок ящика	Значения температуры стенок МЗ при внешнем нагреве, °С											
	время нагрева, с											
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	520	600
$t_{\text{пен}}$	175	323	420	482	568	605	631	680	735	755	768	–
$t_{\text{вст}}$	39	74	96	155	174	210	244	269	301	325	339	–
$t_{\text{ст}}$	28	52	64	75	92	123	144	152	169	175	189	–

Таблица 4

Результаты нагрева стенок снаряда

Темпера- туры стенок ящика	Значения температуры стенок снаряда при внешнем нагреве, °С												
	время нагрева, с												
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	466	500	550	600
$t_{\text{кор}}$	50	73	94	114	133	152	169	186	202	211	217	232	245
$t_{\text{вс}}$	35	55	77	97	117	136	154	172	189	205	215	221	234

Таблица 5

Время реакции выстрела ЗВОФ36 в таре на внешнее тепловое воздействие

Наименование образца	Кинетический метод расчета времени реакции выстрела, с		Расчет времени реакции методом конечных элементов, с	
	МЗ	снаряд	МЗ	снаряд
ЗВОФ36 в деревянной таре	510	472	520	466

нированные действия быстрым нагревом показала довольно хорошее согласование результатов расчета, однако если сравнивать результаты данных теоретических методов с результатами натурных испытаний, то можно сказать, что расчет с помощью программных средств, основанных на методе конечных элементов более точен, чем кинетический метод. Расчет, основанный на методе конечных элементов, позволяет более точно рассчитать время реакции БП при воздействии пожара и может быть использован для прогнозирования времени наступления реакции с артиллерийскими выстрелами. Поэтому данный метод имеет важное значение для повышения живучести арсеналов комплексного хранения и полевых артиллерийских складов.

Список источников

1. Боеприпасы повышенной стойкости к опасным внешним воздействиям: особенности

конструирования, испытаний и эксплуатации / Б.В. Мацеевич [и др.]. Красноармейск: Изд-во ОАО «КНИИМ», 2014. 168 с.

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

3. Мацеевич Б.В., Михеев В.Г., Яжук А.П. Военный парад // Боеприпасы XXI века. 2004. № 6 (66). С. 45–51.

4. Мацеевич Б.В., Михайлов Ю.М. Проблемы создания в России боеприпасов, стойких к несанкционированным воздействиям // Боеприпасы и спецхимия. 2007. Вып. 1. С. 56–62.

5. Злобин В.А., Дудь А.П., Сагун Ю.И. Обоснование рациональных режимов эксплуатации ракет на арсеналах комплексного хранения: монография. М.: ОВА, 2018. 146 с.

6. Бабакин А.В. и др. Боеприпасы: учебник; под ред. В.В. Селиванова, в 2-х т. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 856 с.

7. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987. 502 с.

8. W.C. McC. Lewis. A system of physical chemistry. Vol. 1: Kinetic theory, Longmans, Green and Co., 1923. 146 p.

9. Самойленко Н.Г. Исследование кинетики термического разложения динитроксиэтилнитрамина при отсутствии газоотвода из зоны реакции // Журнал физической химии. 1970. Т. 44, № 1. С. 39–45.

10. Филиппов Д.Ф., Терентьев А.Б. и др. Проектирование систем // Журнал «Боеприпасы XXI век». 2024. № 3. С. 62–64.

11. Басов К.А. ANSYS справочник пользователя. М.: Изд-во ДМК-Пресс, 2005. 640 с.

References

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

2. Terentyev A.B. et al. Fundamentals of design, production and testing of ammunition and their elements. At 3 p. Part 3. Fundamentals of production and testing of energy-saturated materials. Penza: Branch of VA MTO, 2020. 426 p.

3. Matseevich B.V., Mikheev V.G., Yazhuk A.P. Military Parade // Ammunition of the XXI century. 2004. No 6 (66). Pp. 45–51.

4. Matseevich B.V., Mikhailov Yu. M. Problems of creating ammunition resistant to unauthorized influences in Russia // Ammunition and special chemistry. 2007. Issue 1. Pp. 56–62.

5. Zlobin V.A., Dud A.P., Sagun Yu.I. Justification of rational modes of operation of missiles at complex storage arsenals: a monograph. M.: OVA, 2018. 146 p.

6. Babakin A.V. et al. Ammunition: a textbook; ed. by V.V. Selivanov. In 2 vol. Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University. 2016. 856 p.

7. Frank-Kamenetsky D.A. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics. Moscow: Nauka, 1987. 502 p.

8. W.C. McC. Lewis, A system of physical chemistry. V. 1: Kinetic theory, Longmans, Green and Co., 1923. 146 p.

9. Samoylenko N.G. Investigation of the kinetics of thermal decomposition of dinitroxydiethyl nitramine in the absence of gas discharge from the reaction zone // Journal of Physical Chemistry, 1970. Vol. 44, No 1. Pp. 39–45.

10. Filippov D.F., Terentyev A.B. et al. System Design // Ammunition of the XXI century. 2024. No 3. Pp. 62–64.

11. Basov K.A. ANSYS user's guide. M.: Publishing house DMK-Press, 2005. 640 p.

УДК 623.451

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_20

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- 1) пожар непосредственно вблизи БП (в хранилище или в носителе БП);
- 2) пожар за стенкой хранилища или носителя БП.

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

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

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

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

построение расчетной схемы в АС при несанкционированном внешнем тепловом воздействии.

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

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

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

- функция распределения рассматриваемых двух СВ $F_1(t_1, t_2)$;
- функция плотности вероятности распределения рассматриваемых двух СВ $f_1(t_1, t_2)$.

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



а



б

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

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

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

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

$$\begin{aligned} T_1 &= \Theta_1(Y_1, Y_2); \\ T_2 &= \Theta_2(Y_1, Y_2). \end{aligned}$$

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

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

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

Условие (2) позволяет определить функцию плотности вероятности распределения

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

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

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

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

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

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

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

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

Функция плотности положительна, что определяет ее вид

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

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

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

для которой система СВ (R, Φ) , определяемая

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

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

Определим функцию плотности вероятности распределения

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

Рассмотрим условие для задачи аварийного состояния.

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

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

3. Рассматривается СВ Z

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

Необходимо определить функцию плотности вероятности распределения СВ Z .

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

На основании условия (2) обратные функции имеют вид

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

Используя условие (4), получим

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

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

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

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

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

Функцию плотности суммы СВ получим из условия

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

Данное математическое действие называется композицией распределения СВ.

Полученные характеристики могут быть применены для построения математической модели прогнозирования вероятности перехода артиллерийского боеприпаса, находящегося в штатной или перспективной таре в различное

состояние при несанкционированном внешнем тепловом воздействии.

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

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

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

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

t_r — время горения штатной тары артиллерийского выстрела;

t_p — время взрыва артиллерийского выстрела.

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

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

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

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

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

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

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

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

где a_c, a_r — математические ожидания СВ T_c, T_r соответственно;

E_c, E_r — срединные отклонения СВ T_c, T_r соответственно.

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

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

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

$$\begin{aligned} f(z) &= \int_0^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \cdot e^{-\frac{(t_r - a_r)^2}{2\sigma_r^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \cdot e^{-\frac{(z - t_r - a_p)^2}{2\sigma_p^2}} dt_r = \\ &= \frac{1}{2\pi\sigma_r\sigma_p} \int_0^z e^{-\frac{(t_r - a_r)^2}{2\sigma_r^2}} \cdot e^{-\frac{(z - t_r - a_p)^2}{2\sigma_p^2}} dt_r. \end{aligned}$$

Преобразуем показатель степени в подынтегральной функции.

Обозначим

$$\begin{cases} t_r - a_r = t, \\ z - a_z = v. \end{cases}$$

Для математического ожидания имеем

$$a_z = M(Z) = a_r + a_p, \quad a_p = a_z - a_r.$$

Получаем

$$\begin{aligned} \frac{(t_r - a_r)^2}{\sigma_r^2} + \frac{(z - t_r - a_p)^2}{\sigma_p^2} &= \frac{t^2}{\sigma_r^2} + \frac{(z - t_r - a_z + a_r)^2}{\sigma_p^2} = \frac{t^2}{\sigma_r^2} + \frac{((z - a_z) - (t_r - a_r))^2}{\sigma_p^2} = \frac{t^2}{\sigma_r^2} + \frac{(v - t)^2}{\sigma_p^2} = \\ &= \frac{t^2}{\sigma_r^2} + \frac{v^2 - 2vt + t^2}{\sigma_p^2} = \frac{t^2\sigma_p^2 + v^2\sigma_r^2 - 2vt\sigma_r^2 + t^2\sigma_r^2}{\sigma_r^2\sigma_p^2} = \frac{t^2(\sigma_r^2 + \sigma_p^2) - 2vt\sigma_r^2 + v^2\sigma_r^2}{\sigma_r^2\sigma_p^2} = \\ &= \frac{t^2(\sigma_r^2 + \sigma_p^2) - 2vt\sigma_r^2 + \frac{\sigma_r^4}{\sigma_r^2 + \sigma_p^2}v^2 - \frac{\sigma_r^4}{\sigma_r^2 + \sigma_p^2}v^2 + v^2\sigma_r^2}{\sigma_r^2\sigma_p^2} = \\ &= \frac{\sigma_r^2 + \sigma_p^2}{\sigma_r^2\sigma_p^2} \left(t^2 - \frac{2vt\sigma_r^2}{\sigma_r^2 + \sigma_p^2} + \frac{\sigma_r^4 v^2}{(\sigma_r^2 + \sigma_p^2)^2} \right) - \frac{v^2\sigma_r^2}{\sigma_p^2(\sigma_r^2 + \sigma_p^2)} + \frac{v^2}{\sigma_p^2} = \frac{\sigma_r^2 + \sigma_p^2}{\sigma_r^2\sigma_p^2} \left(t - \frac{\sigma_r^2 v}{\sigma_r^2 + \sigma_p^2} \right)^2 - \frac{v^2}{\sigma_r^2 + \sigma_p^2}. \end{aligned}$$

Введем обозначение

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

Получим

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

С учетом условий

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

определяем

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

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

Результатом композиции нормальных распределений двух СВ является также нормальное распределение.

Получаем вероятность

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

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

число k находится с использованием функции Лапласа.

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

$$P_{23} = \int_0^{t_c} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} e^{-\frac{(t_c - a_c)^2}{2\sigma_c^2}} P(t_r + t_p < t_c) dt_c =$$

$$= k \cdot \int_0^{t_c} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} e^{-\frac{(t_c - a_c)^2}{2\sigma_c^2}} dt_c = \frac{1}{2} k \cdot \left(1 + \Phi\left(\frac{a_c}{E_c}\right) \right). \quad (5)$$

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

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

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

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

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

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

$a_c = 14 \text{ мин } 30 \text{ с} = 870 \text{ с}$ — математическое ожидание времени несанкционированного внешнего теплового воздействия;

$E_c = 154,3 \text{ с}$ — срединное отклонение времени несанкционированного внешнего теплового воздействия;

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

Величины a_c , E_c , E_r определялись на основе проведения испытаний с использованием зависимости

$$E_r = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{b_n},$$

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

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

$$P_{12} =$$

$$= \frac{1}{4} \cdot (1 + \Phi(5,6400)) \cdot (\Phi(5,6430) + \Phi(1,8740)) =$$

$$= \frac{1}{4} \cdot 1,9998 \cdot 1,7928 = 0,8963 \approx 0,9.$$

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

Количественные оценки времени реакции артиллерийского боеприпаса на несанкционированное тепловое воздействие

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

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

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

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

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

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

Выводы

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

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

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

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

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

Список источников

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

References

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

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

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

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

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

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

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

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

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

УДК 355/359

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_28

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ПОСТАВКИ
МАТЕРИАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ВОИНСКИМ ФОРМИРОВАНИЯМ
В РАЙОН ВЕДЕНИЯ БОЕВЫХ ДЕЙСТВИЙ**

**METHOD FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF THE SYSTEM
FOR SUPPLYING MATERIAL RESOURCES TO MILITARY FORCES
IN THE AREA OF MILITARY OPERATIONS**

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

¹ВА МТО (Пенза), ²ВУЦ ПГУ, ³Филиал ВА МТО им. А.В. Хрулева (г. Вольск)

Разработана методика оценки эффективности системы поставки материальных средств (СПМС) автоколоннами воинским формированиям в район ведения боевых действий. Методика содержит частные методики: оценки эффективности СПМС воинским формированиям в условиях противодействия противнику; определения вероятностей нахождения походного охранения (ПО) автоколонны в состояниях противодействия с ДРГ противника; определения оптимального времени противодействия ПО автоколонны и ДРГ противника, расчета рациональных параметров универсальной осколочной гранаты к автоматическому гранатомету при стрельбе по малогабаритным беспилотным летательным аппаратам (МБПЛА), специальное программное обеспечение и рекомендации по совершенствованию СПМС автоколоннами воинским формированиям в район ведения боевых действий в условиях противодействия противнику. **Ключевые слова:** система поставки материальных средств, диверсионно-разведывательная группа, малогабаритный беспилотный летательный аппарат, походное охранение, универсальная осколочная граната.

A methodology has been developed to assess the effectiveness of the material supply system (MSS) to military formations in the area of combat operations. The methodology contains private methodologies for assessing the effectiveness of MSS for military formations in conditions of countering the enemy, determining the probabilities of the convoy's software being in a state of countering with the enemy's SuRG, determining the optimal time for countering the convoy's software and the enemy's SuRG, calculating the rational parameters of a fragmentation munition for an automatic grenade launcher when firing at MBLA, and providing special software and recommendations for improving MSS for military formations in combat areas in conditions of countering the enemy.

Keywords: material supply system, sabotage and reconnaissance group, small unmanned aerial vehicle, marching guard, universal fragmentation grenade.

Возрастающая угроза государственному суверенитету нашей страны, принятие новых форм и методов ведения военных действий, их всестороннее ресурсное снабжение, требуют

модернизации существующей системы материального обеспечения (СМО) войск, составной частью которой является система поставки материальных средств (СПМС). Существует

объективное противоречие между необходимостью обеспечения требуемой эффективности СПМС автоколоннами воинским формированиям в район ведения боевых действий в условиях несанкционированных действий со стороны противника и отсутствием соответствующего методического обеспечения для информационной поддержки принимаемых технических и организационно-технических решений для проведения превентивных управляющих воздействий, обеспечивающих выполнение современных требований.

Структурная блок-схема предлагаемой комплексной методики оценки эффективности СПМС автомобильными транспортными колоннами воинским формированиям в район ведения боевых действий в условиях противодействия противнику представлена на рис. 1.

Как видно из приведенной на рис. 1 блок-схемы комплексной методики она содержит частные методики, специальное программное обеспечение и соответствующие рекомендации:

- частная методика оценки эффективности СПМС автоколоннами воинским формированиям в условиях противодействия противнику;
- частная методика определения вероятностей нахождения ПО автоколонны в состояниях противодействия с ДРГ противника;

– частная методика определения оптимального времени противодействия ПО автоколонны с ДРГ противника;

– частная методика расчета рациональных параметров универсальной осколочной гранаты к автоматическому гранатомету при стрельбе по МБПЛА;

– специальное программное обеспечение;

– рекомендации по совершенствованию СПМС автоколоннами воинским формированиям в район ведения боевых действий в условиях противодействия противнику.

В свою очередь каждая частная методика содержит свои методы и модели оценки эффективности СПМС автоколоннами воинским формированиям в район ведения боевых действий [1], вероятности нахождения ПО в состояниях противодействия ДРГ при нападении на автоколонну [2], определения оптимального времени противодействия ПО ДРГ [3], расчета рациональных параметров универсальной осколочной гранаты к автоматическому гранатомету при стрельбе по МБПЛА [4] со специальным программным обеспечением по их определению.

Эффективность СПМС автоколоннами воинским формированиям в условиях противодействия зависит от живучести автотранспортных средств колонны и их защищеннос-



Рис. 1. Блок-схема комплексной методики

ти от противника при совершении марша, обеспечиваемая ПО и определяется зависимостью [5]

$$E = \frac{D_s}{D_t} \cdot P_v, \quad (1)$$

где E — эффективность поставки;

D_s — объем материальных средств, доставленных безопасно;

D_t — общий объем запланированных материальных средств к поставке;

P_v — вероятность успешной поставки материальных средств по назначению.

В свою очередь вероятность успешной поставки материальных средств определяется по зависимости [5]

$$P_v = P_{\text{пр}_i} \cdot \prod_{j=1}^n (1 - P_j), \quad (2)$$

где $P_{\text{пр}_i}$ — вероятность прибытия i -й автоколонны с материальными средствами в район размещения воинских формирований;

P_j — вероятность неприбытия j -й автоколонны с материальными средствами в район размещения воинских формирований.

Блок-схема частной методики оценки эффективности СПМС автоколоннами воинским формированиям в условиях противодействия противнику приведена на рис. 2.

Из приведенной блок-схемы частной методики оценки эффективности СПМС автоколоннами воинским формированиям в условиях противодействия противнику видно, что она включает: модуль исходной информации, функциональный и информационный модули.

Блок-схема частной методики определения вероятностей нахождения ПО автоколонны в состояниях противодействия с ДРГ при нападении на автомобильную транспортную колонну приведена на рис. 3.

Из приведенной блок-схемы частной методики видно, что она также включает: модуль исходной информации; функциональный модуль и информационный модули. Каждый модуль состоит из блоков. Модуль исходной информации содержит блоки 1 и 2. Функциональный модуль содержит модель определения вероятностей нахождения БО транспортной колонны в состояниях противодействия с ДРГ противника.

Структурная блок-схема частной методики определения оптимального времени противо-



Рис. 2. Блок-схема частной методики оценки эффективности СПМС автоколонной воинским формированиям в условиях противодействия ДРГ противника

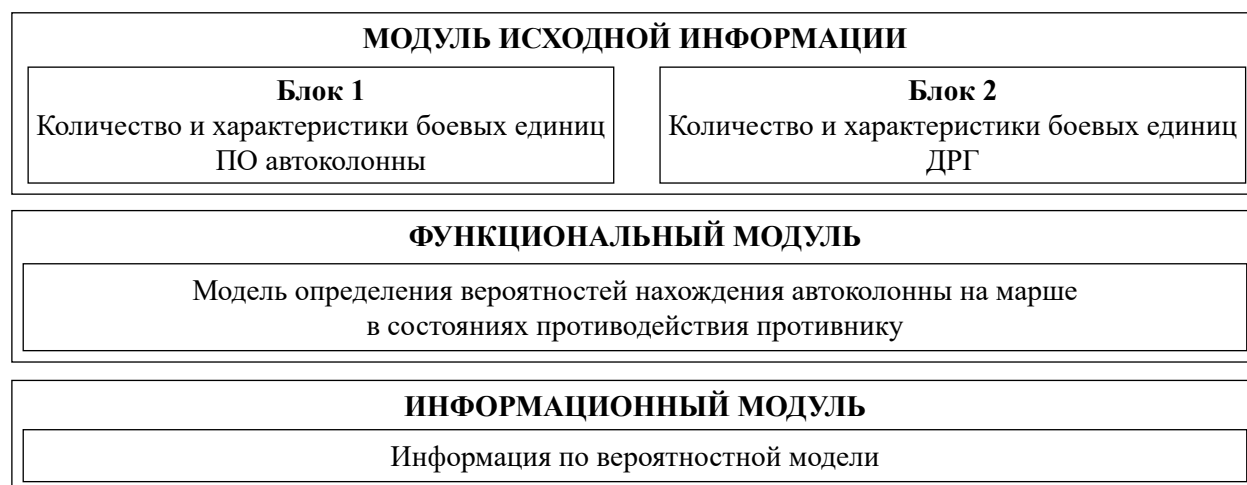


Рис. 3. Блок-схема частной методики определения вероятностей нахождения ПО автоколонны в состояниях противодействия с ДРГ

действия ПО автоколонны при нападении ДРГ противника на автомобильную транспортную колонну приведена на рис. 4.

Модуль исходной информации также состоит из блоков 1 и 2, содержащих количество и характеристики боевых единиц ПО автоколонны и ДРГ. Функциональный модуль содержит модель определения оптимального времени противодействия ПО автоколонны ДРГ противника.

Структурная блок-схема частной методики расчета рациональных параметров универсальной осколочной гранаты к автоматическому гранатомету при стрельбе по МБПЛА приведена на рис. 5.

Модуль исходной информации также состоит из блоков 1 и 2, содержащих количество и характеристики вооружения ПО автоколонны и МБПЛА. Функциональный модуль содержит имитационную модель расчета рациональных характеристик универсальной осколочной гранаты к автоматическому гранатомету ПО автоколонны при стрельбе по МБПЛА.

Методика содержит специальное программное обеспечение по оценке эффективности функционирования СПМС автоколоннами воинским формированиям в район ведения боевых действий, включающее программные продукты:

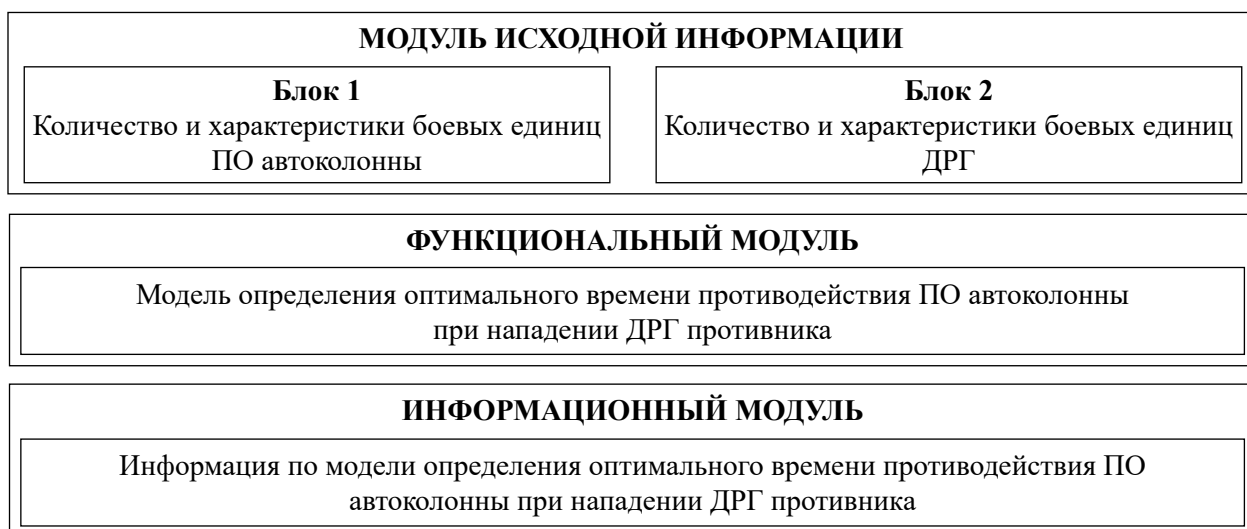


Рис. 4. Блок-схема частной методики определения оптимального времени противодействия ПО автоколонны ДРГ противника

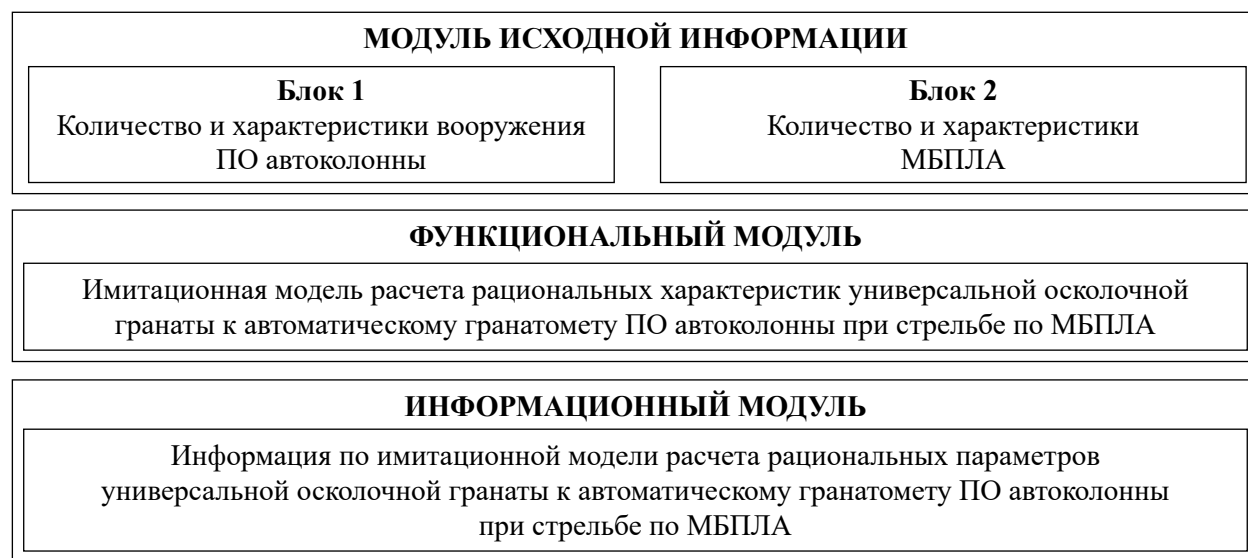


Рис. 5. Блок-схема частной методики расчета рациональных параметров универсальной осколочной гранаты к автоматическому гранатомету ПО автоколонны при стрельбе по МБПЛА

Таблица

Исходные данные

Временные характеристики, мин					Вариант
t_{ϕ}	$t_{\text{обн}}$	$t_{\text{обс}}$	$t_{\text{против}}$	τ	
180	10	30	40	360	1

1. «Математическая модель определения состояний системы поставки материальных средств воинским формированиям в район ведения боевых действий в условиях противодействия противнику» [5].

2. «Модель определения вероятностей нахождения боевого охранения транспортной колонны в состояниях противодействия диверсионно-разведывательной группе при поставке материальных средств воинским формированиям в условиях противодействия противнику» [6].

3. «Аналитическая модель определения вероятностей нахождения боевого охранения транспортной колонны в состояниях противодействия диверсионно-разведывательной группе противника при нападении на транспортную колонну» [7].

4. «Имитационная модель расчета рациональных характеристик универсальной осколочной гранаты повышенного могущества действия для автоматических средств огневого поражения малогабаритного беспилотного летательного аппарата» [8].

По разработанным моделям и программам проведен вычислительный эксперимент по оценке эффективности СПМС автоколонной воинским формированиям в условиях противодействия противнику.

В таблице представлены исходные данные для проведения эксперимента. Результаты вычис-

лительного эксперимента для исходных данных, представленных в таблице, приведены на рис. 6.

Их анализ показывает, что вероятность успешной доставки материальных средств P_v , равная вероятности прибытия автоколонны в район размещения воинских формирований P_s (состояние S_s) может достигать значений более 65 %. Вероятность успешной доставки материальных средств зависит от эффективности функционирования на марше ПО автоколонны в условиях противодействия ДРГ и МБПЛА противника.

Результаты вычислительного эксперимента по оценке эффективности функционирования ПО автомобильной транспортной колонны СПМС воинским формированиям в район ведения боевых действий проведены на примере нападения ДРГ и представлены на рис. 7.

Анализ результатов, приведенных на рис. 7 показывает, что при противодействии ПО автоколонны ДРГ противника вероятности нахождения ПО в состояниях противодействия будут следующие:

– вероятность обстрела ПО автомобильной транспортной колонны более 30 %;

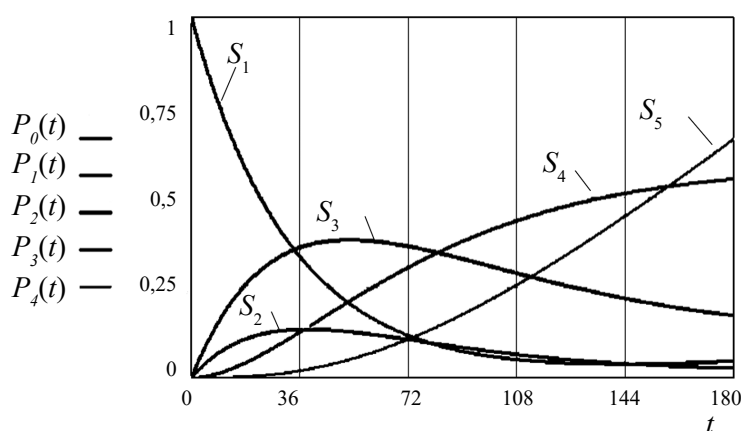


Рис. 6. Графическая интерпретация результатов расчета по модели определения вероятностей нахождения ПО автоколонны СПМС в состоянии противодействия противнику: S_1 — колонна в неразведанном состоянии; S_2 — автоколонна в разведанном состоянии; S_3 — автоколонна в состоянии нахождения под огнем противника; S_4 — автоколонна в подавленном состоянии на время $t_e = \tau$; S_5 — автоколонна в состоянии прибытия в заданный район

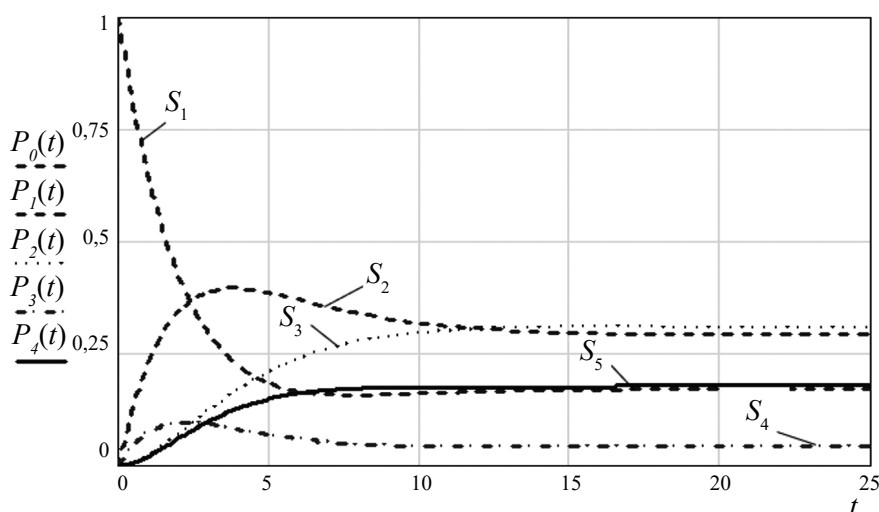


Рис. 7. Графическая интерпретация результатов расчета по модели определения вероятностей нахождения ПО автотранспортной колонны в состояниях противодействия ДРГ противника:

S_1 — ПО в неразведанном состоянии; S_2 — ПО в разведанном состоянии; S_3 — ПО в состоянии нахождения под огнем противника; S_4 — ПО в состоянии подавления; S_5 — ПО в боееспособном состоянии

— вероятность нахождения ПО автоколонны в подавленном состоянии не превышает 10 %;

— вероятность нахождения ПО автомобильной колонны в боееспособном состоянии и возможности осуществлять подготовку к выполнению следующей задачи по охране колонны составляет только 20 %.

Исходя из этого, можно сделать вывод о возможности обеспечения защищенности автоколонны и доставки груза воинским формированиям. Однако необходимо принять управленческие решения и провести организационно-технические мероприятия, направленные на

повышение вероятности нахождения ПО в боееспособном состоянии и возможности осуществлять подготовку к выполнению следующей задачи по охране автоколонны.

Проведен расчет оптимального времени противодействия ПО автомобильной транспортной колонны ДРГ противника при стрельбе на максимальную и минимальную дальности для условий, когда на вооружении охранения будет находиться автоматический станковый гранатомет АГС-17. В этом случае оптимальное время противодействия ПО автоколонны ДРГ противника составит:

– для максимальной дальности стрельбы, равной 1730 метров — 10 минут,

– для минимальной дальности стрельбы, равной 50 метров — 8 минут.

Таким образом, разработана комплексная методика оценки эффективности СПМС автоколоннами воинским формированиям в район ведения боевых действий. Методика содержит: частные методики, математические модели оценки эффективности СПМС автоколоннами воинским формированиям в условиях противодействия противнику, оценки эффективности противодействия ПО автоколонны ДРГ и МБПЛА противника; расчета рациональных характеристик универсальной осколочной гранаты повышенного могущества действия для автоматических средств огневого поражения МБПЛА, специальное программное обеспечение и рекомендации по совершенствованию рассматриваемой системы в условиях противодействия противнику.

Методика позволяет оценить эффективность функционирования СПМС автоколоннами воинским формированиям в район ведения боевых действий и разработать рекомендации по применению предлагаемого математического аппарата в системе информационной поддержки должностным лицам для принятия управленческих решений по повышению эффективности рассматриваемой системы при несанкционированных действиях со стороны противника.

Список источников

1. Курков С.Н., Моргунов Д.В. Модель определения вероятностей состояний и времени функционирования боевого охранения автоколонны при нападении диверсионно-разведывательной группы // Научно-технический журнал Известия ТулГУ, технические науки. Выпуск № 2, Изд-во ТулГУ. 2024. С. 44–49.

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

3. Курков С.Н., Курков Д.С., Моргунов Д.В. Модель определения оптимального времени противодействия боевого охранения автоколон-

ны при нападении диверсионно-разведывательной группы // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. № 1–2 (199–200). 2025. С. 47–51.

4. Курков С.Н., Моргунов Д.В. Модель расчета рациональных характеристик осколочной боевой части боеприпаса к гранатомету при стрельбе по малогабаритному беспилотному летательному аппарату // Сб. трудов ВНИК РАРАН «Актуальные проблемы защиты и безопасности», Том 2. 2024. С. 40–46.

5. Цыльковских А.А., Пыдер А.Р., Дубовский В.А. Особенности управления процессом доставки материальных средств в сложных условиях боевых действий // Военная мысль, 2023, № 6. С. 84–91.

6. Курков С.Н., Моргунов Д.В. Математическая модель определения состояний системы поставки материальных средств воинским формированиям в район ведения боевых действий в условиях противодействия противнику // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025610052 от 9.01.2025 г. М.: Роспатент. 2025.

7. Корчагин И.С. и др. Модель определения вероятностей нахождения боевого охранения транспортной колонны в состояниях противодействия диверсионно-разведывательной группе при поставке материальных средств воинским формированиям в условиях противодействия противнику // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025664119 от 3.06.2025 г. М.: Роспатент. 2025.

8. Корчагин И.С. и др. Аналитическая модель определения вероятностей нахождения боевого охранения транспортной колонны в состояниях противодействия диверсионно-разведывательной группе противника при нападении на транспортную колонну // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025665422 от 17.06.2025 г. М.: Роспатент. 2025.

9. Николаев А.Г. и др. Имитационная модель расчета рациональных характеристик универсальной осколочной гранаты повышенного могущества действия для автоматических средств огневого поражения малогабаритного беспилотного летательного аппарата // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025688241 от 17.10.2025 г. М.: Роспатент. 2025.

References

1. Kurkov S.N., Morgunov D.V. A model for determining the probabilities of states and the operating time of a convoy's combat guard during an attack by a sabotage and reconnaissance group // *Scientific and Technical Journal Izvestiya TlSU, Technical Sciences*. No 2, TlSU Publishing House. 2024. Pp. 44–49.
2. Iskorkin D.V. et al. A model for determining the probabilities of finding military convoy guards in states of counteraction with a sabotage and reconnaissance group // *Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism*. No 11–12 (197–198). 2024. Pp. 92–98.
3. Kurkov S.N., Kurkov D.S., Morgunov D.V. Model for Determining the Optimal Time for Countering a Combat Escort of a Motor Convoy During an Attack by a Sabotage and Reconnaissance Group // *Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism*. No 1–2 (199–200). 2025. Pp. 47–51.
4. Kurkov S.N., Morgunov D.V. A model for calculating the rational characteristics of a fragmentation warhead of an ammunition for a grenade launcher when firing at a small-sized unmanned aerial vehicle // *Proceedings of VNPK RARAN «Actual problems of protection and safety»*. Vol. 2. 2024. Pp. 40–46.
5. Tselykovskikh A.A., Pyder A.R., Dubovskiy V.A., Features of managing the process of delivering materiel in difficult combat conditions. // *Military Thought*. 2023. No 6. Pp. 84–91.
6. Kurkov S.N., Morgunov D.V. A mathematical model for determining the states of the supply system of materiel to military formations in the area of combat operations in conditions of countering the enemy // *Certificate of state registration of the computer program No. 2025610052 dated January 9, 2025*. Moscow: Rospatent. 2025.
7. Korchagin I.S. et al. A model for determining the probabilities of finding the combat guard of a transport convoy in states of countering a sabotage and reconnaissance group when supplying material to military formations in conditions of countering the enemy // *Certificate of state registration Computer programs No. 2025664119 dated 06/3/2025*. Moscow: Rospatent. 2025.
8. Korchagin I.S. et al. An analytical model for determining the probabilities of finding combat guards of a transport convoy in states of countering an enemy sabotage and reconnaissance group during an attack on a transport convoy // *Certificate of state registration of a computer program No. 2025665422 dated 06/17/2025*. Moscow: Rospatent. 2025.
8. Nikolaev A.G. et al. Simulation Model for Calculating the Rational Characteristics of a High-Power Universal Fragmentation Grenade for Automatic Firearms of a Small-Sized Unmanned Aerial Vehicle // *Certificate of State Registration of the Computer Program No. 2025688241 dated 17.10.2025*. Moscow: Rospatent, 2025.

УДК 654.9

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_36

ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ ТРОСОВОГО ПРОТИВОТАРАННОГО БАРЬЕРА ПРИ НАЕЗДЕ АВТОМОБИЛЯ: ЧАСТЬ 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

THE DEFORMABILITY OF A ROPE ANTI-RAM BARRIER WHEN A CAR HITS: PART 1. PROBLEM STATEMENT

В.Н. Большаков¹, канд. техн. наук С.И. Косяков²

V.N. Bolshakov, Ph.D. S.I. Kosyakov

¹12 Главное управление Минобороны России, ²12 ЦНИИ Минобороны России

С целью цифровых испытаний тросового противотаранного барьера сформулированы взаимосвязанные модели деформируемости его силовых тросов и наезжающего грузового автомобиля. Модели учитывают конкуренцию между разрушением конструкций барьера и автомобиля. Так, вследствие незамкнутости тросов (наличия у них свободных концов), первая модель оценивает вытравливание тросов и необратимое расслабление тросовых петель. Вторая модель оценивает неупругий удар грузового автомобиля о силовые тросы и деформирование его передней подвески. Противотаранный барьер выдержит цифровые испытания, если разрушится позже автомобиля.

Ключевые слова: грузовой автомобиль, деформируемость, неупругий удар, противотаранный барьер, силовые тросы.

For the purpose of digital testing of a rope anti-ram barrier, interrelated models of the deformability of its power cables and an oncoming truck have been formulated. The models take into account the competition between the destruction of barrier structures and the car. Thus, due to the unclosed nature of the cables (the presence of free ends), the first model evaluates the etching of the cables and the irreversible relaxation of the cable loops. The second model evaluates the inelastic impact of the truck on the power cables and the deformation of its front suspension. The anti-ram barrier will withstand digital tests if it collapses later than the car.

Keywords: truck, deformability, inelastic impact, anti-ram barrier, power cables.

Введение

Для противодействия прорыву на охраняемый объект нарушителя на автомобиле применяются противотаранные барьеры (ПТБ). Часто ПТБ подвергаются лишь цифровым испытаниям, воспроизводящим таран грузовым автомобилем (ГА) и рассчитывающим деформируемость конструкций ГА и ПТБ. То есть, в расчетах надо

учитывать конкуренцию между разрушением элементов ГА и ПТБ, [1].

В статье рассматриваются ПТБ ПТК-1 [2]. ПТБ (рис. 1) представляет металлическую конструкцию, состоящую из двух стоек-швеллеров 2, замоноличенных в фундаментную железобетонную плиту 1. На стойках 2 установлены двустворчатые распашные ворота, на створках 6 которых расположены тросовые силовые эле-

менты 5. Элементы 5 размыкаются и запираются сцепным устройством элементы 7, 8, 9 при вытаскивании или вставлении шкворня 10. При этом одновременно размыкаются или запираются ворота. Соответственно, основу цифровых испытаний ПТБ ПТК-1 при таране ГА составляют две взаимосвязанные математические модели — деформирования тросовых силовых элементов ПТБ и ГА. В статье формулируются указанные модели.

Модель деформирования силовых тросов ПТК-1

В каждом силовом элементе находится по две тросовые петли (рис. 2). В тросах предварительно создается натяжение T_0 . Так как каждая тросовая петля является незамкнутой (со свободными концами), то для фиксации создаваемого натяжения T_0 используются зажимы. Усилия, развиваемые при затягивании на зажимах резьбовых соединений, прижимают обе части тросовой петли друг к другу, и за счет силы трения на контактах тросов происходит уравнивание силы натяжения троса. Поскольку зажимы технологически устанавливаются последовательно при фиксированном натяжении тро-

са, то можно считать начальное натяжение равным T_0 на каждом участке троса-петли между двумя зажимами.

Предполагается, что при наезде ГА на ПТК-1 тросы смещаются в горизонтальном направлении. Обозначим это смещение как x . Так как длина тросовой петли во много раз превосходит их поперечные размеры (рис. 2), то деформирование можно считать одномерным — растягиванием. Обозначим через z координату точки троса на оси, проходящей вдоль троса по линии контакта двух участков петли, с началом координат на оси сцепного устройства (на шкворне 10, рис. 1).

Расстояние между двумя параллельными тросовыми петлями составляет 0,125 м, что во много раз меньше длины каждого троса в петле ($\approx 7,12$ м). Поэтому естественно предполагать, что работа обеих петель при нагружении осуществляется одинаковым образом, то есть непосредственно в расчетах можно рассматривать только одну петлю, а в окончательном результате удвоить усилия, развиваемые при деформировании системы.

Суммарная длина обеих половинок сцепки 7–9 (рис. 1) в 10 раз меньше длины троса. Сцепка 7–9 в сборе допускает свободный пово-

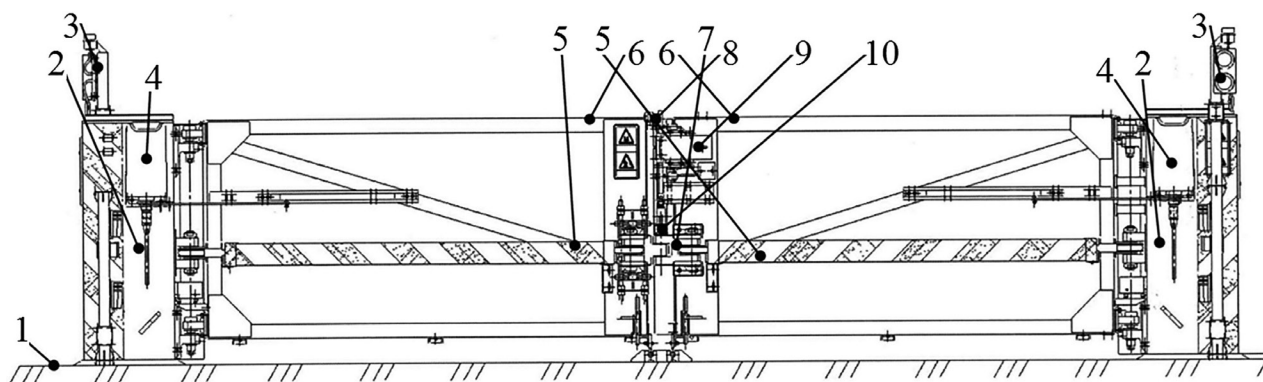


Рис. 1. Противотаранные ворота ПТК-1 [2]

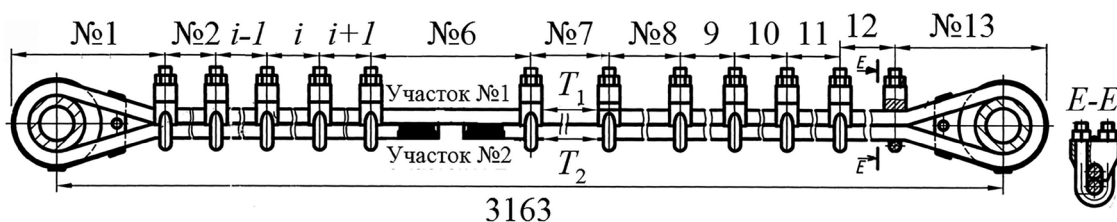


Рис. 2. Тросовая петля противотаранных ворот ПТК-1

рот вдоль оси шкворня 10, то есть не развивает соответствующих моментов сил. Оба эти обстоятельства позволяют упростить задачу. Так как трос является гибким, то моментом сил при его изгибе можно пренебречь. С учетом малости продольного размера сцепки и отсутствия развиваемого ею момента (как и у троса) можно использовать эквивалентную схему. В ней нить троса сплошная (не содержит разрыва), а сцепка представляется как присоединенная точечная масса $m_* = m_{\text{сц}} / 2$, равная половине массы сцепки (вторая половина массы сцепки соотносена с параллельной тросовой петлей).

Общее уравнение движения при продольном изгибе имеет вид [3, 4]

$$EJ \frac{\partial^4 x}{\partial z^4} + m(z) \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - 2T_0 \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = F(z), \quad (1)$$

где J — момент инерции поперечного сечения тросовой петли;

E — модуль Юнга материала троса;

$m(z)$ — линейная (на единицу длины) масса тросовой петли,

$$m(z) = m_* \delta(z) + 2m_{\text{тр}} + \frac{m_{\text{в}}}{2l},$$

где $\delta(z)$ — дельта функция;

$m_{\text{тр}}$ — масса единицы длины троса,

$m_{\text{в}}$ — масса ворот;

T_0 — натяжение троса;

$F(z)$ — линейная плотность внешних сил, приложенных к тросовой петле.

Так как ворота вплотную примыкают к тросовой петле, то масса ворот считается равномерно распределенной по длине l каждой из двух тросовых петель. Первым членом в уравнении (1), описывающим изгиб троса, можно пренебречь по сравнению с третьим членом, передающим влияние силы натяжения троса на его деформирование. Тогда деформирование тросовой системы задается уравнением поперечных колебаний струны

$$m(z) \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - 2T_0 \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = F(z). \quad (2)$$

Уравнение (2) не является окончательным, поскольку при наезде ГА на ПТК-1 натяжение троса будет изменяться в процессе деформирования. К этому имеется две причины. За счет

растяжения троса в условиях полного защемления увеличивается продольное напряжение σ_{zz} в волокнах троса, то есть и его натяжение T . Имеется и противоположно направленный процесс — вытравливание троса через зажимы (то есть фактически отсутствие полного защемления). Это есть прямое следствие незамкнутости троса — наличия у него свободных концов. Последний процесс приведет к уменьшению натяжения троса T . Оба указанных обстоятельства находят отражение в уравнении 3, обобщающем уравнение (2):

$$m(z) \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - [T_1(z, t) + T_2(z, t)] \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = F(z, t). \quad (3)$$

Здесь $T_1(z, t)$ и $T_2(z, t)$ — натяжения на первом и втором участках тросовой петли. Первым считается участок троса между его креплениями, не имеющий разрыва, вторым — участок между креплениями, содержащий разрыв (рис. 2). Натяжение каждого из двух отрезков троса между двумя последовательными рабочими зажимами не зависит от координаты z , но в общем случае различно для троса на первом и втором участках, $T_1 \neq T_2$.

Натяжения T_1 и T_2 на каждом из отрезков петли изменяются в процессе проскальзывания свободных концов троса, приводя к общему ослаблению тросовой петли. На проскальзывание свободных концов троса накладывается дополнительное деформирование троса при наезде ГА, описываемое уравнением (3) и приводящее к увеличению длины каждого из отрезков, то есть к увеличению его натяжения.

Замыкание математической модели (3) осуществляется с помощью системы дифференциальных уравнений, каждое из которых выражает второй закон Ньютона для проскальзывания на i -м отрезке (для первого и второго участков тросовой петли)

$$\begin{aligned} m_i^{(1)} \frac{d^2 l_i^{(1)}}{dt^2} &= \\ &= -[T_1^{(i)} - T_1^{(i-1)} - F_\tau \cdot \chi_1^{iM}] + [T_1^{(i+1)} - T_1^{(i)} - F_\tau \cdot \chi_1^{iP}]; \\ m_i^{(2)} \frac{d^2 l_i^{(2)}}{dt^2} &= \\ &= -[T_2^{(i)} - T_2^{(i-1)} - F_\tau \cdot \chi_2^{iM}] + [T_2^{(i+1)} - T_2^{(i)} - F_\tau \cdot \chi_2^{iP}], \end{aligned} \quad (4)$$

где $m_i^{(1)}$, $m_i^{(2)}$ — массы i -го отрезка тросовой петли на первом и втором участках;
 $l_i^{(1)}$, $l_i^{(2)}$ — соответствующие текущие длины отрезков

$$\chi_1^{iM} = \text{sign}(T_1^{(i)} - T_1^{(i-1)});$$

$$\chi_2^{iM} = \text{sign}(T_2^{(i)} - T_2^{(i-1)});$$

$$\chi_1^{iP} = \text{sign}(T_1^{(i+1)} - T_1^{(i)});$$

$$\chi_2^{iP} = \text{sign}(T_2^{(i+1)} - T_2^{(i)}).$$

Для первого и последнего отрезков уравнения (4) немного видоизменяются

$$m_1^{(1)} \frac{d^2 l_1^{(1)}}{dt^2} = m_1^{(2)} \frac{d^2 l_2^{(2)}}{dt^2} =$$

$$= [T_2^{(2)} - T_2^{(1)} - F_\tau \cdot \chi_2^1] + [T_1^{(2)} - T_1^{(1)} - F_\tau \cdot \chi_1^1]; \quad (5)$$

$$(m_1^{(1)} = m_1^{(2)}, l_1^{(1)} = l_1^{(2)}, T_1^{(1)} = T_1^{(2)});$$

$$\chi_1^1 = \text{sign}(T_1^{(2)} - T_1^{(1)}), \chi_1^2 = \text{sign}(T_2^{(2)} - T_2^{(1)}).$$

Аналогично записывается уравнение для последнего n -го участка.

При интегрировании системы (4) необходимо задавать следующее условие, определяемое пассивным характером силы трения: если для любой из скобок в правой части (4) выполняется условие, например, $\text{abs}[T_1^{(i)} - T_1^{(i-1)}] < F_\tau$, то соответствующая скобка полагается равной нулю (аналогично поступают для других скобок в системе уравнений (4)).

Такое же условие проверяется при интегрировании уравнения (5): например, если $\text{abs}[T_2^{(2)} - T_2^{(1)}] < F_\tau$, то соответствующая скобка полагается равной нулю.

Чтобы полностью замкнуть систему уравнений, необходимо задать зависимость натяжения троса T на отрезках между зажимами в зависимости от длины отрезков l при их растяжении. Типичная диаграмма растяжения металлических материалов показана на рис. 3. Здесь $\varepsilon = \Delta l / l_0$ — относительное удлинение, σ — продольное напряжение. Линейный участок диаграммы 0–1, на котором выполняется закон Гука $\sigma = E_{\text{ТР}} \cdot \varepsilon$ ($E_{\text{ТР}}$ — модуль Юнга троса), описывает упругое растяжение троса. Участок 1–2 описывает упруго-пластическое растяжение троса, а участок 2–3 — участок пластического течения.

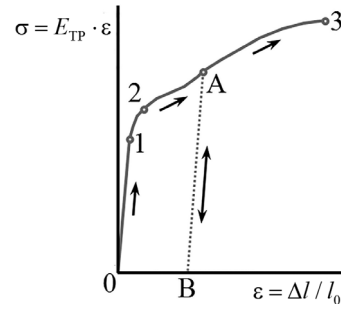


Рис. 3. Диаграмма растяжения [5]

Поскольку в уравнениях деформирования тросовой системы ПТК-1 (1)–(5) фигурируют не напряжения в тросе, а развиваемые тросом усилия, то закон растяжения троса запишем для усилий, умножая напряжения на площадь поперечного сечения троса. Учтем также, что если в процессе растяжения троса возникнет разгрузка (длина троса или какого-то его отрезка станет уменьшаться), то на диаграмме разгрузка изобразится прямой линией АВ (рис. 3), практически параллельной участку упругого деформирования [5]. Для удобства интегрирования уравнений движения ГА и ПТК-1 закон нагружения-разгрузки троса запишем используя вместо деформации скорость деформирования

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{dl}{dt} \cdot \frac{1}{l_0}.$$

С учетом опытных данных из справочников [5–9] имеем следующие соотношения:

– нагрузка на упругом участке

$$\frac{dT}{dt} = 7,4 \cdot 10^7 \frac{dl}{dt} \cdot \frac{1}{l_0}, \text{ Н/с},$$

$$\text{если } \frac{dl}{dt} > 0 \text{ и } \frac{l}{l_0} < 1,002;$$

– нагрузка на упруго-пластическом участке

$$\frac{dT}{dt} = 5,6 \cdot 10^5 \frac{dl}{dt} \cdot \frac{1}{l_0}, \text{ Н/с}$$

$$\text{если } \frac{dl}{dt} > 0 \text{ и } \frac{l}{l_0} > 1,002;$$

– упругая разгрузка из состояния текучести

$$\frac{dT}{dt} = 7,4 \cdot 10^7 \frac{dl}{dt} \cdot \frac{1}{l_0}, \text{ Н/с}$$

если $\frac{dl}{dt} < 0$ и $\frac{l}{l_0} > 1,002$.

Если расчетная величина натяжения T на каком-то из отрезков превысит предел прочности на растяжение $2,9 \cdot 10^5 H$, то трос считается утратившим несущую способность на данном отрезке, то есть полагается $T = 0$. Если в процессе расчета натяжение окажется меньше нуля, то также полагается $T = 0$, поскольку трос не может передавать сжимающих усилий.

В начальный момент времени на всех рабочих отрезках между зажимами тросовой петли задается одно и то же натяжение T_0 , а начальное отношение l/l_0 . На отрезке, содержащем свободный конец троса, во все время расчета натяжение отсутствует, $T = 0$.

Чтобы завершить задание исходных данных необходимо определиться с силой трения F_t между двумя участками тросовой петли в местах зажимов. Коэффициент трения покоя несмазанной стали по несмазанной стали может быть принят равным единице [7, 10]. Тогда сила F_t есть усилие прижима тросов друг к другу, которое задается моментом затяжки каждой из двух гаек дужки зажима (рис. 2) [9]. При проскальзывании коэффициент трения уменьшается. Чтобы чрезмерно не усложнять математическую модель будем полагать $F_t = const$. Это предположение несколько повышает уровень силового взаимодействия между ПТК-1 и ГА при наезде.

Математическая модель деформирования ГА

Компоновка узлов ГА позволяет рассматривать его (с точки зрения составления уравнений движения) как систему взаимодействующих в процессе удара поддресоренных и неподдресоренных масс [1]. К последним относятся элементы ГА, связанные с передними и задними колесами. Рама, двигатель, кабина, кузов, перевозимый груз относятся к поддресоренным массам. Такое деление обеспечивает рассмотрение ГА, как со-

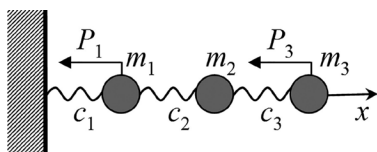


Рис. 4. Эквивалентная схема ГА при наезде на неподвижный недеформируемый ПТБ [1]

средоточенной системы, то есть описывать изменение его состояния системой обыкновенных дифференциальных уравнений.

В [1] представлена математическая модель наезда ГА своими колесами на недеформируемый ПТБ. Эквивалентная схема тарана показана на рис. 4. Здесь m_1 — неподдресоренная масса, связанная с передней осью; m_2 — поддресоренная масса; m_3 — неподдресоренная масса, связанная с тележкой задних мостов; c_1 — суммарная жесткость двух передних шин; c_2 — суммарная жесткость двух передних рессор; c_3 — суммарная жесткость двух задних рессор. К массам m_1 , m_3 приложены силы тяги (считается, что двигатель и трансмиссия продолжают работать): P_1 — суммарная тяга передних колес, P_3 — суммарная тяга блока задних колес.

В составе ПТБ ПТК-1 в качестве основного силового элемента используется тросовая система (рис. 1 и 2). То есть, удар ГА о ПТК-1 будет носить неупругий характер из-за необратимого расслабления тросовой петли. В связи с этим, модель на рис. 4 следует несколько видоизменить (рис. 5). Исходя из математической модели (1) деформирования силового элемента ПТК-1, к массе m_1 передней подвески ГА присоединяется масса тросовой петли $m_{тр}$ и масса ворот m_B , приходящиеся на ширину автомобильного колеса

$$m_0 = (2m_{тр} + \frac{m_B}{2l}) \cdot 0,5,$$

где $m_{тр}$ — масса единицы длины троса;

m_B — масса ворот;

l — ширина ворот

0,5 м — ширина колеса.

Кроме того, к демпферу c_2 присоединяется демпфер c_1 .

Таким образом, вводится допущение (рис. 5), что масса передней подвески (колес, переднего моста, подвески) считается во время наезда присоединенной массой тросовой системы (четверть этой массы на половинку одной тро-

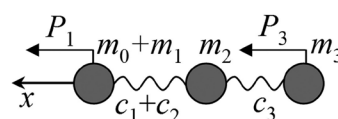


Рис. 5. Эквивалентная схема ГА при наезде на ПТК-1

совой петли). Аналогично считается присоединенной к тросовой системе и масса ворот. Отсюда координаты передних колес вычисляются из уравнений (1)–(5), а математическая модель деформирования ГА записывается для колебаний поддрессоренной массы m_2 и массы m_3 .

Записывая уравнение для функции Лагранжа

$$L = T - U = \frac{m_2 \dot{x}_2^2}{2} + \frac{m_3 \dot{x}_3^2}{2} - \frac{(c_1 + c_2)(x_1 - x_2)^2}{2} - \frac{c_3(x_2 - x_3)^2}{2}$$

получим систему уравнений для расчета деформирования автомобиля

$$m_2 \ddot{x}_2 - \frac{(c_1 + c_2)}{2}(x_1 - x_2) + \frac{c_3}{2}(x_2 - x_3) = 0; \quad (6)$$

$$m_3 \ddot{x}_3 - \frac{c_3}{2}(x_2 - x_3) = P_3.$$

При решении уравнений (6) для ГА в качестве величины m_2 задается 1/4 часть от суммарной массы двигателя, кабины, кузова, силовой рамы и груза, а в качестве величины m_3 — 1/4 часть от суммарной массы задних колес, тележки задних мостов, карданова вала и задней подвески. В свою очередь, в уравнении (3) в качестве линейной плотности внешних сил $F(z)$, приложенных к тросовой петле, рассматривается сумма усилий в покрышке и рессоре переднего колеса F_* , а также тяга этого колеса

$$F(z, t) = \frac{1}{0,5} \left[-\frac{(c_1 + c_2)}{2}(x_1 - x_2) + \frac{P_1}{2} \right],$$

где 0,5 м — ширина колеса.

В качестве критического показателя, определяющего разрушится или нет конструкция передней подвески ГА, сможет он или нет преодолеть ПТК-1, рассматривается сила F_* , развиваемая при деформации передней рессоры

$$F_* = -\frac{1}{0,5} \frac{(c_1 + c_2)}{2}(x_1 - x_2).$$

Заключение

В статье развивается методология [1] цифровых испытаний ПТБ посредством расчета раз-

рушения не всех конструкций ПТБ и ГА, а лишь их критически важных силовых элементов.

Для ПТК-1 такими элементами являются незамкнутые тросовые петли (из-за наличия у тросов свободных концов), которые вытравливаются и необратимо расслабляются при наезде ГА.

Для ГА критическими элементами являются детали передней подвески. При конкуренции между разрушением ПТБ и ГА барьер считается выдержавшим испытания, если автомобиль разрушится раньше.

Список источников

1. Большаков В.Н., Косяков С.И. Обоснование требований к противотаранным барьерам и методам их испытаний // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 11–12 (185–186). С. 84–90.
2. Противотаранный комплекс «ПТК-1М»: пат. 206425 Рос. Федерация. № 2021108512; заявл. 29.03.21; опубли. 13.09.21, Бюл. № 26. 8 с.
3. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1972. 416 с.
4. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле / пер. с англ. Пановко Я.Г. изд. 2-е, стер. М.: URSS, КомКнига, 2006. 439 с.
5. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: справочник. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
6. Дукельский А.И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1966. 485 с.
7. Физические величины: справочник; под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
8. Справочник проектировщика. Металлические конструкции промышленных зданий и сооружений; под ред. Н.П. Мельникова. М.: Стройиздат, 1962. 618 с.
9. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые соединения. Библиотека конструктора. М.: Машиностроение, 1973. 256 с.
10. Крагельский И.В., Виноградова И.Э. Коэффициенты трения: справочное пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машгиз, 1962. 220 с.

References

1. Bolshakov V.N., Kosyakov S.I. Justification of requirements for anti-ram barriers and methods of their testing // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 11–12 (185–186). Pp. 84–90.
2. Protivotaranny complex «PTK-1M». pat. 206425 Russian The Federation. No. 2021108512; appl. no. 03/29/21; publ. 09/13/21, Bul. no. 26. 8 p.
3. Biderman V.L. Applied theory of mechanical vibrations: textbook, Higher School, Moscow, 1972. 416 p.
4. Timoshenko S.P. Fluctuations in engineering; translated from English: Panovko Ya.G. 2nd ed., ster. M.: URSS, KomKniga, 2006. 439 p.
5. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. Calculation of the strength of machine parts: handbook, 4 ed., Mashinostroenie Publ., Moscow, 1993. 640 p.
6. Dukelsky A.I. Suspended cable cars and cable cranes, 4th ed., Mashinostroenie Publ., Moscow, 1966, 485 p.
7. Physical quantities: handbook, edited by I.S. Grigoriev, E.Z. Meilikhov, Energoatomizdat Publ., Moscow, 1991. 1232 p.
8. The designer's handbook. Metal structures of industrial buildings and structures, edited by N.P. Melnikov, Stroyizdat Publ., Moscow, 1962. 618 p.
9. Birger I.A., Iosilevich G.B. Threaded connections. The designer's Library. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1973. 256 p.
10. Kragelsky I.V., Vinogradova I.E. Friction coefficients: a reference manual, 2nd ed., Moscow, Mashgiz Publ., 1962. 220 p.

УДК 623.746.4-519;621.384.3;621.396.969.3;621.396

doi: 10.53816/23061456_2025_11-12_43

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

ANALYSIS OF MODERN METHODS FOR DETECTION UNMANNED AERIAL VEHICLES

В.А. Прохоров, С.Н. Васильева, Л.А. Башта, Ю.П. Крылов

V.A. Prokhorov, S.N. Vasilieva, L.A. Bashta, Y.P. Krylov

НПО Спецматериалов

Статья посвящена исследованию и сравнительному анализу методов обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), используемых различными странами. Рассмотрены оптические, акустические, радиолокационные, инфракрасные и электромагнитные системы наблюдения, применяемые для своевременного выявления БПЛА. Проведена оценка эффективности методов обнаружения БПЛА, выявлены их преимущества и недостатки. Рассмотрены примеры современных систем обнаружения БПЛА, представленные на зарубежном рынке, а также системы, на данный момент не стоящие на снабжении армий. Особое внимание уделено перспективным комплексным направлениям развития технологий защиты объектов инфраструктуры от угроз, связанных с использованием малозаметных БПЛА террористическими организациями.

Ключевые слова: БПЛА, летательные средства, противодействие БПЛА, обнаружение БПЛА, радиолокационные системы.

The article is devoted to the study and comparative analysis of various methods of detecting unmanned aerial vehicles (UAVs) used by different countries. Optical, acoustic, radar, infrared, and electromagnetic surveillance systems are considered, which are used for the timely detection of unauthorized UAVs. The effectiveness of UAV detection methods was evaluated, and their advantages and disadvantages were identified. Examples of modern UAV detection systems available on the foreign market are considered, as well as systems that are not currently in service with the armies. Special attention is paid to promising integrated directions of development of technologies for protecting infrastructure facilities from threats associated with the use of stealthy UAVs by terrorist organizations.

Keywords: UAV, aircraft, UAV countermeasures, UAV detection, radar systems.

Введение

Ввиду роста числа гражданских и военных БПЛА значительно увеличились риски безопасности объектов гражданской и военной инфраструктуры [1, 2]. Представители террористических организаций активно используют компактные БПЛА с целью реализации терактов с

использованием взрывчатых веществ, сбора разведывательной информации и психологического воздействия на население. Эффективность существующих мер защиты существенно зависит от точности и скорости обнаружения воздушных целей малых размеров и низкой заметности.

Задача своевременного обнаружения БПЛА становится особенно актуальной ввиду их ма-

лой отражающей способности, малого уровня шума и относительно медленного движения, что затрудняет их обнаружение традиционными средствами противовоздушной обороны (ПВО). Поэтому становится перспективной разработка новых подходов, а также повышение чувствительности имеющихся технических решений.

Наиболее распространенными методами обнаружения БПЛА являются:

- радиолокационный;
- оптико-электронный;
- инфракрасный;
- акустический;
- электромагнитный.

Каждый из указанных методов имеет определенные ограничения и особенности применения.

Радиолокационный метод обнаружения БПЛА

Радиолокационный метод подразумевает использование специализированных радиолокационных систем (РЛС) для обнаружения воздушных объектов путем излучения радиоволн и приема их отражений. Как правило, к современным РЛС относятся крупные радиолокационные станции или мобильные комплексы [3], способные эффективно обнаруживать цели с большой площадью рассеивания на расстоянии до нескольких сотен километров. Однако малые размеры БПЛА приводят к слабым сигналам обратного рассеяния, поэтому для эффективного мониторинга территорий вблизи стратегических объектов часто применяются маловысотные радары, способные отслеживать низкоскоростные объекты с небольшой эффективной площадью рассеивания. Для обнаружения подобных БПЛА применяются компактные переносные станции с рабочей областью до 2–3 км [4].

Несмотря на перспективность использования радиолокационного метода обнаружения, он несет в себе ряд недостатков, одним из которых является многомерная обработка радиосигналов, на которые влияют не только элементы рельефа местности, но также и погодные условия.

В работе [5] показано, что обнаружение средствами радиолокационной разведки (РЛР) является эффективным в том случае, когда радиолокационная заметность цели соответствует

разрешающей способности РЛС. Показателем радиолокационной заметности цели является ее эффективная площадь рассеяния (ЭПР):

$$\sigma = \frac{\xi P_{\text{отр}}}{E_1} = \frac{\xi D_0 P_{\text{рас}}}{E_1} = \xi S D_0, \quad (1)$$

где ξ — коэффициент деполяризации вторичного поля ($0 \leq \xi \leq 1$);

$P_{\text{отр}}$ — мощность отраженного от цели сигнала;

E_1 — плотность потока энергии радиолокационного сигнала на сфере радиусом равным дальности до цели;

D_0 — значение диаграммы обратного рассеяния в направлении на РЛС;

S — полная площадь рассеяния цели.

Несмотря на то, что показатель ЭПР имеет размерность м^2 , он не является геометрической площадью, а является энергетической характеристикой, то есть представляет собой коэффициент, который учитывает отражающие свойства цели и зависит от пространственной конфигурации цели, электрических свойств ее материала и отношения линейных размеров цели к длине волны. В радиолокационных задачах распознавания и классификации целей обычно пользуются радиолокационным портретом воздушной цели (так называемой сигнатурой), который связан с геометрическими, физическими и кинематическими свойствами цели.

Согласно данным работы [6] составлена табл. 1, в которой приведены оценочные дальности, на которых РЛС могут обнаружить малые БПЛА (МБПЛА) в зависимости от их ЭПР и диапазона используемых частот.

Таблица 1

Потенциальные возможности обнаружения РЛС МБПЛА

Диапазон	ЭПР МБПЛА, кв. м.	Дальность обнаружения, км
Метровый	0,1	8–14
	0,01	0,1–1,5
Дециметровый	0,1	9–16
	0,01	0,8–2
Сантиметровый	0,1	12–25
	0,01	1,4–2,8

Из значений табл. 1 можно увидеть, что оценочные дальности, на которых РЛС войсковых частей ПВО [7], могут обнаружить МБПЛА с ЭПР 0,1 м², почти совпадают с реальными данными испытаний, чего нельзя сказать о МБПЛА с ЭПР 0,01 м², где реальные дальности стремятся к нулевым показателям. Утверждается, что для средств ПВО цели с ЭПР $\approx 0,01$ м² и меньше вообще не обнаруживаются.

Большой популярностью среди РЛС для выявления БПЛА также пользуются американские загоризонтные радиолокаторы Wide Aperture Research Facility (WARF), Relocatable Over-the-Horizon Radar (ROTHR).

WARF представляет собой высокоразрешающую бистатическую высокочастотную радиолокационную систему, расположенную на двух крупных полевых площадках в центральной долине Калифорнии. Передатчик WARF находится недалеко от Лост-Хиллз, а приемник — недалеко от Лос-Банос. На WARF проводили испытания технологии дальнего обнаружения и слежения, которая стала основой оперативных программ загоризонтных радиолокаторов для ВВС США, ВМС США и правительства Австралии.

Радар ROTHR применяется ВМС США и работает по принципу бистатического ионосферного обратного рассеяния для наблюдения за обширной территорией. Радарная система была разработана ВМС США при содействии Raytheon. В настоящее время используются три системы ROTHR: в Вирджинии, Техасе и Пуэрто-Рико. Радар может использовать различные полосы пропускания.

Радиолокационные системы обычно интегрируются в более крупные комплексы радиоэлектронной борьбы, такие как система радиолокационного наблюдения AN/APY-7 в платформе Joint Surveillance Target Attack Radar System (JSTARS). Набор систем JSTARS включает в себя защищенные коммуникационные технологии для обмена информацией с другими платформами разведки, наблюдения и рекогносцировки [8].

Опτικο-электронный метод обнаружения БПЛА

Опτικο-электронный метод предполагает использование видеокамер высокого разрешения, которые могут визуальнo зафиксировать

объект в условиях ограниченной видимости. Примерами оптико-электронных систем могут служить следующие разработки: израильские электрооптические системы DefenSync, оптико-электронное устройство идентификации и слежения БПЛА Zhejiang Fanshuang Technology Co., Ltd.

В системах DefenSync используются передовые электрооптические камеры, которые точно определяют положение БПЛА на основе их визуальных и температурных характеристик. Датчики системы легко интегрируются с другими технологиями, что позволяет сводить к минимуму ложные обнаружения.

Устройство, разработанное Zhejiang Fanshuang Technology Co., Ltd, объединяет в себе камеры видимого света высокой четкости, охлаждаемые/неохлаждаемые тепловизионные камеры, лазерные осветители и различные модули обнаружения спектра. Обеспечивает автоматическое слежение, интеллектуальный анализ и прецизионное электронное управление. Отличается компактной и скрытной конструкцией. Устройство может взаимодействовать с подсистемами наблюдения связи и подсистемами обнаружения радаров. Оно имеет алюминиевый корпус сферической конструкции, устойчивый к сильному ветру и вибрациям [9].

Инфракрасный метод обнаружения БПЛА

Инфракрасный метод для обнаружения БПЛА использует инфракрасные камеры, которые обеспечивают эффективное обнаружение БПЛА за счет фиксации тепла, выделяемого двигателем и электроникой аппарата. Эти датчики регистрируют изменения температуры в зоне обзора и формируют тепловую карту окружающего пространства. Поскольку большинство современных БПЛА имеют двигатели внутреннего сгорания или электрические моторы, которые нагреваются при работе, ИК-датчики оказываются крайне полезными для выявления нарушителей.

Для увеличения вероятности успешного обнаружения применяют высокоточные инфракрасные камеры, способные различать незначительные температурные различия на значительных расстояниях.

Например, американский производитель FLIR Systems предлагает широкую линейку

ИК-камер, специально предназначенных для систем защиты от БПЛА. Модели FLIR Boson обеспечивают четкое распознавание теплых зон даже в темноте или неблагоприятных погодных условиях, имеют 2 матрицы на выбор: с разрешением 640×512 или 320×256 пикселей, и искусственный интеллект. Тепловизионный модуль оснащен многоядерным видеопроцессором с низким энергопотреблением (500 мВт) и работает под управлением масштабируемой архитектуры обработки тепловизионного видео [10].

Еще одним примером высокоточной камеры для выявления БПЛА является разработка Sierra-Olympia — Ventus HD6-0.6. Камера отличается возможностями встроенного кодирования видео и расширенной обработкой изображений, что позволяет интегрировать ее в высокопроизводительные системы видеонаблюдения. Основные характеристики камеры: 1,2 Мп, частота кадров от 30 до 60 Гц, диапазоном длин волн от 3 до 5 мкм. Благодаря 14-кратному оптическому зуму в формате матрицы 1280×960 эта камера может обнаруживать, распознавать и идентифицировать БПЛА на больших расстояниях.

Самое высокое разрешение представленных на рынке решений имеют камеры SPYNEL-X: 23 000×1280 — для модели 3500, 46 000×1280 — для модели 6000, 92 000×1280 — для модели 8000. SPYNEL-X, показанная на рис. 1 — это панорамная инфракрасная пассивная камера, которая может заменить до 90 HD MWIR-камер. Камера модели 3500 позволяет определить объект размером с человека на расстоянии до 2,5 км,



Рис. 1. Инфракрасная камера SPYNEL-X

объект размером с легковой автомобиль на расстоянии до 5 км, для модели 6000 эти параметры равны 5 и 9 км, а для модели 8000 — 9 и 12,5 км, соответственно [11].

Стоит отметить, что современные микро-БПЛА могут иметь небольшую тепловую эмиссию, что усложняет их обнаружение инфракрасным методом.

Акустический метод обнаружения БПЛА

Акустический метод основан на регистрации звуков, издаваемых двигателями и винтами БПЛА. Массивы микрофонов размещают на местности вокруг защищаемого объекта. Направление и скорость приближающегося БПЛА определяется по задержке звуковых волн между датчиками. Для выявления аномалий и распознавания образов для обучения алгоритма опорных векторов, позволяющего классифицировать БПЛА на фоне шума, используется частотный анализ на основе преобразования Фурье.

Примером разработок является Acoustic Drone Detector Squarehead Technology. Датчик Discovair CUAS/C-UAS обнаруживает и отслеживает (до 65 дБ на расстоянии до 500 м) беспилотники I и II класса (к первому классу беспилотников относятся БПЛА гражданско-бытового назначения, например, DJI Phantom, DJ Mavic и DJ Matrice; второй класс — специализированные БПЛА, которые разрабатываются и поставляются в интересах специальных государственных служб и ведомств; к этому классу относится, например, мультикоптер R.A.L. X6T) с помощью передовых алгоритмов машинного обучения.

Каждый датчик имеет угол обзора в 105 градусов, отслеживая акустические изменения в сети постоянно контролируемых секторов. Несколько датчиков могут быть объединены вместе для покрытия горизонта в 360 градусов. Любое изменение звука в акустическом секторе запускает акустические лучи высокого разрешения, которые собирают звук этого изменения. Затем система анализирует эту информацию и классифицирует БПЛА. Обученная модель позволяет определять по звуку, является ли летательный аппарат вертолетного типа или самолетного. Для работы в автономном режиме и получения данных с датчика и их дальнейшей визуализации необходимо любое устройство с дисплеем и

поддержкой браузера. При обнаружении БПЛА сигнал тревоги вместе с точным направлением на цель передается на экран оператора или в систему, подключенную к API.

Чувствительность датчиков акустических систем ограничена расстоянием до БПЛА и погодными условиями (ветром, дождем). Кроме того, производители БПЛА стремятся уменьшить уровень шума, создавая бесшумные двигатели и облегченные материалы конструкций, что снижает возможность акустического обнаружения некоторых классов БПЛА [12].

Электромагнитный метод обнаружения БПЛА

Основной принцип работы электромагнитного метода заключается в перехвате радиопередающих сигналов, GPS-позиционирования и сигналов связи БПЛА с оператором, что позволяет обнаружить и определить местоположение объекта. К дополнительным особенностям метода можно также отнести возможность подавлять каналы управления и осуществлять захват контроля над вражеским БПЛА.

Выделяют две основные категории оборудования, работающего с применением электромагнитного метода: пеленгаторы и декодеры радиочастотных сигналов. Пеленгаторы имеют антенны и внутренние датчики для обнаружения сигнала управления или канала передачи данных. Обычно для обнаружения одного БПЛА требуется сеть из минимум трех пеленгаторов. Декодеры радиочастотных сигналов извлекают информацию о БПЛА непосредственно из данных его системы, а не из его радиочастотных излучений. Они также бывают двух видов. Первые представляют собой запатентованные системы, которые производители БПЛА разрабатывают исключительно для работы с их собственными моделями. Например, декодеры RF DJI Aeroscope обнаруживают сигналы управления от любого БПЛА DJI (рис. 2). При этом радиус действия мобильной системы составляет 3–5 км, а стационарной версии возрастает до 30–35 км [13].

Второй тип декодера RF не ограничивается определенными марками и моделями. Вместо этого они используют обратную разработку для взлома шифрования на канале передачи данных, который соединяет БПЛА с его центром управ-

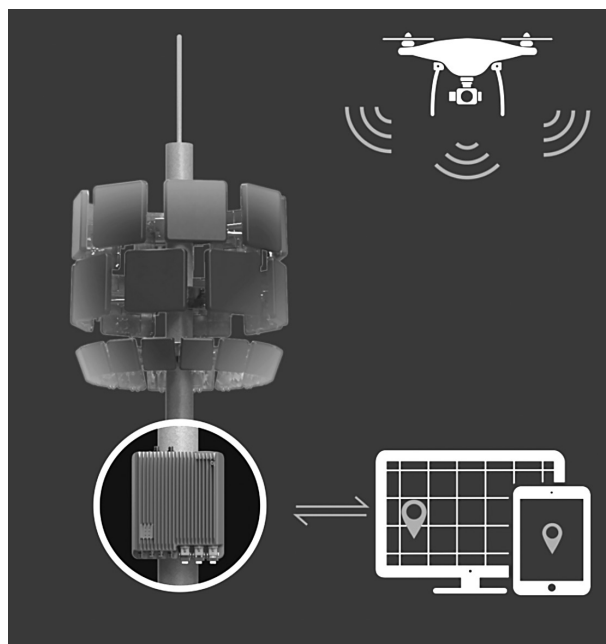


Рис. 2. Работа декодера радиочастотных сигналов

ления. Отдельные декодеры сигналов обеспечивают лучшее покрытие, чем пеленгаторы, а это значит, что нет необходимости разворачивать их как часть массива для точного обнаружения активности БПЛА.

Примером систем, основанных на электромагнитном методе, могут служить лидирующие на рынке радиочастотные датчики Dedrone Sensors. Они могут по радиосигналу обнаружить БПЛА, выявить его местоположение, а также определить производителя и/или модель. Например, версия RF-560 способна определять БПЛА на расстоянии до 10 км при работе на частотах 2,4 ГГц, 5,2 ГГц и 5,5 ГГц [14].

Еще один пример — анализатор спектра реального времени SM200C от Signal Hound, работающий с широким диапазоном частот от 100 кГц до 20 ГГц, мгновенной полосой пропускания 160 МГц, скоростью развертки в терагерцовом диапазоне, оптоволоконным интерфейсом и встроенным GPS [15]. Устройство улавливает радиочастоты БПЛА (2,4 ГГц, 5,2 ГГц, 900 МГц, 433 МГц) и позволяет определить его местоположение. Стоит отметить, что при использовании нескольких анализаторов можно триангулировать сигнал и обнаружить местоположение как БПЛА, так и оператора практически одновременно. Рабочая дальность SM200C составляет примерно 2–3 км.

Хотя метод на основе радиочастот считается высокоэффективным для обнаружения БПЛА, существуют некоторые проблемы с использованием этого подхода. Одна из них заключается в том, что чем более загружен спектр, тем сложнее идентифицировать интересующие сигналы. Избирательность приемника является ключевым свойством при анализе переполненного спектра [16].

Для комплексного рассмотрения преимуществ и недостатков каждого метода, они были сведены в табл. 2.

Анализ методов обнаружения показал, что применять методы по отдельности нецелесо-

образно, требуется разрабатывать и использовать комплексные решения. Именно по этой причине большинство современных систем представляют собой интегрированные комплексы, объединяющие несколько методик одновременно. Это позволяет компенсировать слабые стороны каждой отдельной технологии и значительно повысить общую надежность обнаружения. Комплексные системы обладают высокой степенью автоматизации и способностью быстро реагировать на потенциальные угрозы.

Примером успешной реализации комплексного подхода служит система защиты от БПЛА

Таблица 2

Преимущества и недостатки методов обнаружения БПЛА

Характеристика	Метод				
	радиолокационный	оптико-электронный	инфракрасный	акустический	электромагнитный
Определение координат цели с высокой точностью	+	–	–	–	+
Обнаружение в сложных погодных условиях	+	–	–	–	+
Может опознавать малоразмерные низколетящие БПЛА	–	+	+	–	+
Высокое разрешение получаемых изображений	не получает изображения	+	+	не получает изображения	не получает изображения
Дальность действия	высокая	средняя	средняя	низкая	высокая
Нагрузка на вычислительное оборудование	–	–	+	–	–
Идентификация отдельных БПЛА	–	+	+	–	+
Простота эксплуатации	–	+	+	+	+
Возможность блокировки канала управления	–	–	–	–	+
Уязвимость перед шифрованными каналами связи	–	–	–	–	+
Необходимость интеграции с другими системами для полной надежности	–	–	–	–	+

Anti-UAV Defence System (AUDS) [17], разработанная тремя британскими компаниями. Она объединяет в себе метод радиолокационного электронного сканирования, электронно-оптического сопровождения/классификации и направленного подавления радиочастот. AUDS способна дистанционно обнаруживать небольшие БПЛА, а затем отслеживать и классифицировать их, после чего непосредственно в системе предусмотрено устройство их уничтожения.

Команда AUDS объединяет три британские компании, обладающие возможностями для создания эффективной системы противодействия БПЛА. Радары серии Blighter A400 (рис. 3), способны обнаруживать небольшие БПЛА в любых погодных условиях. Развертываемая система и видеотрекер ЕО от Chess Dynamics Hawkeye, оснащены цветной камерой дальнего действия и высокочувствительным тепловизором, а также современной технологией видеослежения. В сочетании с информацией с радара о цели они способны отслеживать и классифицировать ее. При необходимости оператор по запросу может использовать интеллектуальный радиочастотный ингибитор Enterprise Control Systems для подавления определенных каналов управления БПЛА и, тем самым, вывести его из строя.

Другой пример: китайская система обнаружения и отслеживания дронов на основе комбинированных акустических и оптических подходов разработки [18]. Разработчики предлагают мультимодальную систему для задач обнаружения небольших БПЛА, которая объединяет в своей конструкции микрофонную решетку, камеру и лидар и применяет стратегию локализации от грубой к точной. Стратегия «от грубой к точной» заключается в том, что как только БПЛА попадает в зону досягаемости, излучаемый акустический шумовой сигнал улавливается микрофонной решеткой. С помощью предлагаемого алгоритма локализации источника звука, определяется приблизительное местоположение цели. Одновременно с этим карданный подвес устройства обнаружения поворачивается в предполагаемом направлении БПЛА, чтобы разместить оптический датчик, который определяет точное положение дрона. Данное решение обеспечивает полное полусферическое поле зрения, диапазон обнаружения более 500 м (для БПЛА взлетной массой от 1 до 6 кг и уровнем шума до

60 дБ на расстоянии 10 м) и погрешность трехмерного позиционирования менее 1,5 %.

Для акустического компонента мультимодальной системы разработчики используют шумоподавляющую модель глубокого обучения, которая эффективно извлекает акустические характеристики БПЛА из фоновых шумов. Микрофонная решетка имеет в своем составе 256 микрофонных элементов. Оптимизированная компоновка микрофонов позволяет увеличить расстояние обнаружения моделей БПЛА, описанных выше, до 1300 м.

Еще одна комплексная система — Anti Drone от Zen Technologies [19]. Она предназначена для обнаружения, классификации и отслеживания дронов (от малогабаритных, таких как DJI Mavic, до мульти роторных и самолетного типа, например, Bayraktar TB2) с помощью пассивного наблюдения, датчиков камер и нейтрализации путем воздействия на каналы связи БПЛА. Система имеет многосенсорную архитектуру, включающую: детектор на основе радиочастот, модуль видеоидентификации и отслеживания, радар, модуль сбора данных и управления, радиочастотный глушитель.

Детектор на основе радиочастот обнаруживает БПЛА по каналу связи между устройством и наземным центром управления. На основе идентифицированного сигнала система оценивает направление БПЛА. Сервопривод, отвечающий за поворот камер, получает команду на позиционирование в определенном направлении. После позиционирования система захватывает



Рис. 3. Радары серии Blighter A400

изображение БПЛА на расстоянии до 3 км. Видеопотоки передаются в программный модуль, а алгоритмы обработки видео в программном обеспечении автоматически подтверждают присутствие БПЛА и поддерживают отслеживание.

Определение точного местоположения БПЛА осуществляет радар, который предоставляет данные как по азимуту, так и по высоте. Далее информация передается в модуль сбора данных. Пользовательский интерфейс представляет полную картину ситуации угрозы: в нем отображается список обнаруженных сигналов и параметров, таких как частота и тип БПЛА и т.д. Далее при необходимости с помощью радиочастотного глушителя отключается связь между БПЛА и центром его управления. Также система способна физически уничтожить БПЛА путем стрельбы или захватить его сеть.

Израильской компанией Miltech Rafael Advanced Defense Systems была разработана противовоздушная система для борьбы с БПЛА — Drone Dome [20]. В системе Drone Dome размещаются различные датчики, включая радар RPS-42 компании RADA Electronic Industries, систему визуализации CONTROP Precision Technologies и детекторы радиосигналов. В январе 2023 года разработчиком была представлена модернизированная версия системы защиты Drone Dome, в которую интегрирован датчик RFeye от CRFS, способный обнаруживать БПЛА FPV-типа на расстоянии свыше 3,5 км по целому ряду векторов угроз и в широком (70 МГц–6 ГГц) рабочем диапазоне. Система устанавливается на земле, автомобиле или на корабле. При обнаружении БПЛА система может прервать связь БПЛА с центром или физически уничтожить его с помощью лазера.

Канадская компания Infiniti Electro-Optics разработала 2 вида комплексных систем, направленных на выявление и уничтожение БПЛА.

Первая система — Mobile Anti-Drone/UAV Elimination (MADE) [21] — это портативная система (выглядит как винтовка для легкой транспортировки, развертывания и нацеливания), использующая направленные высокоинтенсивные радиочастотные волны для блокировки ручного и автоматизированного управления БПЛА с расстояния 1–2 км.

Вторая разработка — Automatic Drone Defense System (ADDS) — дальнобойная автома-

тическая система, которая обеспечивает обнаружение небольших БПЛА, таких как DJI Phantom, с расстояния до 5 км. ADDS обеспечивает панорамное покрытие на 360 градусов без слепых зон и возможность визуально отслеживать, распознавать и уничтожать БПЛА с расстояния до 2 км. Система состоит из радара, инфракрасной системы дневного/ночного наблюдения PTZ и широкополосного радиочастотного глушителя.

Выводы

Анализ современных методов обнаружения БПЛА демонстрирует многообразие подходов к защите от угроз, исходящих от БПЛА. Каждый из рассмотренных методов обладает своими преимуществами и недостатками, что делает необходимым создание комбинированных систем, интегрирующих разные способы обнаружения и, в некоторых случаях, противодействия стремительно развивающимся технологиям БПЛА.

Эффективность комплексной защиты повышается за счет объединения результатов радиолокационного слежения, визуальной верификации посредством камер и тепловой съемки, анализа радиоэфирных частот и активного акустического сканирования территории.

Дальнейшие направления совершенствования включают улучшение и оптимизацию интеллектуальных алгоритмов анализа многомерных данных, повышение разрешающей способности сенсоров и снижение стоимости компонентов. Совершенствование элементной базы позволит создавать новые компактные, мобильные устройства, пригодные для быстрого развертывания и длительного функционирования в любых климатических зонах.

Список источников

1. Сильников М.В., Гук И.В. Приближенный метод решения смешанной игровой задачи с разнотипными средствами нападения и защиты // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2024. № 9–10 (195–196). С. 3–8.
2. Сильников М.В., Лазоркин В.И., Гук И.В. О целесообразности возложения задач активной защиты авиационных комплексов на беспилотные летательные аппараты сопровождения тяже-

лого класса // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2024. № 3 (133). С. 41–45.

3. Пищин О.Н., Кабделова М.М. Исследование возможностей современных радиолокационных систем. [Электронный ресурс]. – URL: <https://moluch.ru/archive/396/87674> (дата обращения: 22.09.2025).

4. Сайт компании Karneev Systems. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.karneev.com/product/radiolokatsionnye-stantsii/spayder-antidron/> (дата обращения: 22.09.2025).

5. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. СПб.: Научные технологии, 2020. 204 с.

6. Везарко Д.А., Чечельницкий А.С., Коптев В.А. Анализ радиолокационных систем обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. Вып. 3–2 (90). 158 с.

7. Ганин С.М., Карпенко А.В. Современные самоходные зенитные установки. СПб.: Бастин, 1999. 52 с.

8. Rousell J., Tafur Monroy I.: Detecting small drones using radio frequency signatures // IEEE Access. 2019, Jan. Vol. 7. Pp. 1844–1855.

9. Leahy M.P., Zhang Y., Chen Z. Multispectral imaging for detection and classification of micro-UAVs in urban environments // Optics Express. 2016, Nov. 24. No 22. Pp. 124–136.

10. Datasheet FLIR Boson® Thermal Imaging Core [Электронный ресурс]. URL: https://www.elimec.co.il/_Uploads/dbsAttachedFiles/Boson.pdf (дата обращения: 08.07.2025).

11. Spynel-X [Электронный ресурс]. URL: https://hgh-infrared.com/wp-content/uploads/2021/03/Leaflet_Spynel-X_land_HGH_EN_ak1.pdf (дата обращения: 08.07.2025).

12. Tan X., Wang L.: Sound-based drone detection and localization. Vol. 19. No. 16. Aug. 2009. 16 p.

13. Станция по обнаружению дронов DJI Aeroscope [Электронный ресурс]. URL: <https://coptermarket.by/dji-shop/drones/promyshlennye-kvadrokoptery/stationary-aeroscope> (дата обращения: 08.07.2025).

14. Radio frequency DRONE Detection [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dedrone.com/products/drone-detection/rf-sensors/overview> (дата обращения: 08.07.2025).

15. SM200C [Электронный ресурс]. URL: <https://signalhound.com/sigdownloads/datasheets/Signal-Hound-SM200C-Data-Sheet.pdf> (дата обращения: 22.09.2025).

16. Buhariwala H.K., Ramakrishnan V.S.: Design of low-cost RF-based UAV detector // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2019, Feb. Vol. 55. No 1. 12 p.

17. AUDS Anti-UAV Defence System [Электронный ресурс]. URL: <https://www.blighter.com/products/auds-anti-uav-defence-system/> (дата обращения: 08.07.2025).

18. Drone Detection and Tracking System Based on Fused Acoustical and Optical Approaches [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/373162073_Drone_Detection_and_Tracking_System_Based_on_Fused_Acoustical_and_Optical_Approaches (дата обращения: 08.07.2025).

19. Anti Drone System (CUAS) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.zentechnologies.com/anti-drone-system-counter-drone-cuas.php> (дата обращения: 08.07.2025).

20. RAFAEL Advanced Defense Systems Ltd. Drone Dome [Электронный ресурс]. URL: <https://rafael-uk.com/wp-content/uploads/2022/10/Drone-Dome.pdf> (дата обращения: 23.09.2025).

21. CUAS/Anti-Drone Air Defense Solutions [Электронный ресурс]. URL: <https://www.infiniioptics.com/solutions/air-domain-defense/cuasair-defense> (дата обращения: 08.07.2025).

References

1. Sil'nikov M.V., Guk I.V. Method for solving a mixed game problem with different types of attack and defense // Questions of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2024. No 9–10 (195–196). Pp. 3–8.

2. Sil'nikov M.V., Lazorkin V.I., Guk I.V. On the expediency of assigning the tasks of active protection of aviation systems to heavy-class unmanned aerial vehicles // Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. 2024. No 3 (133). Pp. 41–45.

3. Pishchin O.N., Kadelova M.M. Exploring the capabilities of modern radar systems. [Electronic resource]. URL: <https://moluch.ru/archive/396/87674> (date of reference: 22.09.2025).

4. Karneev Systems official website. [Electronic resource]. URL: <https://www.karneev.com/product/radiolokatsionnye-stantsii/spayder-antidron/> (date of reference: 22.09.2025).
5. Makarenko S.I. Countering unmanned aerial vehicles: monografiya. SPb.: High-tech technologies, 2020. 204 p.
6. Vezarko D.A., Chechel'nitskii A.S., Kop-
tev V.A. Analysis of radar systems for detecting small unmanned aerial vehicles // International journal of humanities and natural sciences. 2024. Vol. 3–2 (90). 158 p.
7. Ganin S.M., Karpenko A.V. Modern self-propelled anti-aircraft guns. SPb.: Bastion, 1999. 52 p.
8. Rousell J., Tafur Monroy I. Detecting small drones using radio frequency signatures // IEEE Access, Jan. 2019. Vol. 7. Pp. 1844–1855.
9. Leahy M.P., Zhang Y., Chen Z.: Multispectral imaging for detection and classification of micro-UAVs in urban environments // Optics Express, Nov. 2016. Vol. 24. No 22. Pp. 124–136.
10. Datasheet FLIR Boson® Thermal Imaging Core [Electronic resource]. URL: https://www.elimec.co.il/_Uploads/dbsAttachedFiles/Boson.pdf (date of reference: 08.07.2025).
11. Spynel-X [Electronic resource]. URL: https://hgh-infrared.com/wp-content/uploads/2021/03/Leaflet_Spynel-X_land_HGH_EN_ak1.pdf (date of reference: 08.07.2025).
12. Tan X., Wang L. Sound-based drone detection and localization. Aug. 2009. Vol.19. No 16. 16 p.
13. Stantsiya po obnaruzheniyu dronov DJI Aeroscope (DJI Aeroscope drone detection station) [Electronic resource]. URL: <https://coptermarket.by/dji-shop/drones/promyshlennyye-kvadrokoptery/stationary-aeroscope> (date of reference: 08.07.2025).
14. Radio frequency DRONE Detection [Electronic resource]. URL: <https://www.dedrone.com/products/drone-detection/rf-sensors/overview> (date of reference: 08.07.2025).
15. SM200C [Electronic resource]. URL: <https://signalhound.com/sigdownloads/datasheets/Signal-Hound-SM200C-Data-Sheet.pdf> (date of reference: 22.09.2025).
16. Buhariwala H.K., Ramakrishnan V.S. Design of low-cost RF-based UAV detector // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Feb. 2019. Vol. 55. No 1. 12 p.
17. AUDS Anti-UAV Defence System [Electronic resource]. URL: <https://www.blighter.com/products/auds-anti-uav-defence-system/> (date of reference: 08.07.2025).
18. Drone Detection and Tracking System Based on Fused Acoustical and Optical Approaches [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/373162073_Drone_Detection_and_Tracking_System_Based_on_Fused_Acoustical_and_Optical_Approaches (date of reference: 08.07.2025).
19. Anti-Drone System (CUAS) [Electronic resource]. URL: <https://www.zentechnologies.com/anti-drone-system-counter-drone-cuas.php> (date of reference: 08.07.2025).
20. RAFAEL Advanced Defense Systems Ltd. Drone Dome [Electronic resource]. URL: <https://rafael-uk.com/wp-content/uploads/2022/10/Drone-Dome.pdf> (date of reference: 23.09.2025).
21. CUAS/Anti-Drone Air Defense Solutions [Electronic resource]. URL: <https://www.infiniioptics.com/solutions/air-domain-defense/cuasair-defense> (date of reference: 08.07.2025).

УДК 621.1

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_53

**К ВОПРОСУ О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ
МОНИТОРИНГА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОДЗЕМНЫХ СПЕЦИАЛЬНЫХ
ФОРТИФИКАЦИОННЫХ СООРУЖЕНИЙ**

**ON THE ADVISABILITY OF USING MONITORING SYSTEMS TO CONTROL
THE TECHNICAL CONDITION OF UNDERGROUND SPECIAL FORTIFICATION
STRUCTURES**

Д-р техн. наук Н.Н. Гусев, канд. техн. наук С.А. Мачнев, Д.А. Эльцофон

D.Sc. N.N. Gusev, Ph.D. S.A. Machnev, D.A. Eltsofon

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

Статья посвящена целесообразности применения систем автоматизированного мониторинга для контроля технического состояния строительных (защитных) конструкций подземных специальных фортификационных сооружений (СФС). В работе определена роль достоверности и оперативности получения данных о техническом состоянии строительных конструкций подземных СФС. Сформулирована зависимость степени разрушения конструкций подземных фортификационных сооружений как функции изменения нагрузки и деформации. Установлена функциональная взаимосвязь основных параметров СФС от величины деформации их защитных конструкций. Предложен новый подход по оперативному сбору информации об изменении величины нагрузки и деформации защитных конструкций подземных СФС.

Ключевые слова: специальные фортификационные сооружения, подземные фортификационные сооружения, живучесть, степень защиты, струнный датчик, степень разрушения (повреждения) конструкций.

The article is devoted to the expediency of using automated monitoring systems to control the technical condition of construction (protective) structures of underground special fortifications (SF). The paper defines the role of reliability and timeliness of obtaining data on the technical condition of underground SF. The dependence of the degree of destruction of underground fortification structures as a function of load and deformation changes is formulated. A functional relationship between the main parameters of the SF and the magnitude of deformation of their protective structures has been established. A new approach is proposed for the rapid collection of information on changes in the load (pressure) and deformation of protective structures of underground SF.

Keywords: special fortifications, underground fortifications, survivability, degree of protection, string sensor, degree of destruction (damage) of structures.

Введение

Подземное строительство сооружений специального назначения — важное направле-

ние деятельности человека, которое заключается в освоении и использовании подземного пространства — сложной и часто не предсказуемой в своем поведении среды. Особое место

подземное строительство занимает в военном деле, так как развитие средств поражения, рост их разрушительной мощи, точности и количества привели к тому, что для обеспечения наибольшей защиты от воздействия их поражающих факторов специальные фортификационные сооружения (СФС) и специальные объекты (СО) в подавляющем большинстве случаев располагаются под защитной толщей земли. Современный опыт эксплуатации показывает: с одной стороны, перспективность дальнейшего развития подземного строительства защитных объектов как практически безальтернативного способа защиты личного состава, вооружения, техники, оборудования от поражающих факторов современных и перспективных средств поражения, а с другой — несовершенство методов и методик данной отрасли науки, обеспечивающих в том числе:

– накопление достоверной информации о работе защитных конструкций подземных СФС и СО как в повседневном режиме эксплуатации, так и при действии особых нагрузок и воздействий;

– оперативное определение категории технического состояния строительных конструкций подземных СФС и СО, и своевременное проведение комплекса мероприятий по поддержанию и восстановлению их работоспособности;

– достоверное прогнозирование дальнейшего изменения технического состояния защитных конструкций и степени защиты подземных специальных фортификационных сооружений ПСФС, позволяющее перейти от реактивного (аварийного) и профилактического (планово-предупредительного) подхода в эксплуатации объекта к предиктивному (предсказательному);

– успешное проведение мероприятий по борьбе за живучесть подземных СФС и СО при авариях и особых нагрузках и воздействиях.

В статье проведен анализ указанных выше проблем и выработаны рекомендации по их устранению.

Анализ проблемной ситуации и постановка задач

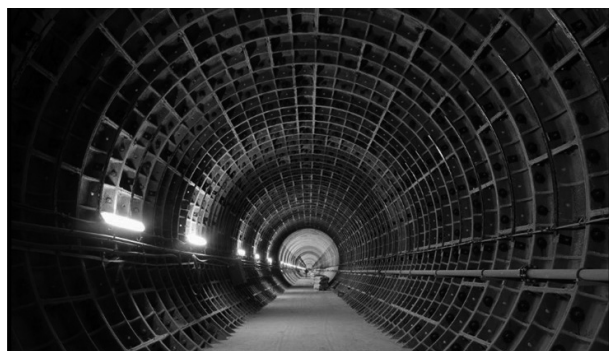
При возведении обделки подземных защитных сооружений применяются металлические или железобетонные тубинги (рис. 1).

Характерной чертой подземных СФС и СО является их применение в двух режимах эксплуатации, отличающихся характером задачи и методами их решения:

- 1) повседневный режим эксплуатации;
- 2) эксплуатация в условиях действия особых нагрузок и воздействий.

В первом случае эксплуатация осуществляется в мирное время и в военное до появления угрозы применения противником оружия по объекту. Данный режим характеризуется большой продолжительностью и определенностью по характеру и объему выполняемых работ.

Второй случай СФС и СО возникает при возникновении угрозы применения противником средств поражения, продолжается при непосредственном воздействии противника и после него, до окончания ликвидации последствий воздействия. Данный режим осуществляется в относительно короткие сроки, носит случайный, неопределенный характер по времени, объемам и видам выполняемых работ в условиях ограниченных материально-технических ресурсов.



а



б

Рис. 1. Тубинговая обделка ПСФС: а — металлическая; б — железобетонная

Ключевым в данной формулировке являются «короткие сроки» на выполнение «неопределенного объема работ» по ликвидации последствий воздействия. Особенно остро данный вопрос встает при возможности повторного (многократного) удара по объекту, что в случае отсутствия оперативной и достоверной информации о ключевых параметрах технического состояния сооружения неизбежно приведет к катастрофическим последствиям с большими людскими и материальными потерями.

Важно учитывать, что любому виду воздействия на СФС и СО будет предшествовать многолетний режим повседневной эксплуатации. Даже в мирное время строительные конструкции подземных СФС подвергаются разрушающим воздействиям различной природы: действию «горного давления», воды, агрессивных сред, бактерий [2], тектонических разломов [3], перепадов температур, вибраций от работы внутреннего оборудования, сейсмических явлений (как тектонических, так и техногенных) и т.д. Также немало важным является учет неправильной эксплуатации строительных конструкций, возможной в связи с совокупностью целого ряда факторов: старение, выход из строя и несвоевременная замена инженерного оборудования, поддерживающего нормальный внутренний климат (система вентиляции, обогрева, дренажа и т.д.), недостаточная численность и квалификация личного состава, несущего службу на СФС и др. В условиях же действия особых нагрузок на защиту технологического комплекса, технических систем и личного состава осуществляют, в первую очередь, именно строительные конструкции, к которым, исходя из выше изложенного, должны предъявляться особые требования при проектировании, расчете и эксплуатации.

Проектирование и расчет СФС, в части касающейся строительных конструкций, осуществляется в рамках выполнения трех групп требований [7]:

- тактико-технических (ТТТ);
- эксплуатационно-технологических (ЭТТ);
- общестроительных (ОТ),

которые включают в себя требования по обеспечению:

живучести (вероятности функционирования) СФС в целом;

восстановления боеспособности функционирования СФС после воздействия средств по-

ражения противника или воздействия техногенных и природных поражающих факторов в мирное время;

технико-экономической и военно-экономической эффективности создания, эксплуатации, боевого применения, реконструкции и восстановления боевой способности (после воздействия поражающих факторов средств поражения, техногенных аварий и стихийных бедствий) СФС;

норм и правил эксплуатации строительных конструкций, соответствующих функционально-технологическому процессу эксплуатации СФС;

ремонтпригодности и ремонтвосстанавливаемости строительных конструкций;

восстановления эксплуатационной пригодности строительных конструкций путем планового текущего ремонта в процессе эксплуатации СФС;

капитальности и долговечности строительных конструкций.

Одним из фундаментальных понятий, которое содержится в приведенном выше перечне требований, является «живучесть» СФС. Под «живучестью» понимается вероятностная мера сохранения способности выполнения СФС функциональной задачи после расчетного воздействия средств поражения противника или поражающих факторов техногенных аварий и природных стихийных бедствий с учетом восстановления боевой способности [4]. При этом в первую очередь [1] она определяется прочностью строительных конструкций, которые в условиях действия особых нагрузок и воздействий выполняют основную задачу по обеспечению живучести СФС.

Все вышеизложенное подтверждает необходимость более глубокого исследования вопроса в области предоставления оперативной и достоверной информации о текущем техническом состоянии строительных конструкций подземных фортификационных сооружений, ее последующей обработке и анализу, и идентификации проблемных мест. При этом главной сложностью контроля их технического состояния является отсутствие возможности обеспечить к ним внешний доступ с целью проведения обследования (мониторинга). Это накладывает серьезные ограничения на число параметров, доступ-

ных для измерения. В условиях же действия особых нагрузок и воздействий немаловажным фактором также станет время, затрачиваемое на определение этих параметров, обработку полученных данных и принятие решения на организацию ремонтно-восстановительных (или аварийно-спасательных) работ, особенно в случаях многократного поражения объекта. Это определяет постановку двух основных вопросов.

1. Какие именно параметры состояния строительных конструкций требуется контролировать?

2. Какой метод контроля параметров состояния строительных конструкций обеспечит наибольшую эффективность?

Установление необходимых параметров контроля

Выделяют два возможных варианта воздействия на СФС: расчетное и сверхрасчетное. Соответственно, последствия воздействия также будут зависеть от его уровня. При расчетном воздействии поведение конструкций СФС, их напряженно-деформированное состояние носит прогнозируемый и предсказуемый характер, и, как правило, не приводит к снижению боевой готовности.

Иначе обстоят дела при сверхрасчетном воздействии. При превышении воздействия расчетных значений конструкции СФС получают повреждения, приводящие к разрушениям, снижению или полной потери их боевой готовности, и требуют проведения соответствующего объема аварийно-восстановительных работ (АВР).

Степень разрушения (слабая, средняя, сильная) конструкций подземных фортификационных сооружений может быть установлена путем сопоставления фактической величины избыточного давления приходящей сейсмозрывной волны $\Delta p_{свв}$ с фактической степенью защиты СФС $\Delta p_{сз}$ [1]:

– сильная степень разрушения

$$\Delta p_{свв} > 1,5 \Delta p_{сз};$$

– средняя степень разрушения

$$\Delta p_{свв} > 1,15 \dots 1,35 \Delta p_{сз};$$

– слабая степень разрушения

$$\Delta p_{свв} < 1,15 \Delta p_{сз}.$$

Взаимосвязь степени повреждения и категории технического состояния строительных конструкций СФС [1] приведены в таблице.

Таким образом, исходя из сведений, приведенных в зависимостях (1) и в таблице, ключевыми параметрами определения категории технического состояния строительных конструкций подземных фортификационных сооружений, степени их повреждения (разрушения) и снижения несущей способности (от расчетной) являются приходящее на них давление и величина их деформации. При этом в зависимостях (1) следует учитывать следующее.

В соответствии с [7] срок эксплуатации подземных СФС может достигать 100 лет и более. В течение указанного срока геотехническая обстановка в районе дислокации объекта может претерпевать значительные изменения, что, в свою очередь, будет приводить к отклонению значения величины горного давления, действующего на подземное сооружение, от расчетного. Как следствие, это приведет к снижению проектной степени защиты на величину изменения значения горного давления $\Delta p_{гор}$.

В связи с длительными сроками эксплуатации неизбежно будут происходить деструктивные процессы влияния агрессивных компонентов окружающей среды на все элементы (в том числе обделку) подземного СФС (рис. 2), следствием чего станет снижение допустимой нагрузки на нее.

При многократных воздействиях возможно накопление ущерба и, соответственно, снижение степени защиты СФС.

Анализ аналитических методов оценки параметров СФС

При проектировании защитных конструкций подземных фортификационных сооружений закладывается предельное состояние их работы по деформации в виде параметра $K_{пр.с}$ [5], который характеризует собой отношение реальных деформаций защитных конструкций ε к упругим деформациям $\varepsilon_{упр}$:

$$K_{пр.с} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{упр}}, \quad (2)$$

Таблица 1

**Взаимосвязь степени повреждения
и категории технического состояния строительных конструкций СФС**

Степень повреждения (разрушения)	Снижение несущей способности от расчетной, %	Характерные признаки повреждений (разрушений) строительных конструкций и их элементов	Категория технического состояния, необходимые меры по обеспечению функционирования
I	0÷10	Работа конструкций в упругой стадии	Исправное
II	10÷40	Работа конструкций за пределом упругости	Работоспособное. Необходимы аварийно-восстановительные работы
III	40÷70	Прогибы превышают предельно допустимые. Вывалы бетона из конструкций. Разгерметизация СФС	Ограниченно работоспособное. Необходимы аварийно-восстановительные работы в больших объемах
IV	70÷90	Полная потеря несущей способности отдельных конструкций и их обрушение	Недопустимое
V	90÷100	Конструкции СФС в основном разрушены	Полностью выведено из строя

Примечание: I — отсутствие повреждений; II — слабая; III — средняя; IV — сильная; V — полное разрушение



Рис. 2. Результат действия различных агрессивных компонентов окружающей среды на элементы подземных сооружений

Количественные значения показателя предельного состояния $K_{пр.с}$ нормируются с учетом степени разрушения (поражения) объекта следующим образом [5]:

- непоражение (упругая деформация защитных конструкций): $K_{пр.с} \leq 1$;
- слабая степень поражения (незначительная упруго-пластическая деформация, появляются микротрещины в бетоне железобетонных защитных конструкций в растянутой зоне): $1 < K_{пр.с} \leq 2$;
- средняя степень поражения (существенная упруго-пластическая деформация, возникают микротрещины в бетоне железобетонных защитных конструкций в растянутой и сжатой зонах):

$$2 < K_{пр.с} \leq 4 ;$$

- сильная степень поражения (предельная упруго-пластическая деформация, возникает расслоение бетона в растянутой зоне в железобетонных защитных конструкциях):

$$4 < K_{пр.с} \leq 5 .$$

Аналитические методы оценки живучести объектов (целей) при воздействии средств поражения приведены в [5].

Рассмотрим случай поражения точечной цели и кратности поражения n . Для данного случая имеем следующие зависимости:

$$Q_i = e^{-\alpha_i} ; \quad (3)$$

$$P_i = 1 - Q_i = 1 - e^{-\alpha_i}; \quad (4)$$

$$Q = \prod_{i=1}^n Q_i = e^{-\sum_{i=1}^n \alpha_i};$$

$$P = 1 - Q = 1 - e^{-\sum_{i=1}^n \alpha_i},$$

где P_i и Q_i — соответственно вероятность поражения и живучести объекта (цели) при i -м воздействии средств поражения;

α_i — уязвимость цели при i -м воздействии средств поражения:

$$\alpha_i = \left(\rho \frac{R_{\Pi(i)}}{E} \right)^2, \quad (5)$$

где $R_{\Pi(i)}$ — радиус поражения при i -м воздействии средств поражения, м:

$$R_{\Pi(i)} = q_i^{\frac{1}{3}} \left(\frac{A}{\Delta p_{\text{сз}(i)}} \right)^{\frac{1}{v}}, \quad (6)$$

$\Delta p_{\text{сз}(i)}$ — степень защиты цели при i -м воздействии средств поражения, кгс/см²;

A, v — постоянные, определяемые следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{A}{v} = \frac{5040}{2,71} & \text{при } 0,5 \leq \Delta p_{\text{сз}} \leq 3000 \text{ кгс/см}^2; \\ \frac{A}{v} = \frac{216}{1,61} & \text{при } 0,01 \leq \Delta p_{\text{сз}} \leq 0,5 \text{ кгс/см}^2 \end{cases},$$

E — круговое вероятное отклонение (КВО) средства поражения;

ρ — постоянная функции Лапласа нормального закона распределения, ($\rho \approx 0,4679$);

q_i — мощность взрыва i -го средства поражения в тротиловом эквиваленте, тс.

Степень защиты при i -м воздействии средства поражения может быть определена следующим образом:

$$\Delta p_{\text{сз}(i)} = \Delta p_{\text{сз}(1)} e^{-\beta_{\text{сз}}(i-1)}, \quad (7)$$

где $\Delta p_{\text{сз}(1)}$ — степень защиты цели, определяемая для первого воздействия средства поражения (проектная или фактическая с учетом реального технического состояния), кгс/см²;

$\beta_{\text{сз}}$ — интенсивность изменения защищенности цели.

При заданной в проекте (или принимаемой исходя из реальных условий) кратности воздействия средств поражения $K_{\text{кр}}$ и определенного предельного состояния $K_{\text{пр.с}}$ получаем:

$$\beta_{\text{сз}} = \frac{1}{K_{\text{кр}}} \ln(K_{\text{пр.с}}), \quad (8)$$

Подставляя формулу (8) в зависимость (7) и с учетом выражения (2) получаем аналитическую зависимость для определения степени защиты объекта при i -м воздействии средств поражения как функцию величины деформации защитных конструкций:

$$\Delta p_{\text{сз}(i)}(\varepsilon) = \frac{\Delta p_{\text{сз}(1)}}{\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{\text{упр}}} \cdot i^{\frac{v}{2}} \right)^{\frac{(i-1)}{K_{\text{кр}}}}}, \quad (9)$$

Используя полученную зависимость (9) в (6) и учитывая зависимости (3), (4) и (5) получаем значения живучести и вероятности поражения объекта (цели) при кратности поражения n :

$$Q = \exp \left[- \sum_{i=1}^n i \cdot \left(\frac{A \cdot \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{\text{упр}}} \cdot i^{\frac{v}{2}} \right)^{\frac{(i-1)}{K_{\text{кр}}}}}{\Delta p_{\text{сз}(1)}} \right)^{\frac{1}{v}} \frac{\rho \cdot q_i^{\frac{1}{3}}}{E} \right]^2, \quad (10)$$

$$P = 1 -$$

$$\exp \left[- \sum_{i=1}^n i \cdot \left(\frac{A \cdot \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{\text{упр}}} \cdot i^{\frac{v}{2}} \right)^{\frac{(i-1)}{K_{\text{кр}}}}}{\Delta p_{\text{сз}(1)}} \right)^{\frac{1}{v}} \frac{\rho \cdot q_i^{\frac{1}{3}}}{E} \right]^2. \quad (11)$$

Так же, если подставить результат выражения (9) в неравенство (1), то получим уточненное значение степени разрушения конструкций СФС при многократном их поражении.

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать следующий вывод: для достоверного определения технического состояния строительных конструкций, степени защиты и живучести подземных фортификационных

сооружений необходимо в первую очередь обладать информацией о приходящей на строительные конструкции нагрузке (давлении) и величине их деформации. В условиях же действия особых нагрузок и воздействий не мало важным фактором также является оперативность определения этих параметров, особенно в случаях многократного поражения объекта, когда борьба за живучесть СФС принимает наиболее критический характер и требует максимально оперативной и достоверной информации о техническом состоянии всех систем сооружения, в том числе строительных конструкций.

Методы и средства контроля параметров технического состояния

Под «борьбой за живучесть» специальных фортификационных сооружений, в том числе подземных защитных сооружений, понимается совокупность действий эксплуатационного персонала и персонала технологических систем (гарнизона сооружения), направленных на поддержание (восстановление) максимально возможной степени боеспособности сооружения при авариях и действии особых нагрузок и воздействий [1].

В частности, борьба за живучесть технических средств и СФС включает:

- обнаружение повреждений (аварий) и оповещение о них;
- ограничение (локализация) распространения повреждений (аварий);
- ликвидация повреждений (аварий);
- восстановление максимально возможной степени боеспособности СФС.

Рассмотреть все возможные сценарии воздействия средств поражения (мощность взрыва боеприпаса, их количество, точность попадания, интервал времени между воздействиями и т.д.), все ситуации, которые могут произойти после воздействия, учесть все факторы, влияющие на развитие событий в том, или ином направлении, невозможно. Вследствие этого, все аналитические расчеты параметров СФС носят лишь вероятностный характер, что сильно сказывается на достоверности информации о них.

Для получения объективных сведений о состоянии конструкций подземных фортификационных сооружений во всех режимах и на

протяжении всего срока их эксплуатации необходимо проводить их обследование и мониторинг.

В основе эксплуатации и обследовании специальных объектов и специальных фортификационных сооружений, в которые входят в том числе и подземные защитные сооружения, лежат следующие нормативные документы:

– Федеральный закон от 29 декабря 2004 года № 191-ФЗ (редакция, действующая с 01 февраля 2024 года) «Градостроительный кодекс Российской Федерации» [6];

– СП 255.1325800.2016. «Свод правил. Здания и сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения» [7];

– ГОСТ 31937–2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния [8];

– ГОСТ 32019–2012. Мониторинг технического состояния уникальных зданий и сооружений. Правила проектирования и установки стационарных систем (станций) мониторинга [9];

– Федеральный закон от 30 декабря 2009 года № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [10];

– ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения [11].

В соответствии с [6–11] мониторинг технического состояния СФС проводят для:

– контроля технического состояния СФС и своевременного принятия мер по устранению возникающих негативных факторов, ведущих к ухудшению этого состояния;

– выявления объектов, на которых произошли изменения напряженно-деформированного состояния несущих конструкций, и для которых необходимо обследование их технического состояния;

– обеспечения безопасного функционирования СФС за счет своевременного обнаружения на ранней стадии негативного изменения напряженно-деформированного состояния конструкций, грунтов оснований и вмещающего горного массива, которые могут повлечь переход объектов в ограниченно работоспособное или в аварийное состояние;

– отслеживания степени и скорости изменения технического состояния объекта и принятия в случае необходимости экстренных мер по предотвращению его обрушения.

При этом при выборе системы наблюдений учитывают цель проведения мониторинга, а также скорости протекания процессов и их изменение во времени, продолжительность измерений, ошибки измерений, в том числе за счет изменения состояния окружающей среды [2, 3], а также влияния помех, аномалий природно-техногенного характера (в режиме повседневной эксплуатации) и воздействия средств поражения противника.

Полученные зависимости в (1), (9), (10), (11) показывают, что обладая оперативной информацией о реальном значении величины нагрузки (давления) и деформации защитных конструкций СФС, можно в любой момент времени (в том числе в условиях действия особых нагрузок и воздействий) оценить изменение несущей способности, степени защиты и вероятности поражения и живучести объекта. С этой целью по мнению авторов целесообразно применение стационарной автоматизированной системы мониторинга контроля технического состояния защитных конструкций подземных фортификационных сооружений.

Традиционный состав системы мониторинга технического состояния строительных конструкций представлен на рис. 3.

При этом все элементы каждого комплекта автоматизированной системы мониторинга технического состояния строительных конструкций, включающего в себя первичные преобразо-

ватели (датчики), вторичную аппаратуру, кабельные сети, вычислительный центр и программный комплекс, должны быть сконструированы и адаптированы под реальные условия эксплуатации подземного фортификационного сооружения во всех режимах его эксплуатации.

Для контроля величины деформации защитных конструкций подземных фортификационных сооружений и приходящей на них нагрузки, исходя из реального опыта эксплуатации, целесообразно применение автоматизированной системы мониторинга на основе тензометрических (струнных) датчиков деформации. Струнные датчики, входящие в состав многих систем автоматизированного мониторинга, применяются для измерения различных параметров: давления, усилия, деформации, температуры и других неэлектрических величин (рис. 4).

К достоинствам струнных датчиков следует отнести [12]:

- простоту конструкции;
- надежность;
- стабильность показаний;
- невосприимчивость к электрическим помехам;
- устойчивость к влажной среде;
- способность передавать сигнал на большие расстояния без каких-либо искажений;
- удобство преобразования частотного сигнала в цифровой код.



Рис. 3. Общая схема системы мониторинга технического состояния строительных конструкций



Рис. 4. Струнные преобразователи неэлектрических величин: а — давления; б — деформации

Применение струнных датчиков для контроля нагрузки и деформации защитных конструкций подземных фортификационных сооружений в составе системы мониторинга позволит непрерывно и в автоматическом режиме осуществлять сбор информации об изменениях данных величин, а вычислительная аппаратура и специально разработанное программное обеспечение позволит не только предоставлять информацию о реальной степени защиты и живучести объекта, но будет способно прогнозировать их дальнейшее изменение.

В совокупности применение такой системы позволит существенно повысить успех проводимых мероприятий борьбы за живучесть СФС.

Выводы и рекомендации

В ходе проведенного авторами исследования установлено.

1. Одним из ключевых факторов, оказывающих влияние на степень защиты и живучесть ПСФС является состояние их защитных конструкций.

2. Для определения категории технического состояния, степени повреждения и изменения несущей способности защитных конструкций СФС необходимо владеть информацией о величине их реальной деформации и нагрузки (давления).

3. Степень разрушения конструкций ПСФС зависит от соотношения приходящей на них нагрузки (давления) и фактической степени защиты.

4. Фактическая степень защиты, живучесть и вероятность поражения ПСФС также функционально зависят от величины деформации их защитных конструкций.

5. Для осуществления непрерывного сбора информации об изменении величины нагрузки (давления) и деформации защитных конструкций ПСФС по мнению авторов целесообразно применение стационарной автоматизированной системы мониторинга на основе тензометрических (струнных) датчиков деформации.

6. Дальнейшей задачей исследования должно стать более детальное изучение применимости всех элементов, входящих в систему мониторинга (первичных преобразователей (датчиков), вторичной аппаратуры, кабельных сетей, вычислительных центров и программных комплексов),

их адаптации к реальным условиям эксплуатации ПСФС (для всех режимов их эксплуатации) или разработка специализированных средств, максимально адаптированных для решения задач по оценке технического состояния объектов данного типа, а также возможностей работы систем автоматизированного мониторинга в целях достижения успеха в борьбе за живучесть СФС.

Список источников

1. Лапшин Г.А., Короленок Л.М., Калущко М.М. Специальные сооружения и объекты. Ч. 1. Раздел. 1. Специальные объекты вооруженных сил и специальные фортификационные сооружения: учебник. СПб.: ВИ (ИТ) ВА МТО им. А.В. Хрулева, 2023. 144 с.

2. Гусев Н.Н., Алешичев С.Е., Эльцофон Д.А. К вопросу о необходимости учета влияния бактерий на несущую способность строительных конструкций и грунтовых оснований зданий и сооружений при их обследовании // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2024. № 6 (287). С.17–25.

3. Гусев Н.Н., Маслов В.О., Эльцофон Д.А. К вопросу о необходимости учета влияния тектонических разломов на несущую способность строительных конструкций и грунтовых оснований зданий и сооружений при их обследовании // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2025. № 1 (288). С. 17–25.

4. Сурин Д.В. Специальные фортификационные сооружения: учебник. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. 126 с.

5. Сурин Д.В. Аналитические методы оценки защищенности и живучести объектов и комплексов. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 1996. 145 с.

6. О введении в действие градостроительного кодекса Российской Федерации: федер. закон Рос. Федерации от 29 декабря 2004 г. № 191-ФЗ: Принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 24 декабря 2004 г. // Рос. Газ. – 2004. – 29 декабря.

7. СП 255.1325800.2016. Свод правил. Здания и сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения, 2017. 38 с.

8. ГОСТ 31937–2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: Российский институт стандартизации, 2024. 64 с.

9. ГОСТ 32019–2012. Мониторинг технического состояния уникальных зданий и сооружений. Правила проектирования и установки стационарных систем (станций) мониторинга. М.: Стандартинформ, 2014. 35 с.

10. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федер. Закон Рос. Федерации от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ: принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 23 декаб. 2009 г.: одобрен Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 25 декабря 2009 г. // Рос. Газ. – 2009. – 30 декабря.

11. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2015. 16 с.

12. Осадчий Е.П. Проектирование датчиков для измерения механических величин. М.: Машиностроение, 1979. 84 с.

References

1. Lapshin G.A., Korolenok L.M., Kalushko M.M. Special structures and facilities. Part 1. Section 1. Special facilities of the armed forces and special fortifications. Textbook. St. Petersburg: VI (IT) VA MTO named after A.V. Khrulev, 2023. 144 p.

2. Gusev N.N., Alyoshev S.E., Eltsofon D.A. On the need to take into account the influence of bacteria on the load-bearing capacity of building structures and soil foundations of buildings and structures during their inspection // Building materials, equipment, technologies of the 21st century. 2024. No 6 (287). Pp. 17–25.

3. Gusev N.N., Maslov V.O., Eltsofon D.A. On the need to take into account the influence of tectonic faults on the load-bearing capacity of building structures and soil foundations of buildings and structures during their inspection // Building Materials, Equipment, Technologies of the XXI Century. 2025. No 1 (288). Pp. 17–25.

4. Surin D.V. Special Fortification Structures. Textbook. St. Petersburg: Military Academy named after A.F. Mozhaisky, 2010.

5. Surin D.V. Analytical Methods for Assessing the Security and Survivability of Objects and Complexes. Ministry of Defense of the Russian Federation, 1996.

6. Federal Law No. 191-FZ of December 29, 2004 (version effective February 1, 2024) «Urban Planning Code of the Russian Federation».

7. SP 255.1325800.2016. «Set of rules. Buildings and structures. Operating rules. Basic provisions».

8. GOST 31937–2024 «Buildings and structures. Rules for inspection and monitoring of technical condition».

9. GOST 32019–2012 «Monitoring the technical condition of unique buildings and structures. Rules for the design and installation of stationary monitoring systems (stations)».

10. Federal Law No. 384-FZ of December 30, 2009 «Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures».

11. GOST 27751–2014 «Reliability of building structures and foundations. Basic provisions».

12. Osadchy E.P. Design of sensors for measuring mechanical quantities. Moscow: Mashinostroenie, 1979.

УДК 656.61.08

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_63

**РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО БЕЗОПАСНОСТИ
ВОДНОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ РЕЙТИНГОВОГО АНАЛИЗА
(НА ПРИМЕРЕ АКВАТОРИИ НЕВСКОЙ ГУБЫ)**

**DEVELOPMENT OF PROPOSALS FOR WATER TRANSPORT SAFETY
BASED ON RATING ANALYSIS (CASE STUDY OF THE NEVA BAY BASIN)**

Д-р техн. наук Ю.В. Ведерников, канд. техн. наук М.М. Дубин, А.В. Шкарин, Н. Вайнт

D.Sc. Y.V. Vedernikov, Ph.D. M.M. Dubin, A.V. Shkarin, N. Vaint

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Статья посвящена изложению методики, позволяющей обосновать возможность использования рейтингового подхода и осуществить выработку предложений по формированию объективной оценки уровня безопасности водных транспортных средств. Данный подход позволяет преодолеть такие проблемы решения многокритериальных задач, как необходимость учета значительного количества параметров различной природы, обеспечение сравнимости разнородных критериев и др. В разработанной методике в качестве инструмента для вычислительной процедуры была использована программа для ЭВМ, обеспечивающая возможность векторного ранжирования и предпочтения как систем, так и объектов.

Ключевые слова: водный транспорт, безопасность, система критериев, рейтинговый анализ, ранжирование.

The article presents a methodology that substantiates the applicability of the rating-based approach and provides recommendations for forming an objective assessment of the safety level of water transport vehicles. This approach makes it possible to overcome common challenges in solving multi-criteria problems, such as the need to account for a large number of heterogeneous parameters and to ensure the comparability of diverse criteria. Within the proposed methodology, a computer program was employed as a tool for the computational procedure, enabling vector ranking and prioritization of both systems and individual objects.

Keywords: water transport, safety, criteria system, rating analysis, ranking.

Введение

Безопасность водного транспорта — одна из приоритетных задач отрасли, особенно в условиях роста судоходства и усложнения эксплуатации. Традиционные методы контроля не учитывают весь комплекс факторов, влияющих на надежность судов, что требует новых подходов. Реше-

нием может стать рейтинговая система на основе многокритериального анализа, позволяющая объективно оценивать техническое состояние судна, подготовку экипажа, историю эксплуатации и оснащенность средствами безопасности. Настоящая статья обосновывает необходимость применения такого подхода и предлагает методику его реализации.

Аналитический обзор

В акваториях Санкт-Петербурга фиксируется рост происшествий: в 2023–2024 гг. их число увеличилось на 78 % (с 14 до 25). Административные нарушения по Закону СПб № 273-70 выросли на 44 %, по КоАП РФ — на 23 %. Дополнительно выявлено свыше 2500 незарегистрированных случаев, что указывает на низкий уровень контроля. Ситуация требует усиления надзора и модернизации инфраструктуры.

Статистические данные аварийности и нарушений

Тенденция роста количества нарушений и происшествий, связанных с водным транспортом приведена в сводной таблице данных за 2023–2024 годы, табл. 1. Из данной таблицы можно увидеть рост нарушений по всем пунктам, при этом в среднем рост количества нарушений происходит на 50 %.

Основные причины происшествий

Основные факторы: высокая загруженность акваторий, недостаточная подготовка экипажей, устаревшая инфраструктура, слабый контроль и пробелы в законодательстве.



Рис. 1 Виды нарушений на водном транспорте

На диаграмме (рис. 1) представлены основные виды нарушений, приводящие к тем или иным происшествиям на воде.

Методология рейтингового анализа

Для формирования обоснованной рейтинговой оценки судов по уровню безопасности предлагается использовать подход, основанный на принципах многокритериальной оптимизации. Этот подход позволяет учитывать комплекс факторов, оказывающих влияние на общее состояние и эксплуатационную надежность водного транспорта.

Основные положения метода

Метод опирается на идею векторного ранжирования объектов по множеству частных скалярных критериев, отражающих различные аспекты безопасности судна. Поскольку критерии могут быть представлены в разнородных шкалах (например, метрических, порядковых, интервальных), их прямое сравнение затруднено. Для преодоления проблемы несопоставимости применяется операторная форма многокритериальной оптимизации, предложенная в работе Ведерникова Ю.В. [2].

Таблица 1

Статистика нарушений и происшествий на водном транспорте в 2023–2024 гг.

Год / Тип	Происшествия, кол-во	Административные нарушения		Помещено на спец. стоянку
		Закона Санкт-Петербурга № 273-70	КоАП РФ	
2023	14	290	599	54
2024	25	417	737	62

Этапы формирования рейтинга

1. Определение множества оцениваемых объектов.

Формируется множество судов, подлежащих анализу. Для каждого объекта собирается совокупность параметров, характеризующих его безопасность: техническое состояние, оснащённость, история эксплуатации, квалификация экипажа и др.

2. Формирование векторного критерия.

Для каждого объекта определяется набор критериев K_j , где каждый критерий K_j — это частный показатель безопасности (например, дата последнего ремонта, наличие систем аварийного оповещения и т.д.).

3. Назначение весовых коэффициентов.

Вводятся коэффициенты значимости a_j для каждого критерия, что позволяет учесть специфику задач и приоритеты заказчика. В случае отсутствия предпочтений используется равномерное распределение.

4. Парное сравнение объектов.

Производится сравнение каждой пары объектов S_k и S_l по каждому критерию, что позволяет определить относительное доминирование одного объекта над другим. Оценка производится по операторным функциям $C_{K_j}(S_k, S_l)$, нормализованным в диапазоне $[0; 1]$.

5. Расчет промежуточных и итоговых оценок.

Полученные результаты парных сравнений сводятся в матрицы, на основании которых формируются значения функции предпочтения для каждого объекта $CD_{K_j}(S_k)$, отражающей его положение по отношению к остальным по j -му критерию.

6. Построение обобщенного рейтинга.

Комплексная оценка определяется агрегированием значений по всем критериям с учетом их весов. Результатом является числовое значение, отражающее степень предпочтительности объекта по совокупности показателей безопасности.

Преимущества метода

1. Учитывается множество параметров различной природы.

2. Обеспечивает сравнимость разнородных критериев.

3. Позволяет использовать интервальные оценки параметров.

4. Поддерживает гибкость за счет настройки весов.

5. Адаптируется под различные задачи анализа и классификации.

6. Методика позволяет выявлять проблемные объекты и формировать обоснованные управленческие решения.

Постановка цели и задач исследования

Цель исследования — обосновать применение рейтингового анализа для сравнения группы из четырех судов, используемых на акваториях Санкт-Петербурга, по критериям технической применимости, экономической целесообразности и комплексной безопасности.

Для ее достижения необходимо:

- сформировать тестовую группу судов с доступной информацией;
- определить систему критериев и параметры их оценки;
- разработать расчетную модель многокритериального ранжирования;
- провести анализ и сформировать итоговый рейтинг.

Объекты и критерии сравнительного анализа

Выбор объектов для сравнения (типы судов, их характеристики)

Для анализа отобраны речные грузовые суда. Оценка проводилась по четырем критериям:

1. Наличие современных навигационных систем и автоматизации.
2. Наличие систем оповещения и пожаротушения.
3. Массо-габаритные характеристики (длина, ширина, высота, осадка).
4. Дальность плавания (отношение запаса топлива к расходу двигателя).

В исследование включены четыре судна (табл. 2).

ТН-611 — современное навигационное оборудование (ECDIS 2023, AIS, радар Furuno), автоматическая сигнализация и пожаротушение.

TP-1009 — ECDIS 2024, система Starlink, ги-рокомпас Simrad; пожарная защита неполная.

Урал — радар JRC JMA-5300, AIS 2023, ограниченная пожарная защита.

СПН-687Б — ECDIS 2022, электронная картография, системы пожаротушения и оповещения.

Выводы по данным, представленным в табл. 2.

Наибольшую безопасность демонстрируют суда ТН-611 и TP-1009, оснащенные современными навигационными системами и автоматизированными средствами пожаротушения. Судно Урал уступает из-за отсутствия автоматического пожаротушения, а СПН-687Б — из-за меньшей дальности плавания. Полученные данные подтверждают необходимость регулярного обновления оборудования для повышения безопасности судоходства.

Определение и обоснование критериев оценки безопасности судов

Для объективного рейтинга безопасности судов выделены пять ключевых критериев.

1. Техническое состояние (срок эксплуатации, ремонт, корпус, спасательные средства).

2. Соответствие требованиям (документы, сертификаты, результаты проверок).

3. Квалификация экипажа (образование, стаж, тренинги, дисциплина).

4. История эксплуатации (аварийность, устранение неисправностей, штрафы).

5. Оснащенность средствами безопасности (навигация, системы оповещения и пожаротушения, связь, резервные устройства).

Каждому показателю присваивается вес, а итоговая балльная оценка позволяет сопоставлять суда по совокупности характеристик.

Обоснование критериев оценки безопасности судна

Для ранжирования судов выбраны четыре ключевых критерия, описываемые на основе данных технических паспортов и регистров:

1. Техническое состояние — срок эксплуатации, дата последнего ремонта, наличие спасательных средств.

2. Оснащенность средствами безопасности — современные навигационные системы, оповещение и пожаротушение.

3. Массо-габаритные характеристики — длина, ширина, высота и осадка.

4. Дальность плавания — определяется через запас топлива и расход двигателя.

Эти критерии позволяют количественно оценить уровень безопасности судов и использовать результаты в рейтинговом анализе.

Таблица 2

Сравнительные характеристики речных грузовых судов по критериям безопасности

Название судна	Критерий 1 (навигационные системы)	Критерий 2 (пожаротушение и оповещение)	Габариты (Д×Ш×В), м	Осадка, м	Запас топлива, т	Дальность (миль)
ТН-611	1,0 (ECDIS 2023, AIS, радар Furuno FAR-3220)	1,0 (АПС, автоматическое пожаротушение, СОУЭ)	65,6×9,6×2,4	2,4	80	3200
TP-1009	1,0 (ECDIS 2024, Starlink, гироскоп Simrad GC85)	1,0 (АПС, пенные установки, аварийные насосы)	86,45×13,0×2,5	3,0	100	4000
Урал	0,8 (Радар JRC JMA-5300, AIS 2023)	0,5 (СОУЭ, ручные огнетушители)	65,7×9,6×2,8	2,8	95	3500
СПН-687Б	0,8 (ECDIS 2022, электронная картография)	1,0 (АПС, спринклеры, датчики температуры)	65,28×10,36×2,0	2,5	70	2500

Переход от критериев к расчету

После формирования системы критериев и определения параметров, по которым можно количественно охарактеризовать каждый из них, был осуществлен переход к вычислительной процедуре. На основе собранных данных для каждого судна составлены векторные описания, включающие значения частных показателей по каждому критерию (рис. 2).

Далее эти значения были нормированы в диапазоне $[0; 1]$, что позволило обеспечить сопоставимость разнородных характеристик. После нормализации были применены весовые коэффициенты, отражающие приоритетность отдельных критериев (в зависимости от сценария анализа).

Ранжирование объектов производилось методом парного сравнения с использованием опера-

торной формы многокритериальной оптимизации, реализованной в программном обеспечении, зарегистрированном в установленном порядке. На выходе система формировала обобщенный рейтинг каждого судна, отражающий его относительную степень предпочтительности по безопасности.

Результаты реализации вычислительной процедуры

Проведенный анализ и интерпретация полученных данных

В качестве инструмента для проведения расчетов воспользуемся программой [3], ниже на рис. 3 и 4 представлен интерфейс программы и результаты вычислений.

Полученные в ходе расчетов результаты анализа судов по критериям и различным сценариям представлены в сводной табл. 3.

Судно/критерии	Навигационные	СПТнО	Длина	Ширина	Высота	Осадки	Запас топлива	Дальность
Тип поля	Число	Число	Число	Число	Число	Число	Число	Число
Макс. значение	1.0	1.0	70.0	10.0	2.5	2.6	97.0	3400.0
Целевое значение	Максимум	Максимум	Минимум	Минимум	Минимум	Минимум	Максимум	Максимум
Весовой коэффициент	1.0	1.0	65.28	9.6	2.4	2.0	97.0	3400.0
TH-611	1.0	1.0	65.6	9.6	2.4	2.4	80.0	3200.0
TP-1009	1.0	1.0	86.45	13.0	2.5	3.0	100.0	4000.0
Урал	0.8	0.5	65.7	9.6	2.8	2.8	95.0	3500.0
СПН-687Б	0.8	1.0	65.28	10.36	2.5	2.0	70.0	2500.0

Рис. 2. Интерфейс программного обеспечения для многокритериального анализа и ранжирования судов

Судно/критерии	Навигационные	СПТнО	Длина	Ширина	Высота	Осадки	Запас топлива	Дальность
Векторный коэфф.	0.125	0.125	0.125	0.995	1.0	0.125	1.0	0.765
TH-611	1.0	1.0	0.698	0.66	0.96	0.615	1.0	0.765
TP-1009	0.8	0.5	0.994	1.0	0.84	0.692	0.948	0.853
Урал	0.8	1.0	1.0	0.924	0.96	1.0	0.691	0.559
СПН-687Б	0.8	1.0	1.0	0.924	0.96	1.0	0.691	0.559

Рис. 3. Результат работы алгоритма при равенстве весов параметров

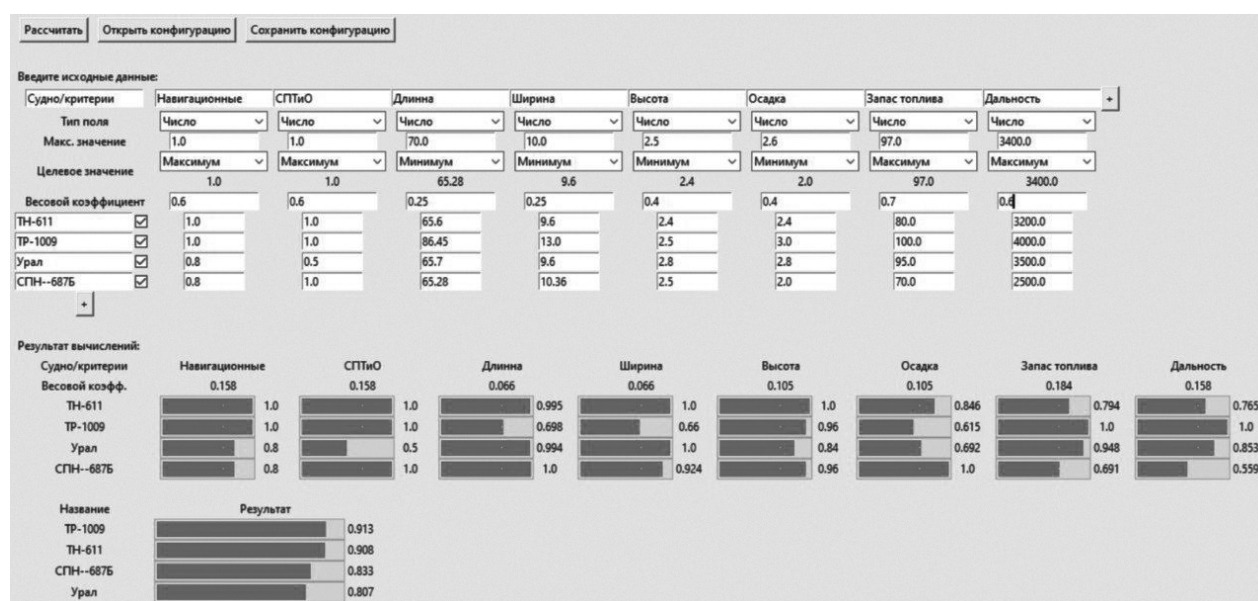


Рис. 4. Результат работы алгоритма при неравенстве весов параметров

Таблица 3

Сводные результаты оценки безопасности судов по двум сценариям

Судно / Сценарий	Навига-ционные	СПТtО	Длина	Ширина	Высота	Осадка	Запас топлива	Дальность	Итоговая оценка
Сценарий 1									
ТН-611	1,0	1,0	0,995	1,0	1,0	0,846	0,794	0,765	0,913
ТР-1009	1,0	1,0	0,999	0,86	0,96	0,615	1,0	1,0	0,908
Урал	0,8	0,5	0,994	1,0	0,84	0,692	0,948	0,853	0,833
СТН-687Б	0,8	1,0	1,0	0,924	0,96	1,0	0,691	0,559	0,807
Сценарий 2									
ТН-611	1,0	1,0	0,995	0,995	1,0	1,0	0,965	0,965	0,925
ТР-1009	1,0	1,0	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,867
Урал	0,8	0,5	0,994	0,994	1,0	0,994	0,994	0,994	0,867
СТН-687Б	0,8	1,0	1,0	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,828

Интерпретация.

Сценарий 1.

Весовые коэффициенты распределены неравномерно (например, для длины — 0,066, для запаса топлива — 0,184).

ТР-1009 показывает наилучшие результаты по запасу топлива и дальности (1,0), но хуже по Осадке (0,615).

СТН-687Б имеет максимальные значения по длине и осадке (1,0), но низкие по дальности (0,559).

Итоговые оценки: ТР-1009 и ТН-611 лидируют (0,908 и 0,913).

Сценарий 2.

Весовые коэффициенты равны (для всех критериев), что подразумевает одинаковую важность параметров.

СТН-687Б сохраняет высокие значения по длине (1,0), но снижает показатели по другим критериям.

ТР-1009 демонстрирует стабильно высокие значения (0,998 по всем параметрам), что делает его универсальным выбором.

Итоговые оценки: ТР-611 и СПН-687Б лидируют (0,925 и 0,867).

Сравнительный рейтинг судов по безопасности

В качестве критериев безопасности выбраны:

1. Навигационные параметры (прямой показатель безопасности);
2. СПТиО (системы технической поддержки и обслуживания);
3. Запас топлива (надежность в длительных плаваниях);
4. Дальность (способность избегать рисков, связанных с дозаправкой);
5. Осадка (устойчивость судна).

Анализ результатов.

ТР-1009 лидирует благодаря максимальным значениям по запасу топлива и дальности.

ТН-611 имеет лучшие навигационные показатели, но уступает в запасе топлива и дальности.

СТН-687Б — худший по дальности, но максимальная осадка повышает устойчивость.

Комментарий.

ТР-1009 сохраняет лидерство благодаря равномерно высоким значениям.

ТН-611 улучшает позиции за счет баланса между навигацией и осадкой.

СТН-687Б теряет преимущества из-за низкой дальности.

Итоговый рейтинг по безопасности представлен в табл. 6.

Выводы на основе полученных результатов

Наиболее безопасным судном признан ТР-1009, демонстрирующий высокие показатели по всем критериям и универсальность для разных условий плавания. ТН-611 занимает второе место, отличаясь современными навигационными системами, но уступая по запасу топлива и дальности.

Среди специализированных вариантов: СТН-687Б выгоден при акценте на устойчивость, но ограничен дальностью; Урал показал наименьшие результаты и требует модернизации.

Весовые коэффициенты влияют на итоговые позиции: при неравномерном распределении решающими становятся запас топлива и даль-

Таблица 4

Рейтинг безопасности (Сценарий 1: неравномерные веса)

Судно	Навигационные	СПТиО	Запас топлива	Дальность	Осадка	Итоговая оценка
ТР-1009	1,0	1,0	1,0	1,0	0,615	0,908
ТН-611	1,0	1,0	0,794	0,765	0,846	0,913
Урал	0,8	0,5	0,948	0,853	0,692	0,833
СТН-687Б	0,8	1,0	0,691	0,559	1,0	0,807

Таблица 5

Рейтинг безопасности (Сценарий 2: равные веса)

Судно	Навигационные	СПТиО	Запас топлива	Дальность	Осадка	Итоговая оценка
ТР-1009	1,0	1,0	0,998	0,998	0,998	0,998
ТН-611	1,0	1,0	0,965	0,965	1,0	0,986
СТН-687Б	0,8	1,0	0,924	0,924	0,924	0,914
Урал	0,8	0,5	0,994	0,994	0,994	0,854

Таблица 6

Итоговый рейтинг по безопасности

Место	Судно	Сценарий 1	Сценарий 2	Общая оценка (среднее)
1	ТР-1009	0,908	0,998	0,953
2	ТН-611	0,913	0,986	0,949
3	СТН-687Б	0,807	0,914	0,860
4	Урал	0,833	0,854	0,843

ность, при равных — сбалансированность характеристик.

Рекомендации:

– для длительных экспедиций — ТР-1009 или ТН-611;

– для коротких рейсов с упором на устойчивость — СТН-687Б;

– для задач с высокими требованиями к навигации — ТН-611.

Таким образом, выбор судна зависит от конкретных приоритетов, при этом ТР-1009 демонстрирует наилучший баланс безопасности.

Заключение

Проведенный анализ подтвердил эффективность рейтингового подхода к оценке безопасности судов. Методика на основе многокритериального ранжирования позволяет учитывать разнородные параметры и формировать объективные оценки, применимые к различным типам судов. Внедрение такой системы способствует повышению прозрачности контроля, управлению рисками и стимулированию судовладельцев к соблюдению требований безопасности. Результаты исследования могут служить основой для разработки нормативных документов и информационно-аналитических систем в сфере водного транспорта.

Список источников

1. Официальный сайт Правительства Санкт-Петербурга [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gov.spb.ru/> (дата обращения: 12.06.2025).

2. Санкт-Петербургский линейный отдел МВД России на водном транспорте [Электронный ресурс]. URL: https://сзфоут.мвд.рф/UT_MVD/podrazdeleniya/item/720875 (дата обращения: 17.06.2025).

3. Государственная инспекция по маломерным судам (ГИМС) ГУ МЧС России по г. Санкт-Петербургу [Электронный ресурс]. URL: <https://78.mchs.gov.ru/glavnoe-upravlenie/sily-i-sredstva/gosudarstvennaya-inspekciya-po-malomernym-sudam> (дата обращения: 17.06.2025).

4. Российский морской регистр судоходства. База данных судовых регистров [Электронный

ресурс]. URL: <https://rs-class.org/> (дата обращения: 11.06.2025).

5. Стратегия развития морской деятельности Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <https://docs.cntd.ru/document/561091982> (дата обращения: 17.06.2025).

6. Постановление Правительства Российской Федерации от 12.08.2010 № 623 «Об утверждении технического регламента о безопасности объектов внутреннего водного транспорта»; Собрание законодательства РФ. 2010. № 34. Ст. 4493.

7. Ведерников Ю.В. Основы теории структурной оптимизации систем контроля и управления беспилотными летательными аппаратами: учеб. пособие. Изд. 2-е СПб.: Политехника, 2022. 367 с.

8. Инструмент векторного ранжирования и предпочтения систем и объектов: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025610210. Рос. Федерация. № 2024691486; заявл. 11.12.24; опублик. 10.01.25. Бюл. № 1. 3 с.

9. Программа для анализа безопасности управления водным транспортом: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025688343. Рос. Федерация. № 2025687542; 17.10.2025, заявл. 07.10.25; опублик. 17.10.25. Бюл. № 10. 3 с.

10. Дмитриев В.И. Система управления безопасностью судоходных компаний и судов: учеб. пособие. М.: Моркнига, 2023. 271 с.

11. Ведерников Ю.В., Малыгин И.Г., Калач А.В. Структурная оптимизация в задачах обеспечения безопасности объектов регионального уровня // Безопасность в техносфере. 2022. № 3 (57). С. 16–24.

12. ГОСТ Р 59146–2020. Внутренний водный транспорт. Методы оценки технического уровня и качества судов. М.: Стандартинформ, 2020. 22 с.

13. Государственная инспекция по маломерным судам (ГИМС) ГУ МЧС России по г. Санкт-Петербургу. Годовой отчет о деятельности за 2023–2024 гг. [Электронный ресурс]. URL: <https://78.mchs.gov.ru/> (дата обращения: 17.06.2025).

14. Шкарин А.В., Тихоньких Я.К., Мамоля Э.В. и др. Системы мониторинга и анализа состояния Каспийского моря для обеспечения

безопасности и бесперебойности судоходства // Современные вызовы и перспективы развития морской индустрии: безопасность, экология и инновация / Материалы Междунар. науч.-практ. конф. г. Санкт-Петербург, 15 апреля 2025 года. С. 44–63.

15. Шкарин А.В., Тихоньких Я.К., Вайнт Н. и др. Разработка предложений по оптимизации эксплуатации внутренних акваторий Санкт-Петербурга: подходы к управлению и экономическая оценка // Сб. науч. трудов АО «ЦНИИМФ», 2025. С. 123–127.

References

1. Government of Saint Petersburg Official Website [Electronic resource]. URL: <https://www.gov.spb.ru/> (accessed: 12.06.2025).
2. Saint Petersburg Linear Department of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation on Water Transport [Electronic resource]. URL: https://сзфоут.мвд.пф/UT_MVD/podrazdeleniya/item/720875 (accessed: 17.06.2025).
3. State Inspectorate for Small Vessels (GIMS) of the Main Directorate of EMERCOM of Russia for Saint Petersburg [Electronic resource]. URL: <https://78.mchs.gov.ru/glavnoe-upravlenie/sily-i-sredstva/gosudarstvennaya-inspekciya-pomalomernym-sudam> (accessed: 17.06.2025).
4. Russian Maritime Register of Shipping. Vessel Register Database [Electronic resource]. URL: <https://rs-class.org/> (accessed: 11.06.2025).
5. Strategy for the Development of Maritime Activities of the Russian Federation for the Period up to 2030 [Electronic resource]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/561091982> (accessed: 17.06.2025).
6. Government of the Russian Federation. Resolution No. 623 of 12.08.2010 On the Approval of the Technical Regulations on the Safety of Inland Water Transport Facilities. Legislation Bulletin of the Russian Federation. 2010. No. 34. Art. 4493.
7. Vedernikov Yu.V. Fundamentals of the Theory of Structural Optimization of Control Systems for Unmanned Aerial Vehicles: Textbook. 2nd ed. Saint Petersburg: Politekhnik, 2022. 367 p.
8. Vector Ranking and Preference Tool for Systems and Objects: Certificate of State Registration of Computer Program No. 2025610210. Russian Federation. Application No. 2024691486 of 11.12.2024. Registration date: 09.01.2025. Publication date: 10.01.2025, Bulletin No. 1.
9. Water Transport Safety Analysis System: Certificate of State Registration of Computer Program No. 2025688343. Russian Federation. Application No. 2025687542 of 07.10.2025. Registration date: 17.10.2025. Publication date: 17.10.2025, Bulletin No. 10.
10. Dmitriev V.I. Safety Management System for Shipping Companies and Ships: Textbook. Moscow: Morkniga, 2023. 271 p.
11. Vedernikov Yu.V., Malygin I.G., Kalach A.V. Structural Optimization in Safety Assurance of Regional-Level Facilities // Safety in Technosphere. 2022. No 3 (57). Pp. 16–24.
12. GOST R 59146–2020. Inland Water Transport. Methods of Assessing the Technical Level and Quality of Vessels. Moscow: Standartinform, 2020. 22 p.
13. State Inspectorate for Small Vessels (GIMS) of the Main Directorate of EMERCOM of Russia for Saint Petersburg. Annual Activity Report for 2023–2024 [Electronic resource]. URL: <https://78.mchs.gov.ru/> (accessed: 17.06.2025).
14. Shkarin A.V., Tikhon'kikh Ya.K., Mamolia E.V. et al. Monitoring and Analysis Systems of the Caspian Sea State for Ensuring Safe and Uninterrupted Navigation. In: Modern Challenges and Prospects for the Development of the Maritime Industry: Safety, Ecology and Innovation // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Saint Petersburg, Apr. 15, 2025, Pp. 44–63.
15. Shkarin A.V., Tikhon'kikh Ya.K., Vaint N. et al. Development of Proposals for Optimizing the Operation of Inland Waters of Saint Petersburg: Management Approaches and Economic Assessment // In: Collection of Scientific Papers of JSC TsNIIMF, 2025. Pp. 123–127.

УДК 658.382.3

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_72

ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ОПОВЕЩЕНИЯ О ЛАЗЕРНОЙ ОПАСНОСТИ

OPTIMIZATION OF LASER HAZARD WARNING SYSTEMS

*Д-р техн. наук Ф.Г. Агаев, канд. техн. наук Ф.Ф. Гулиев,
канд. техн. наук И.Г. Абдурахманова*

D.Sc F.G. Agaev, Ph.D. F.F. Guliyev, Ph.D. I.G. Abdurrakhmanova

Национальное Аэрокосмическое Агентство (г. Баку)

Сформирована и решена задача оптимального выбора соотношений дистанций от лазера до цели и от цели до приемников в системах LWS с выносными фотодетекторами. Сформулированы две подзадачи: в первой — цель указанная лазером принадлежит противнику, а во второй противоположной стороне. Показано что при оптимизации систем лазерно-управляемых ракет и снарядов при учете внедренной противником LWS-системы можно воспользоваться теорией лазерных систем. Применение теории лазерных систем позволило оптимизировать функционирование атакующей стороны в плане оптимального выбора расстояния до противника, применяющего LWS-систему с выносными фотодатчиками.

Ключевые слова: лидар, фотодетектор, оптимизация, лазер, луч лазера.

The problem of optimally selecting the ratios of distances from the laser to the target and from the target to the receivers in LWS systems with remote photodetectors has been formed and solved. Two subtasks are formulated: in the first, the target indicated by the laser belongs to the enemy, and in the second, the opposite side. It is shown that when optimizing systems of laser-guided missiles and projectiles, taking into account the LWS-system introduced by the enemy, it is possible to use the theory of laser systems. The application of the theory of laser systems made it possible to optimize the functioning of the attacking side in terms of the optimal choice of the distance to the enemy using the LWS system with remote photo sensors.

Keywords: Lidar, photodetector, optimization, laser, laser beam.

Системы оповещения о лазерной опасности (LWS — Laser Warning Systems) предназначены для организации защиты живой силы и важных военных объектов от лазерно-управляемых ракет, снарядов или пуль снайперов противника. Базовый принцип действия систем оповещения о лазерной опасности (даже LWS-систем) подробно описан во многих работах [1, 2, 4, 8, 11] и далее подробно не излагается. Следует отметить, что развитие LWS-систем в настоящее время

идет в направлении улучшения обзора, дальности регистрации лазерного излучения, увеличения отношения сигнал/шум и увеличения шума защищенности системы.

Так, в работе [1] предложена новая конструкция LWS-систем, содержащая пространственно смодулированный интерферометр Михельсона и оптоволоконную оптическую антенну. Интерферометр различает лазерное излучение от фонового излучения. С использованием Фурье-пре-

образования получают информацию о спектре лазерного излучения. В работе [2] сообщается о создании датчика угла падения с использованием зеркал. Отмечается, что предлагаемая конструкция обеспечивает угол обзора до 120° .

В работе [3] сообщается о построении LWS с использованием линейки дискретных фотодиодов. Отмечается что предлагаемая конструкция обеспечивает высокую точность определения угла поступления луча. Возможности использования нейроморфической колеры для обеспечения полусферического угла обзора рассмотрены в работе [4]. Отмечается, что достигнута точность регистрации угла поступления на уровне $0,05$ градусов в видимой области спектра. В работе [5] сообщается о создании бортовой системы LWS, имеющей широкий диапазон длин волн со способностью детектирования кодовой посылки, содержащейся в импульсной последовательности лазерного излучения. Отмечается, что LWS-система должна учесть возможность изменения дистанции между излучателем и самой системой, и быть зачищенной от интерференций. Как отмечается в работе [6] используемые в LWS-системах фотодетекторы должны охватить широкий диапазон длин волн от 500 нм до 1700 нм, быть способны детектировать вражеский код. Согласно работе [7], создано LWS с оптической системой, обеспечивающей отношение сигнал/шум на уровне 160 дБ и способной зарегистрировать лазерные лучи с дистанции выше 15 км при низкой температуре. Как сообщается в работе [8], использование фотоприемников на базе наноструктур позволит намного улучшить

основные характеристики LWS-систем. В работе [9] отмечается необходимость учета ослабления лазерного луча в атмосфере при организации мер по противодействию цели указывающего луча. В работе [10] отмечается, что уменьшение диаметра луча с помощью вновь разработанной оптики до размеров 350 мкм позволило достичь отношения сигнал/шум на уровне 175 дБ, что в свою очередь позволило уменьшить количество «ложных тревог».

Вместе с тем следует указать на возможность повышения чувствительности таких систем, заключающуюся в том, что лазерный луч, проходя через километровые дистанции, увеличивается в диаметре до нескольких десятков сантиметров. Однако, оптический узел системы оповещения принимает лишь часть энергии луча. При этом остальная часть энергии лазерного луча пропадает. Если использовать выносные фотодетекторы с большой площадью чувствительной входной части и установить их на определенном расстоянии от объекта, для приема всей рассеянной и отраженной от объекта радиации, как это показано на рис. 1, б, то можно более эффективно регистрировать поступающие лазерные лучи.

Отметим также то, что фиксация лазерного луча на поверхности охраняемого объекта может быть осуществлена двумя способами.

1. Путем размещения на поверхности охраняемого объекта высокочувствительных фотодетекторов для фиксации попадания лазерного луча на поверхности объекта (рис. 1, а).

2. Путем размещения перед охраняемым объектом выносных фотодетекторов для регист-



Рис. 1. Структурная схема систем оповещения о лазерной опасности:

а — вариант системы, где фотодатчики установлены на поверхности объекта;

б — вариант системы с выносными фотодатчиками. Цифрами обозначены:

1 — лазерный луч; 2 — фотодатчики; 3 — охраняемый объект; 4 — отражение лазерных лучей

рации отраженных от поверхности охраняемого объекта лазерных лучей (рис. 1, б).

В настоящей статье рассматривается следующая дуальная задача.

Задача 1.1: найти оптимальное соотношение r_1 и r_2 (рис. 1, б) в случае, если объект принадлежит противнику, а лазер — силам, наступающим на противника.

Задача 1.2: найти оптимальное соотношение дистанций r_1 и r_2 (рис. 1, б) в случае, если лазер принадлежит противнику, а объект принадлежит стороне, обороняющейся от противника.

Следует отметить, что в отношении принципа работы части системы распространение лазерного луча и его отражения от объекта можно сказать, что принцип функционирования и анализ работы этой части LWS-системы полностью аналогичен принципу работы и методом анализа LADAR-а. Как известно [5, 12–13] LADAR является лазерным радаром, предназначенным для определения и изучения формы и конфигурации объектов на определенной дистанции. Для решения поставленных выше задач воспользуемся известными выражениями полученными при анализе LADAR-ов.

Как показано в работе [14] уравнение мощности отраженного лазерного луча в LADAR имеет вид

$$P_r = \frac{4KP_5 T_{A_1} \eta_t}{\pi \cdot \varphi^2 r_1^2} \cdot \Gamma \cdot \frac{T_{A_2}}{\pi \cdot r_2^2} \cdot \frac{\pi D^2 \eta_r}{4}, \quad (1)$$

где P_r — мощность принимаемого отраженного сигнала;

P_5 — мощность используемого лазерного источника;

K — функция, характеризующая профиль луча лазера;

T_{A_1} — коэффициент пропускания атмосферы в направлении от источника к цели;

η_t — оптическая эффективность передатчика;

φ — толщина луча радианах;

r_1 — расстояние от передатчика до цели;

Γ — поперечное сечение лазерного луча на поверхности цели и в м²;

T_{A_2} — пропускание атмосферы от цели до приемника;

r_2 — расстояние от цели до приемника;

D — диаметр диафрагмы приемника;

η_r — оптическая эффективность приемника.

Таким образом выражение (1) позволяет вычислять мощность лазерного радара в виде произведения четырех множителей:

1. Распространение луча лазера до цели;
2. Отражение луча от цели;
3. Движение рассеянного (отраженного луча) к приемнику;
4. Сбор рассеянного света преобразование приемником.

Как видно из выражения (1), оно симметрично относительно r_1 и r_2 в целом. Полная структурная схема системы LWS может быть представлена подобно схеме, показанной на рис. 2.

Целью настоящей статьи является нахождение оптимального соотношения между r_1 и r_2 , при которой мощность отраженных сигналов может достигать экстремальных величин.

При этом если экстремум является минимумом, то это можно считать оптимальным вариантом для атакующей стороны.

В противном, случае, если экстремум является максимумом, то этот вариант является оптимальным для обороняющейся стороны.

Как видно из выражения (1), оно симметрично относительно r_1 и r_2 следовательно любое полученное оптимальное соотношение в виде

$$r_1 = f(r_2) \quad (2)$$

становится также оптимальным в виде

$$r_2 = f(r_1).$$

Рассмотрим порядок формирования и решения соответствующей оптимизационной задачи.

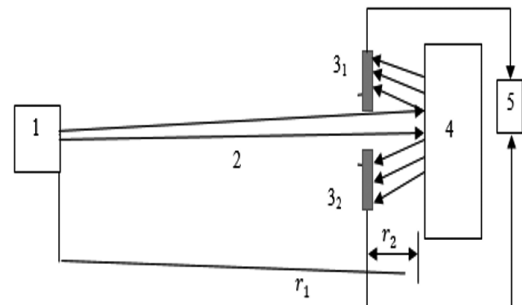


Рис. 2. Структурная схема системы LWS.

Цифрами обозначены: 1 — лазерный источник наведения атакующей стороны; 2 — лазерный луч; 3₁–3₂ — фотоприемники; 4 — охраняемый объект; 5 — устройство управления

Представим выражение (1) в следующем виде

$$P_r = \frac{C_1}{r_1^2 \cdot r_2^2}, \quad (3)$$

где

$$C_1 = \frac{4KP_5 T_{A_1} \eta_t}{\pi \cdot \phi^2} \cdot \Gamma \cdot \frac{T_{A_2}}{4\pi} \cdot \frac{\pi D^2 \eta_r}{4},$$

при $C_1 = \text{const}$.

Далее введем на рассмотрение функциональную связь

$$r_1 = f(r_2). \quad (4)$$

С учетом выражения (4) выражение (3) имеет вид

$$P_1 = \frac{C_1}{r_2^2 + f^2(r_2)}. \quad (5)$$

В принципе может существовать следующее упорядоченное множество

$$R_2 = \{r_{2i}\}; i = \overline{1, n},$$

где близлежащие элементы множества отличаются на величину $\Delta r_2 = \text{const}$, то есть на практике r_2 может принять большое множество дискретных величин.

Очевидно, что при $n \rightarrow \infty$ на базе выражения (5) можно построить следующий целевой функционал F :

$$F = \int_0^{r_{2\max}} \frac{C_1}{r_2^2 f^2(r_2)} dr_2. \quad (6)$$

Согласно методу безусловной вариационной оптимизации для вычисления оптимального вида функции $f(r_2)$ на эту функцию необходимо наложить некоторое ограничительное условие в виде

$$\int_0^{r_{2\max}} f(r_2) dr_2 = C_2; C_2 = \text{const}. \quad (7)$$

С учетом выражений (6) и (7) составим следующий целевой функционал F_1 оптимизации

$$F_1 = \int_0^{r_{2\max}} \frac{C_1}{r_2^2 \cdot f^2(r_2)} dr_2 + \lambda \left[\int_0^{r_{2\max}} f(r_2) dr_2 - C_2 \right], \quad (8)$$

где λ — множитель Лагранжа.

Решение оптимизационной задачи (8) согласно методу Эйлера должно удовлетворять условию [15]

$$\frac{d \left\{ \frac{C_1}{r_2^2 \cdot f^2(r_2)} + \lambda f(r_2) \right\}}{df(r_2)} = 0. \quad (9)$$

Из выражения (9) находим

$$-\frac{2C_1}{r_2^2 \cdot f^3(r_2)} + \lambda_1 = 0. \quad (10)$$

Из выражения (10) имеем

$$f(r_2) = \sqrt[3]{\frac{2C_1}{\lambda_1 \cdot r_2^2}}. \quad (11)$$

Согласно признаку Лагранжа при решении (11) функционал (8) достигает минимума, так как вторая производная подынтегрального выражения в (8) по функции $f(r_2)$ всегда является положительной величиной. Для выражения λ можно воспользоваться выражениями (8) и (11).

Как было отмечено выше выражение (3) симметрично относительно r_1 и r_2 . Это означает, что если ввести на рассмотрение функцию

$$r_2 = \psi(r_1)$$

и ограничение

$$\int_0^{r_{2\max}} \psi(r_1) dr_1 = C_3; C_3 = \text{const}$$

и далее построить функционал F_2 , где

$$F_2 = \int_0^{r_{1\max}} \frac{C_1}{r_1^2 \cdot \psi^2(r_1)} dr_1 + \lambda_2 \left[\int_0^{r_{1\max}} \psi(r_1) dr_1 - C_3 \right], \quad (12)$$

и если повторить все вышеприведенные процедуры можно получить решение

$$r_2 = \psi(r_1) = \sqrt[3]{\frac{2C_1}{\lambda_2 \cdot r_1^2}}.$$

При решении (12) функционал F_2 достигает минимума, что легко проверить по признаку Лагранжа.

Выводы

Таким образом, сформирована и решена задача оптимального выбора соотношения дистанций от лазера до цели и от цели до приемников в системах LWS с выносными фотодетекторами. Рассмотрены две подзадачи: в первой — целеуказывающий лазер принадлежит противнику, а во второй — противоположной стороне.

В контексте решения первой подзадачи получено условие, при выполнении которого сигнал, формируемый в выносных фотодетекторах, достигает минимума, что нежелательно для обороняющейся стороны.

В контексте решаемой второй подзадачи получено условие, при котором у обороняющегося противника на выносных фотодатчиках формируется минимальный сигнал, что можно считать оптимальным режимом для сил, наступающих на противника.

Показано, что при оптимизации систем лазерно-управляемых ракет и снарядов с учетом внедрения противником LWS-систем можно воспользоваться теорией ладарных систем. Применение теории ладарных систем позволило оптимизировать функционирование атакующей стороны в плане оптимального выбора расстояния до противника, применяющего LWS-систему с выносными фотодатчиками.

Список источников (References)

1. Xiao L., Jilong Z., Erming T. et al. A new design for laser warning system // Proc. Of the 7th WSEAS international conference on signal, speech and image processing. Beijing, China. 2007.
2. Wojtanowski J., Jakubaszek M., Zygmunt M. Freeform mirror design for novel laser warning receivers and laser angle of incidence sensors // Sensors 2020. No 2569.
3. Kumar S., Prakash S., Maini A.K. et al. Design of a laser-warning system using an array of

discrete photodiodes. Part II // Journal of battlefield technology. 2021. Vol. 14, No 2.

4. Orth A., Stewart T.C., Picard M., Drouin M.A. Towards a laser warning system in the visible spectrum using a neuromorphic camera // ICONS 22. <https://doi.org/10.1145/3546790.3546819>.

5. Barber Z. et al. Accuracy of active chirp linearization for broadband FMCW ladar // To be submitted to JOSA B. 2009.

6. Gogoi T., Kumar R. Design and development of a laser warning sensor prototype for airborne application // Defence science journal. 2023. Vol. 73, No 3. Pp. 332–340. No 3.

7. Mohammadnejad S., Arab H., Sheshkelani N.R. analysis of new laser warning technologies to propose a new optical subsystem // Iranian journal of electrical and electronic engineering. 2018. Vol. 14, No 3.

8. Mohammadnejad S., Aasi M. Analysis of structures and technologies of various types of photodetectors used in laser warning systems: a review // Optical engineering. 2023. Vol. 62, No 9.

9. Zygmunt M., Kopczynski K. Laser warning system as an element of optoelectronic battlefield surveillance // Radioelectronic systems conference. 2019. Vol. 11442.

10. Adel A., Ahmed M., Mabrouk M., Hamed H.F. Design and implementation of a promising optical subsystem with a sky camera for laser warning systems. 2021. 46288.1060.

11. Kumar S., Maini A.K., Patil V.B., Sharma R.B. Laser warning sensor assisted countermeasure system // Proceedings of the first international conference on electronic warfare. EWCI-2010. Pp. 315–318.

12. Stone W.C., Juberts M., Dagalakis N., Stone J., Gorman J. Performance analysis of next-generation LADAR for manufacturing, construction, and mobility // National institute of standards and technology publication. NISTIR 7117. 2004.

13. Krause B., Gatt P., Embry C., Buck J. High-resolution 3D-coherent laser radar imaging // Laser radar technology and applications XI. Proc. Of SPIE. 2006. Vol. 6214.

14. Kamerman G.W. Chapter 1. Laser Radar. 1993. Vol. 6

15. Smith D.R. Variational methods in optimization. Dover Publications. Mineola. New York 1998.

УДК 681.5:614.8:519.87

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_77

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМА КАНА В ЗАДАЧЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛ, ПРИВЛЕКАЕМЫХ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

USING THE KANA ALGORITHM IN THE TASK OF APPLYING FORCES TO ELIMINATE EMERGENCY SITUATIONS

Канд. техн. наук Г.А. Шарипов

Ph.D. G.A. Sharipov

Академия гражданской защиты МЧС России

В статье исследовано применение алгоритма Кана как ключевого инструмента построения сетевых моделей управления процессами ликвидации чрезвычайных ситуаций, связанных с разрушением зданий и сооружений. На основе анализа принципов топологической сортировки и существующих подходов оптимизации ресурсов предложена математическая модель применения сил, привлекаемых при проведениях аварийно-спасательных работ, ориентированная на минимизацию общего времени их проведения. В работе также рассматривается интеграция алгоритма Кана с методами PERT и CPM, их совместное применение для повышения эффективности управления ликвидацией чрезвычайных ситуаций. Представлены практические рекомендации по использованию данного алгоритма в автоматизированных системах управления МЧС России.

Ключевые слова: алгоритм Кана, чрезвычайная ситуация, ликвидация, распределение сил и средств, оптимизация, сетевое планирование, математическое моделирование, здания и сооружения, аварийно-спасательные и другие неотложные работы.

The article explores the application of the Kahn's Algorithm as a key tool for building network models of emergency response management in cases of building and structure destruction. Based on an analysis of topological sorting principles and existing resource optimization approaches, a mathematical model is proposed for the application of forces involved in emergency rescue operations, aimed at minimizing the overall time required for their execution. The article also discusses the integration of the Kahn's Algorithm with PERT and CPM methods and their combined use to enhance the efficiency of emergency response management. Practical recommendations for using this algorithm in automated control systems of the Russian Ministry of Emergency Situations are presented.

Keywords: Kahn's Algorithm, emergency situation, elimination, distribution of forces and resources, optimization, network planning, mathematical modeling, buildings and structures, emergency rescue and other urgent works.

Несмотря на технологический прогресс, количество чрезвычайных ситуаций (ЧС), связанных с разрушением зданий, не снижается, а доля человеческих жертв от них составляет более 90 % от общего числа погибших при техногенных

ЧС [1]. Проблема снижения количества человеческих жертв в ЧС, связанных с разрушением зданий и сооружений, является актуальной, а применение сил проведения аварийно-спасательных работ (АСР) должно быть направлено на оптимизацию

существующих методов и подходов на снижение времени ликвидации ЧС. Снижение времени проведения АСР существенно уменьшает количество погибших и пострадавших, и уменьшает экономический ущерб.

На ранних этапах исследование управления ликвидацией ЧС строилось преимущественно на эмпирических подходах, где последовательность действий определялась нормативно, а ресурсы распределялись по фиксированным планам. Однако по мере усложнения сценариев катастроф стало очевидно, что статические схемы теряют эффективность в условиях изменяющейся обстановки. Современные методы ориентированы на создание адаптивных моделей, позволяющих учитывать пространственно-временные зависимости между этапами ликвидации ЧС, связанных с разрушением зданий и сооружений, ограниченностью привлекаемых сил и средств и многокритериальностью принимаемых решений.

Одной из ключевых тенденций последних лет стало развитие интеллектуальных систем поддержки принятия решений, способных в реальном времени адаптировать планы реагирования. Согласно современным исследованиям в области управления рисками и техносферной безопасности [2–6], эффективность АСР напрямую зависит от точности временной и логической синхронизации между подразделениями, а также от способности системы быстро перестраивать последовательность действий при поступлении новой информации о развитии ситуации.

В этих условиях особое значение приобретает моделирование процессов ликвидации ЧС на основе теории графов. Представление операций в виде ориентированного ациклического графа позволяет формализовать взаимосвязи между задачами, выявлять критические операции и определять оптимальную последовательность выполнения работ. Среди алгоритмических инструментов особое место занимает алгоритм Кана, обеспечивающий корректное построение топологического порядка операций без образования циклов и логических конфликтов. Этот механизм особенно эффективен для задач динамического распределения сил, когда зависимость между действиями изменяется во времени. Методы сетевого планирования при организации ликвидации ЧС представляют со-

бой эффективный инструмент управления, обеспечивающий оптимизацию временных, материальных и человеческих ресурсов. Сетевой граф формирует логико-временную структуру технологических операций, необходимых для устранения последствий ЧС. Такая модель позволяет выявить критические звенья, определить взаимосвязи между видами АСР и спрогнозировать сроки достижения конечных целей ликвидации.

Каждая операция сетевого графа ликвидации ЧС, связанной с разрушением зданий, представляет собой отдельный этап проведения элементов аварийно-спасательных и других неотложных работ (АСДНР). Она охватывает такие направления деятельности, как локализация опасных факторов, оказание помощи пострадавшим, разбор завалов и организации жизнеобеспечения. Построение сетевой модели обеспечивает формирование единой структурированной схемы, отражающей взаимосвязь всех технологических операций.

Построим граф выполнения технологических операций, проводимых при ЧС, связанных с разрушением зданий и сооружений (рис. 1).

Каждая технологическая операция имеет четко определенную иерархию и последовательность выполнения, что гарантирует согласованность действий всех подразделений и исключает нарушение технологической логики. При этом отдельные элементы в технологической операции могут быть скорректированы в зависимости от характера и масштаба ЧС, что позволяет гибко адаптировать процесс ликвидации к реальной оперативной обстановке.

На основе представленного на рис. 1 графа построена диаграмма Ганта ликвидации ЧС с указанием длительности операций и времени ликвидации ЧС (рис. 2).

Используем алгоритм Кана к задаче применения сил, привлекаемых для ликвидации ЧС, связанной с разрушением здания, что открывает возможности интеграции структурного анализа и оптимизационного моделирования, формируя основу для интеллектуальных подсистем поддержки решений в МЧС России. В отличие от традиционных методов линейного или динамического программирования, он ориентирован на структурно-логическое описание процессов и способен быстро адаптироваться к изменению параметров модели применения привлекаемых

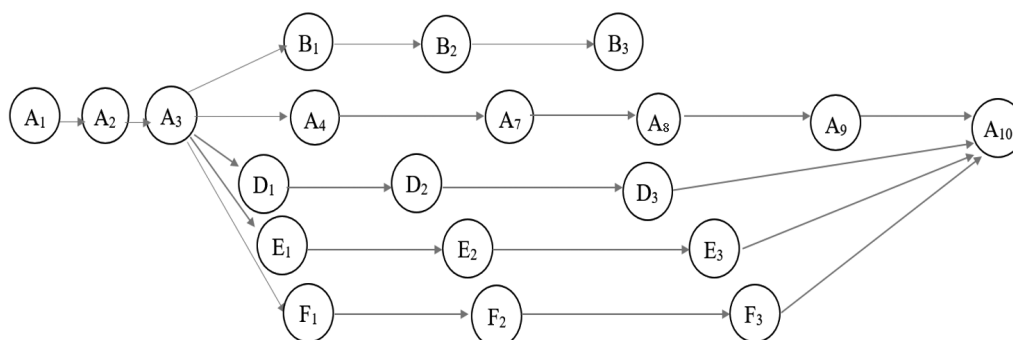


Рис. 1. Граф выполнения технологических операций, по ликвидации ЧС, связанных с разрушением зданий и сооружений: A_1-A_3 — организация разведки в зоне ЧС, оценка обстановки и прогнозирование ее развития; A_4-A_{10} — укрепление или обрушение неустойчивых конструкций, поиск пострадавших, разборка завалов, деблокирование, вскрытие разрушенных, поврежденных, заваленных зданий, и спасение находящихся в них людей, извлечение пострадавших из разрушенных элементов зданий и сооружений и др.; B_1-B_3 — тушение пожара на участках ввода сил и средств; D_1-D_3 — локализация аварий на газовых сетях; E_1-E_3 — локализация аварий на электрических сетях; F_1-F_3 — локализация аварий на водопроводно-канализационных (тепловых) сетях

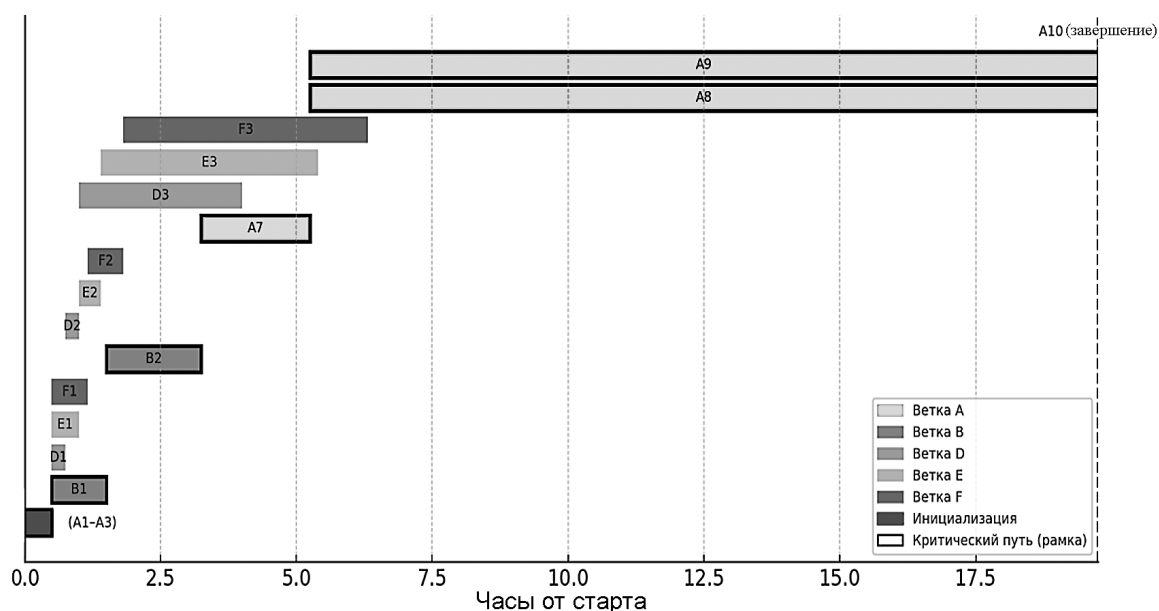


Рис. 2. Диаграмма Ганта технологических операций ликвидации ЧС, связанной с разрушением зданий и сооружений

сил ликвидации ЧС. Данный подход полностью соответствует концепции «единого цифрового пространства управления рисками», ориентированного на автоматизацию планирования, синхронизацию привлекаемых сил и средств, и прогнозирование сценариев реагирования в реальном времени ликвидации ЧС.

В научных трудах зарубежных и отечественных исследователей [7–10] отмечается эффективность топологических методов в задачах распределения ресурсов при множественных временных и пространственных ограничениях.

Настоящее исследование направлено на обоснование возможностей интеграции алгоритма Кана в модель распределения привлекаемых сил ликвидации ЧС, связанной с разрушениями зданий и сооружений, что позволяет объединить последовательность и временную оптимальность в едином математическом контуре управления.

Для практической реализации алгоритма Кана в управлении ликвидацией ЧС, связанной с разрушением зданий и сооружений, разработана математическая модель оптимального распределения ресурсов.

Пусть имеется:

$$Z = \{z_{1\text{фп}}, z_{2\text{зд}}, z_{3\text{этаж}}, z_{4\text{кон}}, z_{5\text{нис}}, z_{6\text{ст.р}}, \dots, z_f, \dots, z_k\} —$$

множества характеристик разрушенного здания, на котором необходимо выполнить АСР в ходе ликвидации ЧС:

$z_{1\text{фп}}$ — функциональное предназначение;

$z_{2\text{зд}}$ — вид объекта;

$z_{3\text{этаж}}$ — этажность строения;

$z_{4\text{кон}}$ — конструктивные особенности;

$z_{5\text{нис}}$ — наличие инженерных систем;

$z_{6\text{ст.р}}$ — степень разрушения;

z_f — характеристика разрушенного здания;

k — характеристики разрушений;

$N = \{n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_p\}$ — множества видов работ (технологических операций), которые необходимо выполнить в ходе ликвидации ЧС: тушение пожара, вскрытие, разбор, инженерная стабилизация и т.д.;

n_i — наименование i -й работы;

p — виды работ, $i = \overline{1, N}$;

$W = \{w_1, w_2, \dots, w_q, \dots, w_y\}$ — множества подразделений привлекаемых сил ликвидации ЧС: МЧС, МВД, войска национальной гвардии (ВНГ), аварийно-спасательные службы (АСС) и др.;

w_q — наименование q -го подразделения;

y — виды подразделений; $q = \overline{1, W}$;

$M = \{m_1, m_2, \dots, m_j, \dots, m_d\}$ — множества спасательных звеньев в привлекаемых подразделениях для проведения АСР: ГДЗС, инженерные, спасательные и др.;

m_j — j -е спасательное звено;

d — виды звеньев; $j = \overline{1, M}$;

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n\}$ — объем работ, (разбор завалов, м³; тушение пожара, м²);

v_i — объем i -й работы;

\overline{n} — работы в технологической операции; $v = \overline{1, V}$;

$U = \{u_1, u_2, \dots, u_h, \dots, u_n\}$ — множества участков проведения работ: подъезд здания, секция, завал и др.;

u_h — наименование h -го участка;

\overline{n} — виды участков проведения работ; $h = \overline{1, U}$;

$P = \{p_{1,j,i}^q, p_{2,j,i}^q, \dots, p_{j,i}^q, \dots, p_{j,i}^y\}$ — производительность j -го звена при выполнении i -й работы (разбор завалов, чел. час.; тушение пожара, м²);

$p_{j,i}^q$ — наименование q -го подразделения;

y — виды подразделений;

$G = \{g_1, g_2, \dots, g_r, \dots, g_v\}$ — последовательность выполнения спасательной операции, то есть АСР; $r = \overline{1, G}$.

Необходимо распределить все спасательные звенья между всеми работами и определить порядок перемещения привлекаемых сил между работами в технологической операции, таким образом, чтобы время выполнения всего комплекса работы по ликвидации ЧС, было минимальным.

$$T_{\text{ликв}} = f(Z, W, M, U, P, N, V) \rightarrow \min_{W, N};$$

$$T_{\text{ликв}} = t_{\text{ТО1}} + t_{\text{ТО2}} + t_{\text{ТО3}} + \dots + t_{\text{ТО}n},$$

где $t_{\text{ТО}}$ — время выполнения технологической операции, при следующих ограничениях и допущениях:

$$\sum_{i=1}^i x_{j,i}(t) \leq 1 — \text{спасательное звено } j \text{ прив-}$$

лекаемых сил ликвидации ЧС в каждый момент времени t может выполнять не более одной работы в технологической операции, либо не выполняет никакую, где $x_{j,i}$ — бинарная переменная, равная 1, если i -я работа выполняется j -м подразделением, и 0 в противном случае. Ограничение обеспечивает корректность распределения задач и соблюдение топологических зависимостей;

$$\sum_{j=1}^j x_{j,i}(t) \geq 1 — \text{каждая последующая } i\text{-я ра-}$$

бота в технологической операции на момент времени t может выполняться как одним или несколькими спасательными звеньями, привлекаемых сил ликвидации ЧС, так и не выполняться.

Следует отметить, что в научных трудах [11–13] подробно рассматриваются методы линейного и нелинейного программирования, включая симплекс-метод, геометрический метод и метод Франка-Вульфа, как эффективные способы решения задач оптимизации. Однако, в отличие от этих подходов, алгоритм Кана не ограничивается поиском экстремума функции, а обеспечивает сохранение логической структуры взаимозависимостей между технологическими операциями, что делает его особенно полезным при динамическом распределении сил в условиях ЧС.

Решение данной задачи обеспечивает минимизацию общего времени реагирования T , при

этом последовательность выполнения АСДНР в технологических операциях определяется алгоритмом Кана. Такой подход позволяет согласовать логическую и временную составляющие процесса планирования [11].

После построения топологической структуры с помощью алгоритма Кана осуществляется временной анализ, который обеспечивает расчет ключевых временных характеристик: ранних и поздних сроков начала и окончания операций, а также резервов времени.

Проведем решение задачи с использованием алгоритма Кана при заданных:

1. $V = 120, 80, 150, 60, 90$ — объемы работы.

2. $P_{j,i}$ — производительность j -го спасательного звена привлекаемых сил ликвидации ЧС для выполнения i -й работы (тушение пожара, м²; вскрытие заблокированных помещений, чел.·час; укрепление и обрушение элементов конструкций зданий и сооружений, представляющих угрозу для пострадавших и спасателей чел.·час; разбор завалов, м³; локализация аварий на коммунально-энергетических сетях чел.·час; спасание пострадавших чел.·час (табл. 1).

3. G — последовательность выполнения работ в технологической операции, представлена матрицей смежности для ориентированного невзвешенного графа: 1→3; 2→3; 2→5; 3→4 (табл. 2 и рис. 3).

Таблица 1

Производительность спасательных звеньев выполнения работ при ликвидации ЧС

№	Производительность, чел.·час	Виды работ				
		1	2	3	4	5
1	Первое звено	10	9	12	8	7
2	Второе звено	8	11	9	10	9
3	Третье звено	7	8	10	12	11
4	Четвертое звено	9	10	8	9	12

Таблица 2

Процесс выполнения взаимосвязанной работы

Вершина	Степень
1	0
2	0
3	2-1=1
4	1
5	1

Таблица 3

Процесс выполнения взаимосвязанной работы

Вершина	Степень
2	0
3	1-1=0
4	1
5	1-1=0

Таблица 4

Процесс выполнения взаимосвязанной работы

Вершина	Степень
3	0
4	1-1=0
5	0

Таблица 5

Процесс выполнения взаимосвязанной работы

Вершина	Степень
4	0

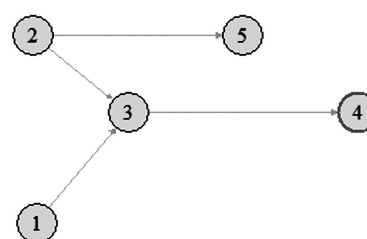


Рис. 3. Сетевой график выполнения работ n -ой технологической операции:

1 — установка боковых опор; 2 — выравнивание отклонений и прогибов стен; 3 — прикрепление выровненных стен; 4 — установка крепи; 5 — связывание продольных и поперечных стен

Рассмотрим такую технологическую операцию, как укрепление неустойчивых элементов конструкций, представляющих угрозу жизни для пострадавших и спасателей при ЧС, связанной с разрушением здания (рис. 3).

Решение задачи.

Шаг 1. Проводим линейное упорядочивание вершин ориентированного графа G по выполнению привлекаемыми силами АСДНР работ (рис. 3).

Находим все вершины с нулевой входящей степенью (то есть те, в которые не входят стрелки), добавляем их в очередь выполнения предшествующих и последующих работ технологической сети. Удаляем вершину из графа, уменьшая входящие степени ее соседей. Повторяем процесс выполнения взаимосвязанной работы, пока не обработаем все вершины (табл. 2–5).

Результат: топологическая сортировка выполнения АСДНР 1→2→3→5→4. В этой последовательности будем назначать исполнителей из числа спасательных звеньев привлекаемых сил ликвидации ЧС.

Шаг 2.

2.1. Момент времени 0 часов. Все спасательные звенья из числа привлекаемых сил ликвидации ЧС свободны. Назначаем исполнителей из числа спасательных звеньев на выполнение первой и второй работ технологической операций (табл. 6).

Используем время завершения работы $i = 2$, равное $t_2 = 4,21$ часа, для квантования общего времени и остаточных объемов работ. Рассчитаем, какие объемы остались у каждой работы (табл. 7).

2.2. Момент времени 4,21 часа. К этому моменту освободились спасательные звенья $i = 2$ и 3. Они способны выполнить еще незавершенную работу $i = 1$ (табл. 8).

Используем время завершения первой работы $i = 1$, равное $t_1 = 5,38$ часа, для квантования общего времени и остаточных объемов последующих работ технологической операции.

Рассчитаем, какие объемы остались у последующих работ (табл. 9).

2.3. Момент времени $t_1 = 5,38$ часа. Все спасательные звенья свободны. В топологической сортировке после работ $i = 1$ и 2 следует работа $i = 3$, на которую можно назначить все спасательные звенья сразу (табл. 10).

Используем время завершения работы $i = 3$, равное $t_3 = 9,22$ часа, для квантования общего времени выполнения третьей работы и остаточных объемов последующих работ (табл. 11).

Таблица 6

Назначение исполнителей из числа спасательных звеньев

Работа, объем	Исполнители, их производительность, P_{ij}				Оценка времени
$i = 1$ (120 ч)	$P_{1,1} = 10$	–	–	$P_{4,1} = 9$	$t_1 = 120/19 = 6,31$ часа
$i = 2$ (80 ч)	–	$P_{2,2} = 11$	$P_{3,2} = 8$	–	$t_2 = 80/19 = 4,21$ часа

Таблица 7

Виды работ и их объем

$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
$V_1 = 120 - (19 \cdot 4,21) = 40,01$	$V_2 = 0$	$V_3 = 150$	$V_4 = 60$	$V_5 = 90$

Таблица 8

Назначение исполнителей из числа спасательных звеньев

Работа, объем	Исполнители, их производительность, P_{ij}				Оценка времени
$i = 1$ (40,01 ч)	$P_{1,1} = 10$	$P_{2,1} = 8$	$P_{3,1} = 7$	$P_{4,1} = 9$	$t_1 = t_2 + 40,01/34 = 5,38$ часа

Таблица 9

Виды работ и их объем

$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
$V_1 = 0$	$V_2 = 0$	$V_3 = 150$	$V_4 = 60$	$V_5 = 90$

Таблица 10

Назначение исполнителей из числа спасательных звеньев

Работа, объем	Исполнители, их производительность, P_{ij}				Оценка времени
$i = 3$ (150 ч)	$P_{1,3} = 12$	$P_{2,3} = 9$	$P_{3,3} = 10$	$P_{4,3} = 8$	$t_3 = t_1 + 150/39 = 5,38 + 3,84 = 9,22$ часа

Таблица 11

Виды работ и их объем

$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
$V_1 = 0$	$V_2 = 0$	$V_3 = 0$	$V_4 = 60$	$V_5 = 90$

2.4. Момент времени $t_3 = 9,22$ часа. Все привлекаемые силы завершили третью работу. В топологической сортировке после работы $i = 3$ следует работа $i = 5$ на которую можно назначить все спасательные звенья одновременно (табл. 12).

Используем время завершения $i = 5$ работы, равное $t_5 = 11,52$ часа, для квантования оставшегося времени. Рассчитаем, какие объемы остались у последующих работ (табл. 13).

2.5. Момент времени 11,52 час. Все спасательные звенья свободны. В топологической сортировке после работы $i = 5$ следует работа $i = 4$, на выполнение которой следует назначить все привлекаемые силы сразу (табл. 14).

Все работы АСДНР завершены (табл. 15).

2.6. Момент времени 13,05 час — завершение всего комплекса работ технологической операций.

Шаг 3. Формируем сводный план назначения спасательных звеньев из числа привлекаемых сил ликвидации ЧС на выполнение работ n -ой технологической операций (табл. 16).

Был выполнен сравнительный анализ двух вариантов выполнения технологических операций, входящих в структуру сетевого графа организации АСР (рис. 4).

Первый, классический вариант выполнения АСДНР, при котором общая продолжительность выполнения работ составила 20,19 часа.

Второй вариант с использованием алгоритма Кана, моделирует сценарий оперативной обстановки, при котором общая продолжительность выполнения АСДНР равна 13,05 час. Что означает сокращение времени АСДНР на 35 %.

Предложенный подход обеспечивает уменьшение времени АСДНР и уточнения планов лик-

Таблица 12

Назначение спасателей из числа спасательных звеньев

Работа, объем	Исполнители, их производительность, P_{ij}				Оценка времени
$i = 5$ (90 ч)	$P_{1,5} = 7$	$P_{2,5} = 9$	$P_{3,5} = 11$	$P_{4,5} = 12$	$t_5 = t_3 + 90/39 = 9,22 + 2,30 = 11,52$ часа

Таблица 13

Виды работ и их объем

$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
$V_1 = 0$	$V_2 = 0$	$V_3 = 0$	$V_4 = 60$	$V_5 = 0$

Таблица 14

Назначение спасателей из числа спасательных звеньев

Работа, объем	Исполнители, их производительность, P_{ij}				Оценка времени
$i = 4$ (60 ч)	$P_{1,5} = 8$	$P_{2,5} = 10$	$P_{3,5} = 12$	$P_{4,5} = 9$	$t_4 = t_5 + 60/39 = 11,55 + 1,53 = 13,09$ часа

Таблица 15

Виды работ и их объем

$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
$V_1 = 0$	$V_2 = 0$	$V_3 = 0$	$V_4 = 0$	$V_5 = 0$

Таблица 16

Формирование сводного плана назначения спасательных звеньев

Диапазон времени, час	Назначенные привлекаемые силы ликвидации ЧС				
	работа 1	работа 2	работа 3	работа 4	работа 5
0–4,21	1, 4	2, 3			
4,21–5,38	1, 2, 3, 4				
5,38–9,22			1, 2, 3, 4		
9,22–11,52					1, 2, 3, 4
11,52–13,05				1, 2, 3, 4	

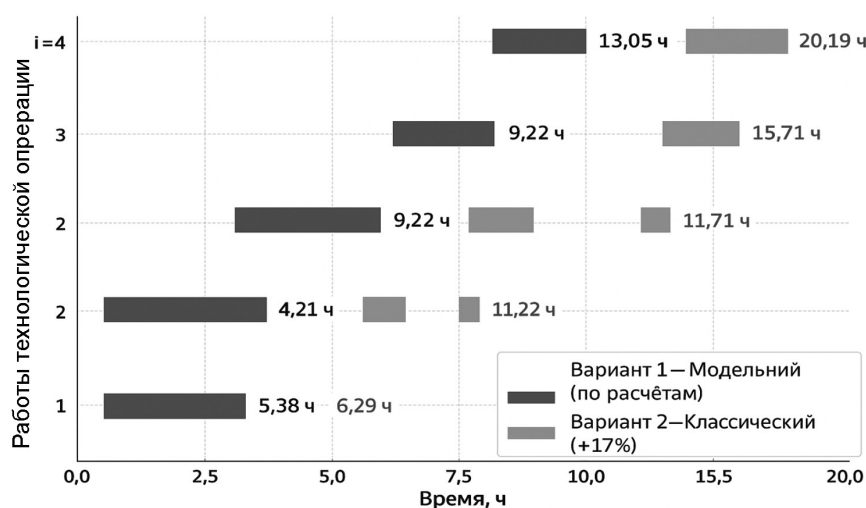


Рис. 4. Диаграмма сравнения классического и модельного вариантов выполнения работ

видации ЧС при изменении условий оперативной обстановки.

Научная новизна работы заключается в адаптации алгоритма Кана к условиям динамической оптимизации распределения ресурсов при проведении АСДНР, включая возможность учета стохастических факторов, временных задержек и вероятности отказов. В отличие от классических методов линейного программирования, предложенная модель обладает когнитивными свойствами — она позволяет адаптировать проведение АСДНР к изменениям внешних условий, сохраняя при этом структурную целостность сетевой модели. Это делает ее особенно перспективной для построения цифровых двойников систем управления и рационального распределения привлекаемых сил ликвидации ЧС.

Практическая значимость работы заключается в возможности внедрения разработанных подходов в автоматизированные системы управления МЧС России и региональных центров реагирования для оптимизации системы управления сил привлекаемых для ликвидации ЧС. Проведение расчетов АСДНР с использованием алгоритма Кана позволяет повысить точность временной координации действий привлекаемых подразделений единой государственной системы предупреждения и ликвидации ЧС, минимизировать риски дублирования задач и оптимизировать использование привлекаемых сил средств.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением модели за счет интеграции эвристических и стохастических алгоритмов по проведению АСДНР в условиях неопределенности. Таким образом, предложенный подход формирует методологическую основу для построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений и рационального варианта применения привлекаемых сил ликвидации ЧС, связанной с разрушением зданий и сооружений.

Список источников

1. Маштаков В.А., Кондашов А.А., Удацкова Е.Ю., Бобринев Е.В. Подходы к оценке эффективности деятельности сил и средств РСЧС // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2020. № 4 (47). С. 71–76.
2. Рыбаков А.В., Иванов Е.В., Хидирлясов Т.М. и др. Методический подход к формированию модели оценки эффективности проведения аварийно-спасательных работ при разрушении зданий // Технологии гражданской безопасности. 2023. Т. 20, № 2 (76). С. 57–66.
3. Родичев В.А. Математические модели и алгоритмы для автоматизированного управления процессами ликвидации чрезвычайных ситуаций: специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)»: дисс. на соис. уч. степени канд. физ.-мат. наук. Саратов, 2006. 167 с.

4. Полякова Н.М. Оптимизация процессов оперативного реагирования сил и средств МЧС России на чрезвычайные ситуации с применением методов исследования операций // *Мировая наука*. 2022. № 1 (58). С. 142–148.

5. Хидирлясов Т.М., Рыбаков А.В., Иванов Е.В. и др. О методике обоснования рационального варианта распределения сил гражданской обороны для проведения аварийно-спасательных работ при разрушении зданий // *Технологии гражданской безопасности*. 2023. Т. 20, № 4 (78). С. 16–25.

6. Рыбаков А.В., Иванов Е.В., Петренко П.П. и др. Задача обоснования рациональных параметров оповещения спасателей при проведении аварийно-спасательных работ // *Технологии гражданской безопасности*. 2024. Т. 21, № 3 (81). С. 101–106.

7. Kahn A.B. Topological sorting of large networks // *Communications of the ACM*. 1962. Vol. 5 (11). Pp. 558–562.

8. Каменецкая Н.В., Медведева О.М., Голубчикова А.А. и др. Оптимизация процессов оперативного реагирования сил и средств МЧС России на чрезвычайные ситуации с применением метода последовательного анализа // *Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности*; сб. науч. ст. по итогам VII Межд. науч. конф., Казань, 30–31 июля 2020 года. Ч. 1. Казань: «КОНВЕРТ», 2020. С. 45–49.

9. Шарипов Г.А., Мазаник А.И., Рыбаков А.В. Анализ проблемной ситуации применения сил при проведении аварийно-спасательных работ в условиях разрушения зданий и сооружений // *Технологии гражданской безопасности*. 2025. Т. 22, № 3 (85). С. 45–50.

10. Заворотный А.Г., Кострубицкий А.А., Ломакин М.И. Модель оценки эффективности мероприятий защиты населения в чрезвычайных ситуациях техногенного характера / *Гражданская оборона на страже мира и безопасности* // *Материалы VIII МНПК, посвященной Всемирному дню гражданской обороны: в 5-ти частях*, Москва, 01 марта 2024 года. М.: Академия Государственной противопожарной службы, 2024. С. 175–181.

11. Бахтиярова О.Н., Птицына И.В., Подзорова М.И. Применение симплекс-метода для решения задач линейного программирования в курсе дисциплин «Исследование операций»

и «Методы оптимизации» // *Modern European Researches*. 2023. Т. 1, № 3. С. 5–16.

12. Самороковский А.Ф. Модель оптимального распределения ресурса оперативным штабом при проведении эвакуации в условиях возникновения чрезвычайной ситуации // *Вестник Воронежского института МВД России*. 2021. № 1. С. 122–130.

13. Пархомчик Э.А., Пономарев А.И. Комплексная методика обоснования рациональной группировки сил и средств, привлекаемой для ликвидации чрезвычайной ситуации в военное время // *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты*. 2019. № 2 (41). С. 61–68.

References

1. Mashtakov V.A., Kondashov A.A., Udavczova E.Yu., Bobrinev E.V. Podxody` k ocenke e`ffektivnosti deyatel`nosti sil i sredstv RSChS // *Nauchny`e i obrazovatel`ny`e problemy` grazhdanskoj zashchity`*. 2020. No 4 (47). Pp. 71–76.

2. Ry`bakov A.V., Ivanov E.V., Xidirlyasov T.M. et al. Metodicheskij podxod k formirovaniyu modeli ocnki e`ffektivnosti provedeniya avarijno-spasatel`ny`x rabot pri razrushenii zdaniy // *Texnologii grazhdanskoj bezopasnosti*. 2023. Vol. 20, No 2(76). Pp. 57–66.

3. Rodichev V.A. Matematicheskie modeli i algoritmy` dlya avtomatizirovannogo upravleniya processami likvidacii chrezvy`chajny`x situacij: special`nost` 05.13.01 «Sistemny`j analiz, upravlenie i obrabotka informacii (po otraslyam)»: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata fiziko-matematicheskix nauk. Saratov, 2006. 167 p.

4. Polyakova N.M. Optimizaciya processov operativnogo reagirovaniya sil i sredstv MChS Rossii na chrezvy`chajny`e situacii s primeneniem metodov issledovaniya operacij // *Mirovaya nauka*. 2022. No 1 (58). Pp. 142–148.

5. Xidirlyasov T.M., Rybakov A.V., Ivanov E.V. O metodike obosnovaniya racional`nogo varianta raspredeleniya sil grazhdanskoj oborony` dlya provedeniya avarijno-spasatel`ny`x rabot pri razrushenii zdaniy // *Texnologii grazhdanskoj bezopasnosti*. 2023. Vol. 20, No 4 (78). Pp. 16–25.

6. Ry`bakov A.V., Ivanov E.V., Petrenko P.P. et al. Zadacha obosnovaniya racional`ny`x parametrov opoveshheniya spasatelej pri provedenii avari-

jno-spasatel'ny'x rabot // *Texnologii grazhdanskoj bezopasnosti*. 2024. Vol. 21, No 3 (81). Pp. 101–106.

7. Kahn A.B. Topological sorting of large networks // *Communications of the ACM*. 1962. Vol. 5 (11). Pp. 558–562.

8. Kameneczkaya N.V., Medvedeva O.M., Golubchikova A.A. et al. Optimizaciya processov operativnogo reagirovaniya sil i sredstv MChS Rossii na chrezvy'chajny'e situacii s primeneniem metoda posledovatel'nogo analiza // *Prioritetny'e napravleniya innovacionnoj deyatel'nosti v promy'shlennosti: Sbornik nauchny'x statej po itogam VII mezhd. konf., Kazan', 30–31.07.2020*. P. 1. Kazan': «KONVERT», 2020. Pp. 45–49.

9. Sharipov G.A., Mazanik A.I., Ry'bakov A.V. Analiz problemnoj situacii primeneniya sil pri provedenii avarijno-spasatel'ny'x rabot v usloviyax razrusheniya zdaniy i sooruzhenij // *Texnologii grazhdanskoj bezopasnosti*. 2025. Vol. 22, No 3 (85). Pp. 45–50.

10. Zavorotny'j A.G., Kostrubiczkij A.A., Lomakin M.I. Model' ocenki e'ffektivnosti meropriyatij zashhity naseleniya v chrezvy'chajny'x situa-

ciyax texnogenno go xaraktera // *Grazhdanskaya oborona na strazhe mira i bezopasnosti: Materialy' VIII MNPK, posvyashhennoj Vsemirnomu dnyu grazhdanskoj oborony'*: in 5 p., Moskva, 01/03/2024. Moskva: Akademiya Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby', 2024. Pp. 175–181.

11. Baxtiyarova O.N., Pticya I.V., Podzorova M.I. Primenenie simpleks-metoda dlya resheniya zadach linejnogo programmirovaniya v kurse disciplin «Issledovanie operacij» i «Metody optimizacii» // *Modern European Researches*. 2023. Vol. 1, No 3. Pp. 5–16.

12. Samorokovskij A.F. Model' optimal'nogo raspredeleniya resursa operativny'm shtabom pri provedenii e'vakuacii v usloviyax vozniknoveniya chrezvy'chajnoj situacii // *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii*. 2021. No 1. Pp. 122–130.

13. Parxomchik E'.A., Ponomarev A.I. Kompleksnaya metodika obosnovaniya racional'noj gruppirovki sil i sredstv, privlekaemoj dlya likvidacii chrezvy'chajnoj situacii v voennoe vremya // *Nauchny'e i obrazovatel'ny'e problemy' grazhdanskoj zashhity*. 2019. No 2 (41). Pp. 61–68.

УДК 621.395.622

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_87

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ МНОЖЕСТВЕННЫМ ДОСТУПОМ
К ШИРОКОПОЛОСНОЙ СЕТИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ
ИТЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ВЕЩАНИЯ АБОНЕНТОВ**

**IMPROVING MULTIPLE ACCESS MANAGEMENT TO A BROADBAND
SATELLITE COMMUNICATIONS NETWORK BASED ON AN ITERATIVE
ESTIMATION OF THE SUBSCRIBERS' BROADCAST PROBABILITY**

М.С. Парфенов, В.А. Фукалов, А.А. Безкоровайный

M.S. Parfenov, V.A. Fukalov, A.A. Bezkorovainyi

Военная академия связи им. С.М. Буденного

Рассмотрена актуальная задача повышения эффективности управления доступом абонентов к широкополосной сети спутниковой связи (ШССС) в условиях массовой одновременной активации терминалов. Рассмотрена задача увеличения временных параметров установления соединения при входе в сеть при большом числе коллизий, при ограниченном количестве слотов, выделяемых для подключения новых устройств. Предложен новый механизм доступа в сеть, основанный на адаптивном перераспределении ресурсов за счет итеративной оценки числа одновременно входящих терминалов и динамического расчета вероятности передачи данных каждым из них. Полученные результаты имеют практическую значимость для модернизации существующих и разработки перспективных систем спутниковой связи военного назначения, ориентированных на поддержку автономных и роботизированных средств в условиях сетецентрической войны.

Ключевые слова: сеть спутниковой связи, управление доступом, абоненты, адаптивное распределение ресурсов, функция предсказания.

The current task of increasing the efficiency of controlling subscribers' access to the broadband satellite communications network (BSCN) in conditions of mass simultaneous activation of terminals is considered. The problem of increasing the time parameters for establishing a connection at the entrance to the network with a large number of collisions and a limited number of slots allocated for connecting new devices is considered. A new network access mechanism based on adaptive resource redistribution is proposed by iteratively estimating the number of simultaneous incoming terminals and dynamically calculating the probability of data transmission by each of them. The results obtained are of practical importance for the modernization of existing and the development of promising military satellite communication systems focused on supporting autonomous and robotic assets in a network-centric war.

Keywords: satellite communication network, access control, subscribers, adaptive resource allocation, prediction function.

Введение

За последние годы наблюдается активное проявление основных признаков «сетевцентрической войны», заключающихся в широкой возможности использования географически распределенной силы, непрерывном отслеживании положения всех наземных подвижных и стационарных объектов на всем театре военных действий, применении «знаний», полученных от всеохватывающего наблюдения за боевым пространством и расширенного понимания намерений командования противоборствующей стороны, наличии достаточно эффективных, построенных на единых принципах управления средств каналообразования и телекоммуникации между объектами (субъектами), выполняющими боевые задачи [2, 9].

Своевременность и интенсивность обмена данными в ШССС становятся одними из важнейших задач, к которым предъявляется широкий ряд требований. При этом становится актуальным решение задачи повышения своевременности доставки сообщений путем оптимизации управления доступом к сети [4].

На физическом и канальном уровнях подобные сети уже сегодня оснащены множеством отработанных технологий, обеспечивающих высокую помехоустойчивость и эффективность передачи данных [8]. Однако на сетевом уровне, особенно в части управления множественным доступом, сохраняется ряд недостатков, связанных с неэффективным распределением ограниченных ресурсов канала при массовом одновременном подключении терминалов. В условиях боевых действий, где каждая секунда имеет стратегическое значение, задержки при установлении соединения могут привести как к срыву выполнения боевых задач, так и к потере контроля и управления над отдельными элементами системы.

В связи с этим особую значимость приобретает разработка и внедрение адаптивных механизмов управления доступом, способных оперативно реагировать на изменение количества активных и неактивных корреспондентов и обеспечивать своевременное подключение новых терминалов к сети без значительного роста коллизий и временных затрат.

Таким образом, статья посвящена исследованию и совершенствованию подсистемы управ-

ления доступом, ориентированной на динамическую оценку числа входящих терминалов и адаптивное перераспределение ресурсов в процессе функционирования сети.

Актуальность работы обусловлена взаимосвязанными факторами, определяющими вектор развития современных Вооруженных сил. Во-первых, прогнозируется значительный рост количества роботизированных и беспилотных систем, задействованных в специальных операциях. Эти средства, как правило, функционируют в составе распределенных группировок и требуют постоянного обмена данными с командными пунктами и между собой. Во-вторых, в условиях высокой интенсивности боевых действий возможны массовые одновременные активации ранее неактивных терминалов, например, при переходе из режима ожидания к выполнению специальных задач или при восстановлении связи после ее временного нарушения. В таких сценариях традиционные протоколы множественного доступа (например, ALOHA или его модификации) демонстрируют крайне низкую эффективность из-за резкого роста коллизий в ограниченном числе слотов, выделяемых для входа новых терминалов [1, 6].

Особенно остро этот фактор проявляется в архитектурах спутниковых сетей с фиксированной структурой кадра, где ресурсы на вход новых пользователей выделяются заранее и в минимальном объеме [10]. При этом ни терминалы, ни центральный узел (хаб) не обладают априорной информацией о количестве одновременно активирующихся устройств, что делает невозможным оптимальное планирование доступа. В результате среднее время установления соединения может возрастать в разы, что противоречит требованиям к своевременности и надежности управления в современных военных системах [11].

Следовательно, разработка адаптивных механизмов управления доступом, способных в реальном времени оценивать нагрузку и динамически корректировать параметры передачи данных (в частности — вероятность инициации передачи), становится крайне необходимой мерой повышения боевой эффективности и устойчивости всей системы связи. Это особенно важно в контексте десятилетней перспективы развития Вооруженных сил, где предполагается массовое внедрение

интеллектуальных, самоорганизующихся и автономных систем, требующих гибкой и масштабируемой инфраструктуры связи.

Цель работы — исследование и совершенствование подсистемы управления множественным доступом абонентов к широкополосной сети спутниковой связи, основанной на адаптивном перераспределении ресурсов в процессе функционирования. Предлагаемый подход позволит ввести механизм итеративной оценки числа одновременно входящих терминалов на стороне каждого устройства с последующим динамическим расчетом вероятности передачи в слоте входа. В результате решения данной задачи, количество коллизий, полученных за счет приближения математического ожидания числа передающих терминалов к количеству доступных слотов будет минимальным.

В рамках работы также ставится задача сравнительного анализа различных функций предсказания числа активных терминалов — от линейных до степенных (с точки зрения скорости сходимости, устойчивости к переоценке нагрузки и общей эффективности подключения). Особое внимание уделяется двухэтапной стратегии: на первом этапе обеспечивается максимально быстрое получение хотя бы одним терминалом слота для передачи информации хабу о предсказанной нагрузке; на втором — осуществляется массовое подключение всех терминалов при скорректированном числе выделенных слотов.

Механизм итеративного предсказания нагрузки для снижения коллизий при входе в сеть

В ситуациях (стационарных), когда основная часть кадра занята активными терминалами для вещания, для входа неактивных терминалов выделяется минимум слотов. В этом случае при одновременной (или почти одновременной) активации большого количества терминалов из числа неактивных необходимо избежать большого числа «коллизий» при малом числе выделенных под вход слотов. Как следствие, в системе будет наблюдаться резкое увеличение времени входа каждого отдельного терминала, причем неограниченное.

Одной из основных причин возникновения рассмотренной ситуации является неполная ин-

формативность каждой из сторон общего числа одновременно входящих терминалов [3].

Для решения данной задачи в статье предлагается модифицировать существующую подсистему управления множественного доступа [5] (рис. 1) путем добавления оценки в слот для входа вероятности вещания каждого терминала. Цель модификации заключается в том, чтобы позволить каждому терминалу итеративно оценивать вероятности вещания и, тем самым, приближаться к реальному числу одновременно входящих терминалов. Такой подход позволит вычислять вероятность собственного вещания в реальном режиме времени. Главным признаком того, что предсказанное число является верным или хотя бы приблизительно верным (находится в некоторой малой окрестности искомого числа), является событие, при котором терминал успешно занял слот для входа. Данная вероятность вещания вычисляется исходя из условия: ожидаемое число вещающих терминалов должно с максимальной эффективностью занимать все слоты для входа.

Исходя из таких условий, задача модификации подсистемы управления множественного доступа через вероятность вещания и вероятность не вещания сводится к получению итогового числа вещающих терминалов, которое будет

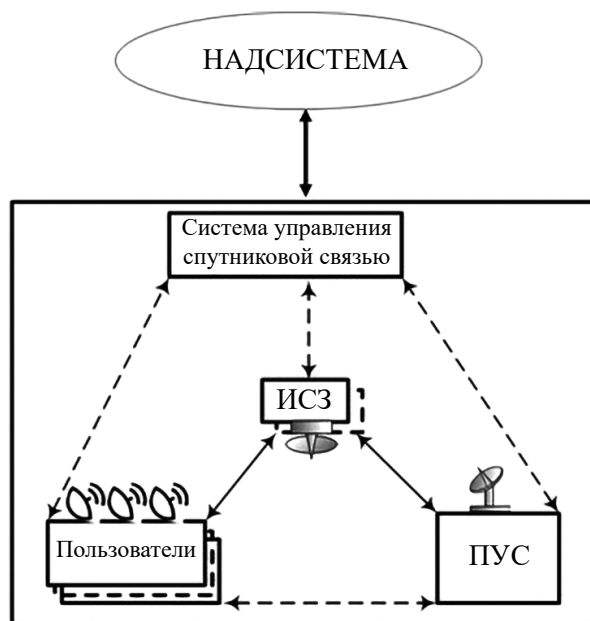


Рис. 1. Существующая подсистема управления множественного доступа

приближаться к биномиальному распределению (распределение не будет полностью соответствовать биномиальному, так как предсказания числа одновременно входящих терминалов, на которых будет основан расчет вероятности вещания, могут быть неодинаковы для каждого отдельного терминала, но в силу признака остановки, они будут к нему сходитьсь).

Поэтому оценка общего числа вещающих терминалов n может быть выражена через математическое ожидание биномиального распределения:

$$E(n) = p_{\text{вещ}} \cdot N,$$

где $p_{\text{вещ}}$ — вероятность вещания терминала, а N — общее число терминалов, которые одновременно пытаются войти в сеть.

Максимальное число терминалов, удачно занявших слот для входа, достигается тогда, когда число одновременно вещающих терминалов равняется числу выделенных под вход слотов [7, 8]. Следовательно, для максимальной эффективности входа терминалов в сеть математическое ожидание числа вещающих терминалов должно равняться числу K выделенных под вход слотов:

$$E(n) = K;$$

$$p_{\text{вещ}} \cdot N = K.$$

Значит, оценка вероятности вещания каждого из терминалов должна со временем стремиться к числу:

$$p_{\text{вещ}} = \frac{K}{N}.$$

Это приводит к следующей общей формуле для вероятности вещания:

$$p_{\text{вещ}} = \frac{K}{N_{\text{пред}}(f)},$$

где $N_{\text{пред}}(f)$ — функция предсказания числа одновременно входящих терминалов, зависящая от f — количества кадров, в которые функция не смогла занять слот для входа.

При этом эта функция должна удовлетворять следующим условиям:

$$\lim_{f \rightarrow \infty} (N_{\text{пред}}(f)) = N;$$

$$N_{\text{пред}}(f) \geq K, \quad \forall f \geq 0.$$

При выборе функции предсказания числа одновременно входящих терминалов первым делом необходимо рассмотреть функцию линейного роста от f , где f — число кадров, в которые терминал вещал, но не смог занять слот:

$$N_{\text{пред}}(f) = K + f.$$

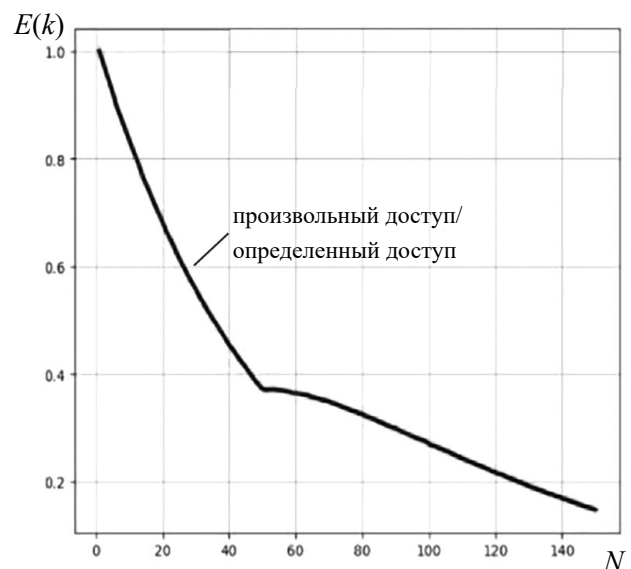
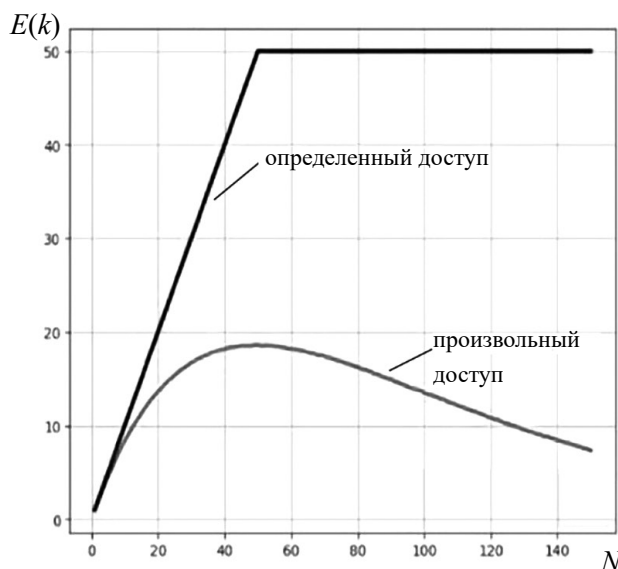


Рис. 2. Графики зависимости количества терминалов, занявших слот от общего количества

Минусами данной функции является долгая сходимость и «скатывание» влево с экстремума графика функции (обозначена как «произвольный доступ»), из-за коллизий, которые могут возникать даже при верном предсказании количества одновременно вещающих терминалов N (рис. 2).

Улучшить сходимость можно, если сделать зависимость от f не линейной, а, например, квадратичной:

$$N_{\text{пред}}(f) = K + f^2.$$

Минусом функции является более сильное «скатывание» влево с экстремума, из-за тех же коллизий и возможной переоценки числа одновременно вещающих терминалов N .

При сравнении скорости входа терминалов в сеть для двух разных функций предсказания числа одновременно входящих терминалов построим зависимость количества кадров, требуемых для получения одного слота одним терминалом при одновременном входе N терминалов, от K — количества выделенных под вход слотов.

Анализ этого показателя является важной частью оценки функции предсказания, так как при получении терминалом слота под вход появляется возможность сообщить хабу информацию о предсказанном числе одновременно входящих терминалов. Эта информация должна быть использована хабом для корректного выделения слотов под вход.

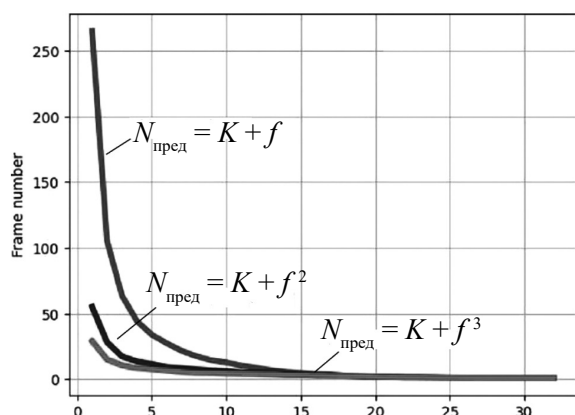


Рис. 3. Количество кадров необходимое для входа одного терминала в сеть при K выделенных слотах ($N = 100$)

Как видно из графиков высокостепенные функции предсказания очень быстро сходятся к достаточной вероятности вещания для каждого терминала, чтобы один из них смог получить свой первый слот и смог сообщить хабу предсказанное число одновременно входящих терминалов.

Далее построим зависимость количества кадров, требуемых для одновременного входа N терминалов, от K — количества выделенных под вход слотов. Будем считать, что для входа терминалам требуется успешно занять один слот (рис. 5).

Функция, обозначенная на графике как $N_{\text{пред}} = \text{точн. знач.}$, обозначает поведение, при котором каждый терминал точно знает количество вещающих терминалов в каждый момент времени. Эта функция выступает здесь в роли эталона. Чем ближе будет выбранная функция предсказания к эталону, тем она лучше.

Из графика несложно видеть минус высокостепенных функций — сильная переоценка числа одновременно вещающих терминалов. Также можно увидеть, что функция предсказания квадратичной зависимости не сильно подвержена переоценке и при этом позволяет ощутимо быстрее получить первый слот, в сравнении с функцией предсказания линейной зависимости.

Совершенствование подсистемы управления доступом заключается в выборе различных функций предсказания в зависимости от этапов входа. Есть два важных этапа: первый — получение первого слота для передачи информации

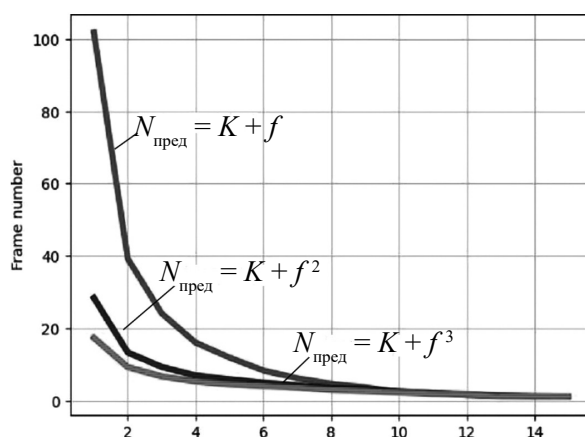


Рис. 4. Количество кадров необходимое для входа одного терминала в сеть при K выделенных слотах ($N = 50$)

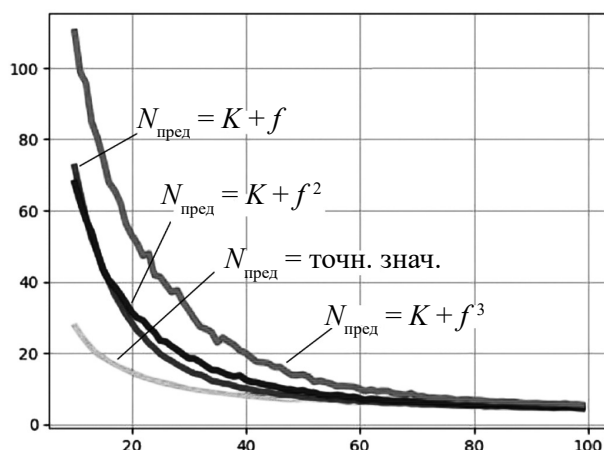


Рис. 5. Количество кадров необходимое для входа одного терминала в сеть при K выделенных слотов

хабу предсказанного числа одновременно входящих терминалов и второй — вход всех терминалов во время скорректированного хабом числа слотов для входа. Из проведенного исследования видно, что на первом этапе необходимо выбирать функции быстрого роста числа одновременно входящих терминалов (целесообразно степенные), а на втором — функции умеренного роста, как правило, линейные.

Выводы

Анализ существующей подсистемы управления доступом приводит к выводу, что в условиях резкого увеличения числа абонентов, участвующих в боевых действиях, и их зависимости от единого информационно-телекоммуникационного пространства, обеспечение своевременного и надежного доступа к широкополосной сети спутниковой связи становится критически важной задачей. Традиционные протоколы множественного доступа, основанные на фиксированном выделении минимального числа слотов для входа новых терминалов, демонстрируют крайне низкую эффективность при массовой одновременной активации неактивных устройств, что приводит к значительному росту коллизий и неограниченному увеличению времени установления соединения.

Авторы пришли к выводу, что ключевой причиной данного аспекта является отсутствие у терминалов и центрального узла априорной информации о количестве одновременно входящих

корреспондентов. В ответ на это в работе предложен новый механизм управления доступом, основанный на итеративной оценке числа активизирующихся терминалов и динамическом расчете вероятности передачи каждым из них. Такой подход позволяет приблизить математическое ожидание числа передающих устройств к количеству доступных слотов, тем самым максимизируя эффективность их использования и минимизируя число коллизий.

Результаты проведенного исследования показывают, что выбор функции предсказания числа одновременно входящих терминалов оказывает существенное влияние как на скорость получения первого слота (для передачи информации хабу), так и на общую эффективность массового подключения. В частности, установлено, что функции с быстрым ростом (например, степенные) целесообразно использовать на начальном этапе для оперативного установления связи хотя бы с одним терминалом, в то время как на этапе массового входа предпочтительны функции умеренного роста (например, линейные или квадратичные), которые снижают риск переоценки нагрузки и обеспечивают более стабильную сходимость к оптимальному значению.

Список источников

1. Чуднов А.М. Математические основы моделирования, анализа и синтеза систем. СПб: Военная академия связи им. С.М. Буденного, 2021. 193 с.
2. Кондратьев А.Е. Будущее сетцентрических войн // Независимое военное обозрение. 2022. № 36. С. 14.
3. Промежуточный отчет о НИР «Байбуз-ВПД-ВНС». М.: ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России, 2022. 146 с.
4. Зинкин С.В., Мурсаев А.Н. Особенности многостанционного доступа с временным разделением каналов в системах спутниковой связи // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6, № 1. С. 22–31.
5. Daniel Minoli. Innovations in satellite communication and satellite technology: the industry implications of DVB-S2X, high throughput satellites, Ultra HD, M2M, and IP. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2015. P. 21.

6. Abramson N. The ALOHA System — Another Alternative for Computer Communications // AFIPS Conference Proceedings. 1970. Vol. 37. Pp. 281–285.

7. Zheng L., Tse D. Diversity and Multiplexing: A Fundamental Tradeoff in Multiple-Antenna Channels // IEEE Transactions on Information Theory. 2003. Vol. 49, No 5. Pp. 1073–1096.

8. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. 2nd ed. Prentice Hall, 2001. 1104 p.

9. Alberts D.S., Garstka J.J., Stein F.P. Network Centric Warfare: Developing and Leveraging Information Superiority. 2nd ed. Washington, DC: CCRP Publication Series, 2000. 238 p.

10. Giambene G. Random Access for Satellite Communications: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2021. Vol. 23, No 2. Pp. 1083–1112.

11. Рыжов Г.Б., Вдовенко Г.В. К вопросу о боевой устойчивости системы управления группировкой войск (сил) в операции // Известия Российской Академии Ракетных и Артиллерийских Наук. 2025. № 3 (138). С. 3–12.

References

1. Chudnov A.M. Mathematical foundations of modeling, analysis and synthesis of systems. SPb: VAS, 2021. 193 p.

2. Kondratiev A.E. The Future of network-centric Wars, *Nezavisimoe voennoe obozrenie*. 2022. No 36. P. 14.

3. Interim research report «Baybuz-VPD-VNS». Moskva: FGBU «16 CNII» Russian Ministry of Defense, 2022.

4. Zinkin S.V., Mursaev A.N. Features of multi-station access with temporary channel separation in satellite communication systems // *Trudi uchebnykh zavedeniy svyazi*. 2020. Vol. 6. No 1. Pp. 22–31.

5. Daniel Minoli. Innovations in satellite communication and satellite technology: the industry implications of DVB-S2X, high throughput satellites, Ultra HD, M2M, and IP. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2015. P. 21.

6. Abramson N. The ALOHA System — Another Alternative for Computer Communications // AFIPS Conference Proceedings. 1970. Vol. 37. Pp. 281–285.

7. Zheng L., Tse D. Diversity and Multiplexing: A Fundamental Tradeoff in Multiple-Antenna Channels // IEEE Transactions on Information Theory. 2003. Vol. 49, No. 5. Pp. 1073–1096.

8. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. 2nd ed. Prentice Hall, 2001. 1104 p.

9. Alberts D.S., Garstka J.J., Stein F.P. Network Centric Warfare: Developing and Leveraging Information Superiority. 2nd ed. Washington, DC: CCRP Publication Series, 2000. 238 p.

10. Giambene G. Random Access for Satellite Communications: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2021. Vol. 23, No 2. Pp. 1083–1112.

11. Rizkov G.B., Vdovenko G.V. On the issue of combat stability of the command and control system of the grouping of troops (forces) in the operation // *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Raketnih i Artileriyevykh Nauk*. 2025. No 3 (138). Pp. 3–12.

УДК 621.892; 623.44

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_94

**АНАЛИЗ ПРОБЛЕМНЫХ ВОПРОСОВ В ОБЛАСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ БОЕВОГО РУЧНОГО СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ
В ЧАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОРУЖЕЙНЫХ МАСЕЛ**

**ANALYSIS OF PROBLEMATIC ISSUES IN THE FIELD OF MAINTENANCE
OF MILITARY HANDGUNS IN TERMS OF THE USE GUN OIL**

А.В. Толов¹, Д.М. Цимберов², В.В. Толов³

A.V. Tolov, D.M. Tsimberov, V.V. Tolov

¹ЦНТИ ГЦНИ Федеральной службы войск национальной гвардии РФ,

²Московский политехнический университет, ³ВА МТО им. А.В. Хрулева

В статье рассмотрены актуальные и проблемные аспекты, связанные с выбором оружейных масел, применяемых для смазки и консервации стрелкового оружия различного типа. Особое внимание уделено влиянию условий эксплуатации, интенсивности использования и климатических факторов на эффективность защитных свойств смазочных материалов. Проведен сравнительный анализ современных отечественных образцов оружейных масел, исследованы их физико-химические характеристики, коррозионная стойкость и стабильность при длительном хранении. Раскрыта проблема повышения надежности и долговечности работы боевого оружия за счет применения современных композиций масел с антикоррозионными и противоизносными добавками. Сделан вывод о необходимости комплексного подхода к выбору масла с учетом условий эксплуатации, типа оружия и требований к его работоспособности.

Ключевые слова: боевое ручное стрелковое оружие, оружейные масла, требования, качественное состояние, защита.

The article provides a detailed examination of the relevant and problematic aspects associated with the selection of gun oils used for the lubrication and preservation of various types of small arms. Particular attention is paid to the influence of operating conditions, intensity of use, and climatic factors on the effectiveness of protective properties of lubricants. A comparative analysis of modern domestic and foreign samples of gun oils is carried out, focusing on their physicochemical characteristics, corrosion resistance, and stability during long-term storage. The study highlights the issue of improving the reliability of firearms operation through the use of modern oil compositions containing anti-corrosion and anti-wear additives. It is concluded that a comprehensive approach to the choice of gun oil is required, taking into account operations, weapon type, and performance requirements.

Keywords: combat hand-held small arms, gun oils, requirements, quality condition, protection.

При хранении, транспортировке и эксплуатации боевого ручного стрелкового оружия, а также его отдельных узлов и деталей, под воздействием факторов внешней среды происходят процессы

коррозии. Данный вид разрушения подразделяется на две основные категории: в зависимости от механизма возникновения (причины) и характера проявления (внешнего вида разрушений). Атмосфер-

ная коррозия — наиболее часто встречающийся вид коррозионного разрушения; она проявляется под влиянием компонентов воздушной среды — кислорода, паров воды и разнообразных загрязнителей. Скорость протекания этого процесса растет с повышением температуры и влажности, а также при увеличении содержания в воздухе химически активных примесей. Экономический масштаб ущерба значителен: в развитых странах ежегодные потери от атмосферной коррозии составляет порядка 4–8 % внутреннего национального дохода, что выражается в миллионах рублей прямых убытков. Возмещение подобных потерь требует больших материальных затрат — на производство боевого ручного стрелкового оружия расходуется приблизительно каждая четвертая тонна выплавленного черного металла. Следует отметить, что ущерб от коррозии выражается не только в материальных расходах. Существенным последствием является снижение эксплуатационной надежности и боевой готовности вооружения, что относится к категории косвенных потерь [1].

Таким образом, проведение разработки практических рекомендаций по внесению изменений в методику выбора оружейных масел является актуальной задачей.

Существуют три основных категории оружейных масел:

- минеральное;
- синтетическое;
- биологическое (экологическое) [2].

Каждое из этих масел имеет свои чистящие, смазочные, защитные и универсальные свойства, подходящие для определенных условий использования. Предназначение, преимущества и недостатки современных оружейных масел представлены в табл. 1.

Выбор масла для оружия определяется условиями его эксплуатации, характером и интенсивностью использования. При этом важно учитывать не только смазывающие свойства композиции, но и ее защитную способность против коррозии, а также совместимость с материалами, из которых изготовлены детали оружия.

Из множества причин, приводящих к сокращению ресурса канала ствола, можно выделить три ключевых фактора: химический, механический и термический, рис. 1 [3–6].

Химический фактор — коррозионное воздействие, вызванное остатками пороховых газов и продуктами их сгорания (нагар), которые активно взаимодействуют с металлом (рис. 1, а), [7].

Механический фактор — разрушение, обусловленное абразивным действием твердых частиц пороха, приводящее к царапинам и полировке внутренней поверхности канала ствола (рис. 1, б) [8].

Термический фактор — повреждения, возникающие при нагреве и из-за термических напряжений, в том числе вследствие резкого перепада температур при выстреле (рис. 1, в) [9].

В современных условиях защита боевого ручного стрелкового оружия (БРСО) от коррозионного воздействия обеспечивается применением различных технологических и химических средств. Одним из наиболее результативных способов является использование специальных консервирующих составов, к числу которых относятся оружейные масла. Они образуют тонкую защитную пленку как на внешних, так и на внутренних поверхностях деталей, препятствуя образованию очагов ржавчины во время хранения, транспортировки и эксплуатации оружия [1].



а



б



в

Рис. 1. Факторы износа канала ствола

Таблица 1

Анализ преимуществ и недостатков современных оружейных масел

Наименование	Предназначение	Преимущества	Недостатки	Выводы
Минеральные масла	Производятся из нефтяных продуктов и предлагают базовый уровень смазки и защиты. Это самый доступный и распространенный вид оружейных масел, который хорошо подходит для повседневного использования при умеренных нагрузках [10]	Низкая стоимость и доступность; простота нанесения; хорошие защитные свойства в стандартных условиях эксплуатации	Могут загустевать при низких температурах; образуют осадок и требуют регулярной замены; пониженная эффективность при высоких нагрузках и температурах	Рекомендуются для владельцев, которые редко используют оружие и хранят его в стабильных климатических условиях. Они просты в применении и обеспечивают основную защиту, если нагрузка на оружие невелика
Синтетические масла	Производятся на основе высокотехнологичных химических соединений, что делает их более стабильными и эффективными в экстремальных условиях. Эти масла отлично подходят для оружия, которое используется в сложных условиях и подвергается интенсивным нагрузкам [10]	Работают при экстремальных температурах (от минус 50 до 50 °C); обеспечивают долговременную защиту от коррозии и износа; высокая эффективность при интенсивной эксплуатации	Более высокая стоимость; возможная несовместимость с некоторыми материалами (например, пластиковыми элементами)	Рекомендуются для охотников, военных и профессионалов, часто использующих оружие в суровых условиях. Эти масла дольше сохраняют свои свойства, что позволяет снизить частоту обслуживания оружия
Биологические (экологические) масла	Производятся из растительных компонентов, что делает их безопасными для окружающей среды. Они особенно популярны среди охотников и тех, кто заботится о минимизации вредного воздействия на природу [10]	Экологичность и безопасность для окружающей среды; безвредны при контакте с кожей человека; хорошие защитные свойства при умеренных нагрузках	Менее долговечны и требуют более частой замены; подвержены разложению при высоких температурах	Рекомендуются для оружия, которое используется в условиях средней интенсивности и не подвергается воздействию экстремальных температур

Известно, что временную защиту от коррозии обеспечивают преимущественно консервационные и рабоче-консервационные масла. Эти составы выполняют двойную функцию — смазочную и защитную, предотвращая негативное влияние влаги, кислорода и агрессивных примесей атмосферы на металлические элементы оружия.

От технологии изготовления марки оружейного масла и его качества зависят долговечность оружия, его износ и боеспособность. Эффективность использования оружейных масел

определяется возможностью оптимизации его свойств в соответствии с условиями применения оружия.

Ключевая задача оружейных масел — снижение износа контактирующих элементов за счет формирования на их поверхностях стабильной масляной пленки. Консервационная роль таких составов проявляется в создании барьера против проникновения влаги, кислот и солей — факторов, инициирующих коррозионные процессы [3]. Помимо указанных базовых

функций, требования к средствам ухода за оружием формулируется в трех группах эффективности.

Технологическая эффективность:

- отведение тепла и продуктов трения и износа;
- защита рабочих поверхностей деталей от коррозии;
- предотвращение образования нагара и иных отложений в канале ствола и на поверхностях оружия;
- высокая окислительная способность и гидростабильность состава;
- длительный срок службы при эксплуатационных нагрузках.

Экономическая эффективность:

- доступная себестоимость и широкая доступность материалов;
- технологическая простота производства и удобство применения;
- минимальные затраты труда и времени при консервации и расконсервации изделий.

Экологическая и эргономическая эффективность:

- отсутствие токсичности и минимальное экологическое воздействие;
- удобство использования и возможность утилизации или переработки остатков [11].

В целях проведения дальнейших исследований разработана структурно-функциональная схема факторного анализа оружейных масел, которая представлена на рис. 2.

Анализ связей между элементами структуры факторного анализа показывает, что метод факторного анализа помогает выявить скрытые факторы, которые объясняют взаимосвязи между переменными. Это следует из того, что факторный анализ представляет собой метод статистической обработки данных, позволяющий преобразовать большое количество взаимосвязанных переменных в ограниченный набор независимых факторов, отражающих основные закономерности исследуемого процесса.

Одним из главных свойств оружейных масел является сохранение своих качеств при перепадах температуры и влажности, обеспечивая долговременный защитный слой [12].

Таким образом необходим поиск качественных оружейных масел и смазок для подразделений войск национальной гвардии, выполняющих

служебно-боевые задачи на территориях с различными природно-климатическими условиями.

Существующие оружейные масла для боевого ручного стрелкового оружия, по мнению А.Ю. Александрова, Д.В. Коротаева, Н.В. Даныкина, Е.С. Назаренко [13], имеют достаточно широкий диапазон их использования и позволяет использовать их в различных природно-климатических районах.

В целях уточнения задачи исследования нами проведен анализ ассортимента оружейных масел и их эксплуатационных свойств, а также для сужения предмета исследования в данной статье были проанализированы работы ведущих ученых, работавших в данном направлении (табл. 2).

В целях оценки эксплуатационных свойств оружейного масла в данной работе нами был применен комплексный подход к анализу, включающий использование методов многомерного анализа. В рамках проведенного исследования применялся комплекс методов статистического анализа и математического моделирования, среди которых можно выделить:

- метод главных компонент;
- факторный анализ (анализ структурных данных);
- множественную линейную регрессию.

Метод главных компонент позволяет преобразовать исходные данные в систему новых, более информативных переменных — так называемых главных компонент. Благодаря этому становится возможным выявление наиболее значимых связей между показателями и сокращение размерности анализируемого пространства. Факторный анализ используется для систематизации показателей качества и их группировки по выделенным главным компонентам, что облегчает интерпретацию скрытых взаимосвязей между исследуемыми параметрами. Множественная линейная регрессия применяется для построения математической зависимости между изучаемыми характеристиками, позволяя оценить влияние нескольких независимых факторов на целевые параметры и спрогнозировать поведение системы в различных условиях.

Таким образом, применение указанных методов позволило нам осуществить формализацию и математическую постановку задачи, обеспечив объективную оценку эффективности оружейных масел.

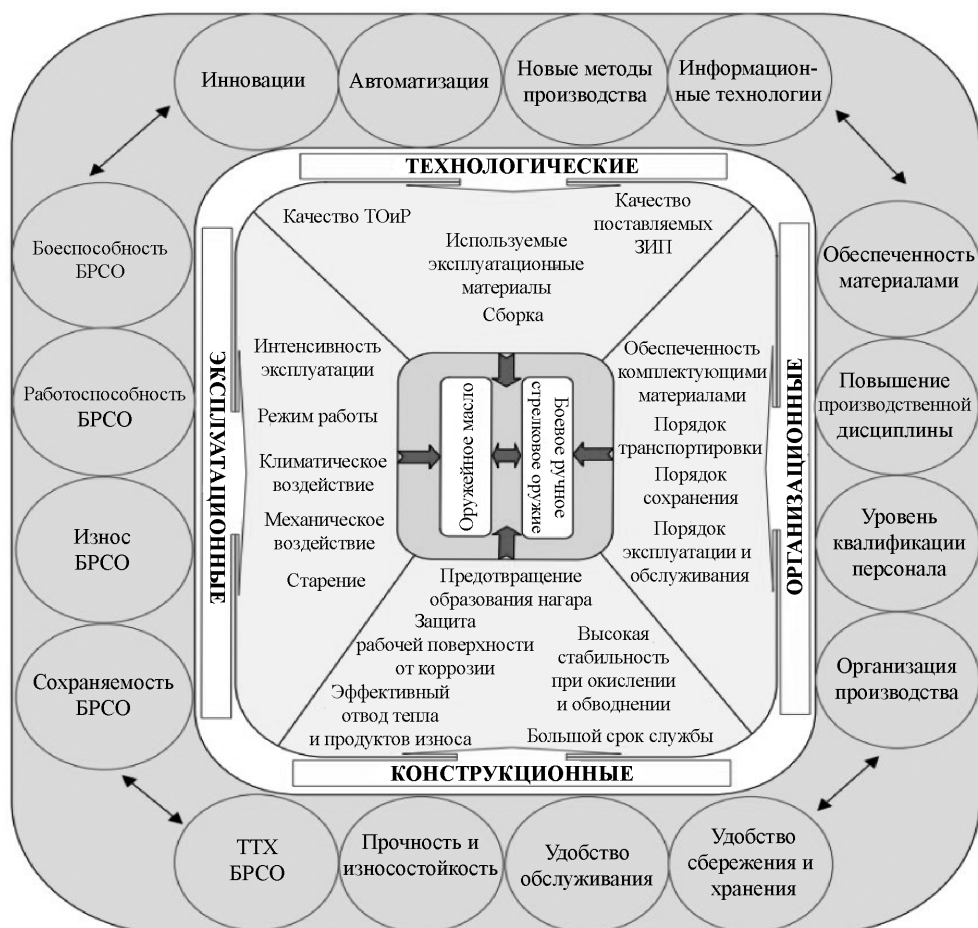


Рис. 2. Факторный анализ оружейных масел

Таблица 2

Анализ научных трудов в области исследования

Направления	Авторы	Научные и практические приложения	Вывод
Конструкторское	В.А. Митягин, Е.А. Тишина, И.В. Поплавский, А.В. Лаврушин	Проведен анализ военных спецификаций на оружейные масла и смазки для наземного и авиационного стрелкового и пушечного вооружения [14]	Не проведен факторный анализ оружейных масел
	А.В. Морозов, Д.А. Маньшев, А.А. Смелик, О.С. Морозова, и др	Проведены сравнительные испытания отечественных и зарубежных оружейных масел [15]	Сделан упор на сравнительный анализ масел в камере соляного тумана
	Л.А. Куликов	Рассмотрены особенности эксплуатации стрелкового оружия во времена Великой отечественной войны [16]	Указаны не все составляющие факторов, влияющие на эксплуатацию стрелкового оружия

Таблица 2 (продолжение)

Направления	Авторы	Научные и практические приложения	Вывод
Технологическое	В.Ю. Шолом, А.М. Казаков, А.В. Морозов, А.А. Смелик, Д.А. Маньшев, И.В. Поплавский	Разработаны по новым техническим требованиям Министерства обороны Российской Федерации консервационные и ружейные масла «УКМ» и «УКРМ» для Министерства обороны Российской Федерации, предприятий оборонно-промышленного комплекса, гражданской промышленности и населения [1]	Проведена работа по анализу узкого диапазона ружейных масел
	В.А. Митягин, С.Н. Волгин, Е.М. Вижанков	Приведены методы испытаний консервационных материалов и защитных покрытий [17]	Не затронут вопрос о методах испытаний оружейных масел в реальных условиях
	М.Г. Иванов, В.А. Митягин, Д.М. Иванов и др.	Рассмотрены вопросы разработки и применения различных ружейных масел [11]	Представлены результаты узкого диапазона ружейных масел
	М.Г. Иванов	Проведен анализ ингибитора коррозии	Не затронут вопрос
	Д.М. Иванов	АКОР-1 разных производителей. Приведены исследования защитных свойств опытных образцов масел РЖ с ингибиторами на основе АКОР-1 разных производителей в сравнении с товарным маслом РЖ [18]	наличия присадок в различных оружейных маслах
	М.Г. Иванов, Е.А. Николенко, Д.М. Иванов	Изучен вещественный состав нагара на АК-200 и бесшумной снайперской винтовки ВСС «Винторез» [19]	Изучен вопрос влияния узкой линейки масел на удаления нагара оружия
	Д.В. Коротаев, А.В. Ерохин, С.А. Семегук, В.В. Раков	Рассмотрен вопрос отрицательного влияния на канал ствола стрелкового оружия малого калибра продуктов выстрела; проведена оценка существующих эксплуатационных материалов технического обслуживания стрелкового оружия малого калибра [22]	Не полностью раскрыто влияние оружейных масел с низкой вязкостью и температурой застывания на стрелковое оружие

Таблица 2 (продолжение)

Направления	Авторы	Научные и практические приложения	Вывод
Технологическое	Д.В. Коротаев	Рассмотрены химические процессы действий пороховых газов на канал ствола стрелкового оружия [21]	Не полностью раскрыт состав существующих средств обслуживания
	Д.В. Коротаев	Рассмотрены преимущества применения технического решения по обслуживанию канала ствола стрелкового оружия малого калибра [22]	Не рассмотрен вопрос влияния оружейных масел на ресурс защитного слоя в стволе стрелкового оружия
	А.В. Лаврушин, Н.Е. Стариков, С.А. Семенов и др.	Проведен анализ используемого в защите материалов изделий машиностроения масла ружейного РЖ [23]	Не затронут вопрос о методах испытаний оружейных масел в реальных условиях
	А.Ю. Александров, Д.В. Коротаев	Рассмотрено влияние продуктов разложения капсульного состава на канал стрелкового оружия [24]	Не проанализирован вопрос повышения ресурса стрелкового оружия и продления его баллистических характеристик при помощи различных оружейных масел
	В.Ю. Шолом, А.М. Казаков, О.С. Морозова, М.А. Пшеничная, А.В. Морозов, А.А. Смелик	Приведены результаты выполнения проекта «Разработка консервационных и рабоче-консервационных смазочных материалов для нужд Министерства обороны Российской Федерации, отвечающих требованиям современной и перспективной военной техники» [25]	Не указаны результаты долговечности защитного слоя консервационных и ружейных масел
	А.А. Мухамедьянов, Э.Р. Каримова	Проведен сравнительный анализ характеристик ряда ружейных масел для определения конкурентоспособности масла Росойл-РЖ [26]	Проведен анализ характеристик узкой линейки ружейных масел
	Д.Е. Алехин, Ю.А. Козулев, А.Н. Тимофеев	Рассмотрена методика определения потребности горючего на расход, по напряженности работы техники в вооруженных конфликтах [27]	Не раскрыт вопрос потребности в ружейных маслах для обслуживания вооружения, привлекаемого для выполнения боевых задач
	В.А. Середа, Ю.М. Пименов, А.А. Рудакова, Н.Н. Пуляев	На основе анализа проблем, связанных с прогнозированием сохраняемости моторных топлив, определены требования к прогнозной модели [28]	Не затронут вопрос хранения ружейных масел с использованием теории подобия и моделирования

Таблица 2 (продолжение)

Направления	Авторы	Научные и практические приложения	Вывод
Технологическое	Б.С. Квашнин, Ю.О. Ляхов, И.В. Востряков	Рассмотрены назначение, устройство и технические характеристики полевых складских трубопроводов [29]	Предлагается методика обоснования оснащения полевых складов горючего технологическими трубопроводами
	А.О. Шангутов	Проведено уточнение теоретических положений в области организации материально-технического обеспечения группировки войск национальной гвардии на территории округа [30]	Уточнен предмет и дополнены закономерности рассматриваемой теории
	В.В. Зеленковский, А.Н. Каптюх, А.Ф. Мороз	Рассмотрен научно-методический аппарат обоснования требований к разрабатываемым образцам вооружения, военной и специальной техники [31]	Не рассмотрен вопрос вычисления различных критериев, показателей, коэффициентов, оценок и вероятностей для ружейных масел
	И.М. Назметдинов	Рассмотрены вопросы поиска потенциальных поставщиков и производителей инновационной продукции, которая может обеспечить выполнение задач, возлагаемых на систему МТО ВС РФ [32]	Не раскрыт вопрос влияния инновационных ружейных масел на выполнение служебно-боевых задач
	И.Г. Голубев, И.И. Руденко, В.И. Панферов	Приведены результаты испытаний форсунок топливной аппаратуры дизелей на топливе с биодобавками [33]	Не рассмотрен вопрос влияния ружейных масел на работоспособность фильтров тонкой очистки топливной аппаратуры
	В.И. Бабенков, В.В. Чешина	Представлен алгоритм и комплекс экономико-математических моделей обоснования рациональных показателей и способов процесса поставок запасных частей и принадлежностей для сервисного обслуживания и ремонта вооружения, военной и специальной техники [34]	Затронут вопрос затрат бюджетных средств при обслуживании и ремонте вооружения

Проработанная база данных содержала информацию по 8-ми показателям качества для 8-ми образцов оружейных масел различных марок (табл. 3).

Проведенный анализ данных и выявленных взаимосвязей в исследуемой системе позволил определить ряд скрытых (латентных)

факторов, оказывающих влияние на результаты. Среди методов многомерного анализа особое значение имеет метод главных компонент, который основан на идее выделения так называемых главных компонент — латентных переменных, не поддающихся непосредственному измерению.

Таблица 3

Некоторые данные из паспортов качества оружейных масел

Наименование показателя качества	Индустриал. масло И-20А	Нейтрал. масло оружейное «Беркут»	Оруж. масло «LIKSIР»	Масло ружейное нейтрал. «Ядерная защита»	Оруж. нейтрал. масло «Аксиома»	Масло оружейное нейтрал. «Тайга»	Смазка ружейная спрей «AG auto-gun» PREMIUM	Оруж. масло РЖ «KUDO»
Вязкость кинематическая, мм ² /с:								
– при 50 °С	–	12,64	–	6,0	6,12	6,368	–	6,368
– при минус 50 °С	–	–	–	1500	528,7	629	–	1498
Содержание механических примесей	отсут.	отсут.	–	0	0,018	0,04	–	0,05
Содержание воды	следы	отсут.	отсут.	отсут.	отсут.	отсут.	отсут.	отсут.
Плотность при 20 °С, кг/м ³ , не более	872,4	0,86	–	–	–	–	–	–
Температура застывания °С, не выше	–15	–30	–40	–60	–60	–60	–50	–50
Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °С, не ниже	201	185	230	–	–	–	–	–
Площадь коррозионного поражения, % при повышенных значениях относительной влажности и температуры воздуха	–	99	–	0	0	99	–	–
Коррозионное воздействие на металлы	–	не выдерж.	выдерж.	выдерж.	выдерж.	не выдерж.	–	–

Для обработки полученной экспериментальной базы, включающей данные по нескольким образцам оружейных масел, был использован именно этот метод. В результате проведенного анализа удалось выделить три основные главные компоненты, каждая из которых представляет собой линейную комбинацию исходных переменных. Данные компоненты суммарно отражают

около 90 % общей изменчивости исследуемого набора данных, что указывает на их высокую информативность и значимость в описании структуры исходных параметров. Сведение множества индивидуальных характеристик к ограниченному числу обобщенных переменных позволило существенно упростить анализируемую информационную модель, при этом сохранив ключе-

вые зависимости и закономерности, присущие исследуемым объектам. Таким образом, для восьми образцов оружейных масел исходный массив, включавший четырнадцать показателей качества, был преобразован в систему из трех главных компонент. Эти компоненты обеспечивают возможность описания и интерпретации взаимосвязей, отражающих основные тенденции и различия между рассматриваемыми объектами.

На следующем этапе исследования был выполнен факторный анализ, в ходе которого были определены показатели качества, характеризующие каждый из выделенных факторов. Каждая главная компонента может быть выражена как линейная комбинация \vec{p} базисных векторов, заданных в пространстве исходных переменных. При этом для каждой компоненты формируется набор из p коэффициентов — по одному для каждой координаты исходного пространства. Эти коэффициенты получили название нагрузок. Для всех p компонент определяется соответствующее количество нагрузок, совокупность которых образует матрицу нагрузок p . Эту матрицу можно рассматривать как матрицу преобразования от исходной системы координат (в пространстве переменных) к новой системе, сформированной главными компонентами. Нагрузки отражают степень связи между исходными переменными и главными компонентами, фактически являясь связывающим звеном между пространством исходных данных и пространством компонент. Именно нагрузки определяют направление каждой главной компоненты в исходной системе координат, поскольку сами компоненты представляют собой линейные комбинации исходных признаков, позволяющие интерпретировать их структуру и значимость.

Таким образом математическая постановка задачи будут иметь вид:

$$f(x) \rightarrow \max, \quad x \in (p_{1-14});$$

$$l(x) = 0, \quad i = (1-3),$$

где функции $f(x)$ и $l(x)$ дифференцированы в p_{1-14} (в матрицу).

Таким образом, рассмотренные проблемные вопросы применения оружейных масел показывают, что для полной очистки и консервации огнестрельного оружия требуется несколько видов

масел и чистящих средств. Вместе с тем некоторые положительные результаты исследований защитной способности оружейных масел свидетельствуют о возможности разработки более эффективных составов оружейных масел.

Список источников

1. Шолом В.Ю., Казаков А.М., Морозов А.В., Смелик А.А., Маньшев Д.А., Поплавский И.В. Опыт разработки консервационных и ружейных масел // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 1. С. 63–71.
2. Митягин В.А., Волгин С.Н., Вижанков Е.М. Консервационные материалы и защитные покрытия: монография. М.: Грин Принт, 2022. 372 с.
3. Стариков Н.Е., Лаврушин А.В., Старков Р.В. Натурные испытания штатных средств и средств консервации с использованием эфирных масел // Научный резерв. 2019. № 3. С. 43–48.
4. ГОСТ 9.054–75. Материалы консервационные. М.: Стандартиформ, 2006.
5. ГОСТ 19537–83. Смазка пушечная. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. 5 с.
6. ГОСТ 3276–89. Смазка ГОИ-54п. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.
7. Пушкарев А.М., Ихтисанов И.И., Вольф И.Г. Исследование износа стволов стрелкового оружия // Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов, 2022.
8. Астапов А.Н., Косенков А.Б. О потере массы пуль, выстреленных из различных образцов нарезного стрелкового оружия // Теория и практика судебной экспертизы. 2010. № 2 (18). С. 110–113.
9. Коротаев Д.В. Об износе стволов стрелкового оружия // Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы. Сборник статей Международной научно-практической конференции 10 января 2018 г. Часть 3. Пермь. 2018.
10. Сравнение различных типов оружейных масел: что выбрать для лучшей защиты и ухода. 2024 [Электронный ресурс]. URL: <https://dzen.ru/a/ZyMsolLmTPCBFrL> (дата обращения: 17.07.2025).

11. Иванов М.Г., Митягин В.А., Иванов Д.М., Поплавский И.В., Густин Д.Д. Проблемы разработки и применения ружейных масел // Нефтепереработка и нефтехимия № 4. 2023.
12. Шолом В.Ю., Казаков А.М., Кищенко Е.В. и др. Результаты испытаний универсального консервационного ружейного масла «Росойл-РЖ» // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Новые материалы и энергетика в ВС РФ»: Сборник статей научно-технической конференции. Анапа, 2022. С. 164–172.
13. Александров А.Ю., Коротаев Д.В., Даниякин Н.В., Назаренко Е.С. Об антикоррозионных и физических свойствах образцов некоторых оружейных масел // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. Вып. 4. С. 280–285.
14. Митягин В.А., Тишина Е.А., Поплавский И.В., Лаврушин А.В. Анализ военных спецификаций США на ружейные масла и смазки. Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3. 2022.
15. Морозов А.В., Маньшев Д.А., Сметлик А.А., Морозова О.С., Пшеничная М.А., Королев Н.С., Зражевский О.В. Оценка защитной способности ружейных масел в условиях морского климата // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 5. 2024.
16. Куликов Л.А. Проблемы эксплуатации стрелкового оружия в условиях низких температур // Наука и образование. XXXI Международная научно-практическая конференция.
17. Митягин В.А., Волгин С.Н., Вижанков Е.М. Консервационные материалы и защитные покрытия: монография. М.: Грин Принт, 2022. 372 с.
18. Иванов М.Г., Иванов Д.М. Об антикоррозионных свойствах ружейного масла РЖ. Проблема ингибитора коррозии АКОР-1 // Бутлеровские сообщения. Казань. 2021.
19. Иванов М.Г., Николенко Е.А., Иванов Д.М. Исследование химического и фазового состава нагара стрелкового оружия на примере винтовки ВСС и автомата АК-200 // Бутлеровские сообщения. Казань. 2021.
20. Коротаев Д.В., Ерохин А.В., Семегук С.А., Раков В.В. О продуктах выстрела и об опытно-техническом обслуживании автомата АК-74М // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 6. 2019.
21. Коротаев Д.В. О химических процессах в стволе стрелкового оружия // Научные революции: сущность и роль в развитии науки и техники. Сборник статей Международной научно-практической конференции 20 января 2018 г. Часть 2. Уфа. 2018.
22. Коротаев Д.В. Обеспечение живучести ствола стрелкового оружия малого калибра // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 4. 2017.
23. Лаврушин А.В., Стариков Н.Е., Семенов С.А., Жданова О.А., Науменко И.С. Оценка грибостойкости смазочных материалов, применяемых для защиты изделий машиностроения // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 9. 2019.
24. Александров А.Ю., Коротаев Д.В. О коррозионных агентах ствола стрелкового оружия и борьбе с ними // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 4. 2020.
25. Шолом В.Ю., Казаков А.М., Морозова О.С., Пшеничная М.А., Морозов А.В., Сметлик А.А. Новые универсальные консервационные смазочные материалы для стрелкового оружия и техники // Вестник УГАТУ. 2023.
26. Мухамедьянов А.А., Каримова Э.Р. Сравнительный анализ характеристик различных типов оружейных масел // Актуальные вопросы современного материаловедения. Материалы XI Международной молодежной научно-практической конференции (г. Уфа, 18–19 июня 2024 г.). Уфа. 2024.
27. Алехин Д.Е., Козулев Ю.А., Тимофеев А.Н. Метод определения потребности горючего на расход по средней норме расхода горючего на единицу техники в вооруженных конфликтах // Региональные аспекты управления, экономики и права Северо-западного федерального округа России: межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 1 (36). Санкт-Петербург: Свое издательство, 2016. С. 13–16.
28. Середа В.А., Пименов Ю.М., Рудакова А.А., Пуляев Н.Н. Новый подход в прогнозировании сохраняемости моторных топлив // Международный научный журнал. 2012. № 4. С. 101–105.
29. Квашнин Б.С., Ляхов Ю.О., Востряков И.В. Оснащение полевых складов горючего технологическими трубопроводами // Научный вестник Вольского военного института материального обеспечения: военно-научный журнал. 2019. № 1 (49). С. 137–144.

30. Шангутов А.О. Материально-техническое обеспечение войск национальной гвардии: теоретические аспекты // Региональные аспекты управления, экономики и права Северо-западного федерального округа России. 2021. № 2 (53). С. 86–91.

31. Зеленковский В.В., Каптюх А.Н., Мороз А.Ф. Требования к создаваемым образцам вооружения, военной и специальной техники // Научный вестник Вольского военного института материального обеспечения: военно-научный журнал. 2018. № 4 (48). С. 47–52.

32. Назметдинов И.М. Обоснование основных путей и способов повышения эффективности процессов обеспечения горючим группировки войск (сил) // Наука и образование в XXI веке: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 17 частях, Тамбов, 31 октября 2014 года. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2014. С. 89–91.

33. Голубев И.Г., Руденко И.И., Панфёров В.И. Работоспособность топливной аппаратуры дизелей на топливе с биодобавками // Труды ГОСНИТИ. 2013. Т. 112, № 2. С. 51–52.

34. Бабенков В.И., Чешина В.В. Обоснование рациональных показателей процесса поставок запасных частей и принадлежностей для вооружения, военной и специальной техники Войск национальной гвардии // Альманах Пермского военного института войск национальной гвардии. 2024. № 3 (15). С. 18–25.

References

1. Sholom V.Yu., Kazakov A.M., Morozov A.V., Smelik A.A., Manshev D.A., Poplavsky I.V. Experience in the development of preservative and rifle oils // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. 2024. No 1. Pp. 63–71.

2. Mityagin V.A., Volgin S.N., Vzhankov E.M. Conservation materials and protective coatings: a monograph. Moscow: Green Print, 2022. 372 p.

3. Starikov N.E., Lavrushin A.V., Starkov R.V. Field tests of standard tools and conservation products using essential oils // Scientific Reserve. 2019. № 3. Pp. 43–48.

4. GOST 9.054–75. Conservation materials. Moscow: Standartinform, 2006.

5. GOST 19537–83. Gun grease. Technical specifications. Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2002. 5 p.

6. GOST 3276–89. GOI-54p grease. Technical specifications. Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2002.

7. Pushkarev A.M., Ikhtisanov I.I., Wolf I.G. Small arms barrel wear study // Technology of the XXI century through the eyes of young scientists and specialists, 2022.

8. Astapov A.N., Kosenkov A.B. On the loss of mass of bullets fired from various types of rifled small arms // Theory and practice of forensic examination. 2010. No 2 (18). Pp. 110–113.

9. Korotaev D.V. About the wear of small arms barrels // Traditional and innovative science: history, current state, prospects. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference on January 10, 2018. Part 3. Perm. 2018.

10. Comparison of different types of gun oils: what to choose for the best protection and care. 2024 [Electronic resource]. URL: <https://dzen.ru/a/ZyMsolLimTPCBFrL> (date of request: 07/17/2025).

11. Ivanov M.G., Mityagin V.A., Ivanov D.M., Poplavsky I.V., Gustin D.D. Problems of development and application of rifle oils // Oil refining and petrochemistry. No 4. 2023.

12. Sholom V.Yu., Kazakov A.M., Kischenko E.V. et al. Test results of Rosoil-RJ universal conservation rifle oil // State and prospects of development of modern science in the field of «New materials and energy in the Armed Forces of the Russian Federation»: Collection of articles of the scientific and technical conference. Anapa, 2022. Pp. 164–172.

13. Alexandrov A.Yu., Korotaev D.V., Danyakin N.V., Nazarenko E.S. On the anticorrosive and physical properties of samples of some weapon oils // Izvestiya TulGU. Technical sciences. 2020. Issue 4. Pp. 280–285.

14. Mityagin V.A., Tishina E.A., Poplavsky I.V., Lavrushin A.V. Analysis of US military specifications for rifle oils and lubricants. News from TulSU. Technical sciences. Issue 3. 2022.

15. Morozov A.V., Manshev D.A., Smelik A.A., Morozova O.S., Pshenichnaya M.A., Korolev N.S., Zrazhevsky O.V. Assessment of the protective ability of rifle oils in a marine climate. News from TulSU. Technical sciences. Issue 5. 2024.

16. Kulikov L.A. Problems of small arms operation at low temperatures // Science and Education. XXXI International Scientific and Practical Conference.
17. Mityagin V.A., Volgin S.N., Vizhankov E.M. Conservation materials and protective coatings: a monograph. Moscow: Green Print, 2022. 372 p.
18. Ivanov M.G., Ivanov D.M. About the anti-corrosion properties of RYE gun oil. The problem of the corrosion inhibitor AKOR-1 // Butlerovskie posledie. Kazan. 2021.
19. Ivanov M.G., Nikolenko E.A., Ivanov D.M. Investigation of the chemical and phase composition of small arms carbon deposits using the example of the VSS rifle and the AK-200 assault rifle. Kazan. 2021.
20. Korotaev D.V., Erokhin A.V., Semeguk S.A., Rakov V.V. On shot products and experimental maintenance of the AK-74M assault rifle // News from TulSU. Technical sciences. Issue 6. 2019.
21. Korotaev D.V. About chemical processes in the barrel of small arms // Scientific revolutions: the essence and role in the development of science and technology. Collection of articles of the International scientific and practical Conference on January 20, 2018. Part 2. Ufa. 2018.
22. Korotaev D.V. Ensuring the survivability of small-caliber small arms barrels // News of TulSU. Technical sciences. Issue 4. 2017.
23. Lavrushin A.V., Starikov N.E., Semenov S.A., Zhdanova O.A., Naumenko I.S. Evaluation of the fungus resistance of lubricants used to protect machine-building products // News from TulSU. Technical sciences. Issue 9. 2019.
24. Alexandrov A.Yu., Korotaev D.V. On the corrosive agents of the barrel of small arms and the fight against them // Izvestiya TulGU. Technical sciences. Issue 4. 2020.
25. Sholom V.Yu., Kazakov A.M., Morozova O.S., Pshenichnaya M.A., Morozov A.V., Smelik A.A. New universal preservative lubricants for small arms and equipment // The messenger of UGATU. 2023.
26. Mukhamedyanov A.A., Karimova E.R. Comparative analysis of the characteristics of various types of weapon oils // Actual issues of modern materials science. Materials of the XI International Youth Scientific and Practical Conference (Ufa, June 18–19, 2024). Ufa. 2024.
27. Alekhine D.E., Kozulev Yu.A., Timofeev A.N. Method for determining fuel consumption requirements according to the average fuel consumption rate per unit of equipment in armed conflicts // Regional aspects of management, economics and Law of the North-Western Federal District of Russia: interuniversity collection of scientific papers. Volume Issue 1 (36). Saint Petersburg: Svo publishing House, 2016. Pp. 13–16.
28. Sereda V.A., Pimenov Yu.M., Rudakova A.A., Pulyaev N.N. A new approach to predicting the conservation of motor fuels // International Scientific Journal. 2012. No 4. Pp. 101–105.
29. Kvashnin B.S., Lyakhov Yu.O., Vostryakov I.V. Equipping field fuel depots with technological pipelines // Scientific Bulletin of the Volsky Military Institute of Material Support: military scientific journal. 2019. No 1 (49). Pp. 137–144.
30. Shangutov A.O. Material and technical support of the National Guard troops: theoretical aspects // Regional aspects of management, economics and law of the North-Western Federal District of Russia. 2021. No 2 (53). Pp. 86–91.
31. Zelenkovsky V.V., Kaptyukh A.N., Moroz A.F. Requirements for the created samples of weapons, military and special equipment // Scientific bulletin of the Volsky Military Institute of Material Support: military scientific journal. 2018. No 4 (48). Pp. 47–52.
32. Nazmetdinov I.M. Substantiation of the main ways and means of increasing the efficiency of fuel supply processes for groups of troops (forces) // Science and education in the 21st century: a collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference: in 17 parts, Tambov, October 31, 2014. Tambov: Yukom Consulting Company LLC, 2014. Pp. 89–91.
33. Golubev I.G., Rudenko I.I., Panferov V.I. Efficiency of fuel equipment for diesel engines with fuel with bioadditives // Proceedings of GOSNITI. 2013. Vol. 112, No 2. Pp. 51–52.
34. Babenkov V.I., Cheshina V.V. Substantiation of rational indicators of the supply process of spare parts and accessories for weapons, military and special equipment of the National Guard Troops // Almanac of the Perm Military Institute of the National Guard Troops. 2024. No 3 (15). Pp. 18–25.

УДК 623.526

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_107

**К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ТЕРМОЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА СТВОЛОВ
МАЛОКАЛИБЕРНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ ПУШЕК**

**ON THE ISSUE OF ASSESSING THE THERMOEROSION WEAR OF THE
BARRELS OF SMALL-CALIBER AUTOMATIC GUNS**

Канд. техн. наук А.М. Пушкарёв, И.С. Абрамычев

Ph.D. A.M. Pushkarev, I.S. Abramychyev

Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации

Рассмотрен вопрос оценки термосилового воздействия потока пороховых газов на поверхность канала ствола малокалиберной автоматической пушки. Доминирующей причиной потери живучести стволов малокалиберных автоматических пушек является изменение температуры поверхностного слоя канала ствола при стрельбе, которое приводит к появлению сетки тепловых усталостных трещин (термоэрозионный износ), нарушающих сплошность поверхности канала ствола. С этой целью в статье проанализированы критериальные соотношения малоциклового термической усталости. Исходя из этого, предложен критерий оценки термоэрозионного износа стволов малокалиберных автоматических пушек, с учетом циклических температурных напряжений и деформаций в стенке ствола. Предложенная зависимость позволяет произвести расчет термоэрозионного износа стволов малокалиберных автоматических пушек с учетом их настрела.

Ключевые слова: автоматическая пушка, артиллерийский ствол, износ ствола, малоцикловая усталость, напряженно-деформированное состояние, режим стрельбы.

The article discusses the assessment of the thermo-force effect of the powder gas flow on the surface of the barrel of a small-caliber automatic gun. The dominant cause of the loss of survivability of the barrels of small-caliber automatic guns is the change in the temperature of the surface layer of the barrel during firing, which leads to the appearance of a grid of thermal fatigue cracks (thermal erosion wear) that disrupt the continuity of the barrel surface. To this end, the article analyzes the criteria for low-cycle thermal fatigue. Based on this, a criterion for assessing the thermoerosion wear of the barrels of small-caliber automatic guns has been proposed, taking into account the cyclic temperature stresses and deformations in the barrel wall. The proposed dependence allows for the calculation of the thermoerosion wear of the barrels of small-caliber automatic guns, taking into account their number of shots.

Keywords: automatic cannon, artillery barrel, barrel wear, low-cycle fatigue, stress-strain state, firing mode.

Стремление повысить живучесть ствола, приблизить его долговечность к долговечности других узлов и деталей малокалиберного автоматического оружия, вызвало множество исследо-

ваний и технических предложений, относящихся как к стволу (эрозионностойкие покрытия, искусственное охлаждение и др.), так и к метательному заряду (флегматизаторы, неорганические

защитные средства и др.) и снаряду (специальные материалы для ведущих устройств и др.) [1].

Однако, решить задачу этим путем в полной мере пока не удастся: стремление повысить мощность и скорострельность автоматического артиллерийского оружия неизбежно вызывает трудности в обеспечении ряда эксплуатационных характеристик, в частности приемлемого ресурса стволов. Известно, что даже относительно небольшое повышение начальной скорости снаряда, ужесточение режимов стрельбы приводит к существенному увеличению износа канала ствола и, как следствие, к падению баллистических свойств выстрела после непродолжительной эксплуатации, то есть к потере живучести ствола [2, 3].

В артиллерийской практике при исследовании живучести артиллерийских стволов особый интерес представляют термоэрозионные разрушения. С позиции механики разрушения, термоэрозионные разрушения артиллерийских стволов представляют собой результат термической усталости металла ствола, а также химического воздействия пороховых газов на металл ствола в условиях нагрева до высоких температур. Следует отметить, что в основе своей эти факторы в своем сочетании вызывают ту или иную степень износа ствола, а также различное внешнее проявление процесса главным образом по характеристике состояния поверхности канала ствола после разрушения.

Так, характер разрушения поверхности показывает, что снижение живучести ствола в первую очередь является следствием эрозионного износа его канала; значительно реже причиной являются усталостные повреждения поверхностей [4]. Если следовать гипотезе [4], основанной на предположении, что интенсивность эрозионного износа ствола определяется энергией пороховых газов, расходуемой на разрушение поверхностного слоя металла ствола, то износ предлагается считать пропорциональным отношению удельной энергии теряемой потоком пороховых газов, к характеристике износоустойчивости металла ствола при максимальной температуре нагрева его поверхности:

$$h_{xi} = \int_0^{\tau_i} \left\{ \frac{\rho_r(\tau) [V(x, \tau)]^3}{2} A(x, \tau) \psi(T_n) \right\} d\tau, \quad (1)$$

где h_{xi} — радиальный износ в сечении x ;

$V(x, \tau)$ — скорость потока газов;

τ — время;

$\rho_r(\tau)$ — плотность газов;

$A(x, \tau)$ — коэффициент сопротивления трения с учетом поправки на неизотермичность потока газов, приведенный к началу калиберной части ствола;

$\psi(T_n)$ — функция интенсивности процесса эрозионного изнашивания, зависящая от температуры поверхности канала ствола и от конкретной гетерогенной пары взаимодействия — известного сочетания материала ствола и продуктов сгорания пороха.

Однако зависимость (1) лишь приближенно отражает суть происходящего физического процесса термоэрозионного изнашивания ствола при стрельбе, и дает удовлетворительные результаты только при настреле порядка 100 выстрелов. Кроме того, в алгоритмах, реализующих эту задачу при расчетном анализе эрозионного износа артиллерийских стволов, все еще используются характеристики, свойственные материалу ствола в исходном структурном состоянии. Поэтому в настоящее время термическую усталость описывают как процесс деформации, а также образования и увеличения структурных повреждений конструктивных элементов под влиянием многократных изменений температуры.

При малоцикловом нагружении оценочные расчеты накопления повреждений проводят на основе критериальных зависимостей долговечности от величины деформаций, напряжений, температуры и истории нагружения. В условиях неизотермического нагружения материала его долговечность обычно определяется на основании феноменологических гипотез суммирования повреждений [5]. В тех случаях, когда происходит одновременное накопление квазистатических и усталостных повреждений, суммарное повреждение определяется суммой двух членов, один из которых описывает квазистатическое, а другой усталостное повреждение. При этом предполагается, что разрушение имеет место, когда сумма этих членов равна единице. Условие разрушения материала при неизотермическом циклическом нагружении по аналогии с изотермической малоцикловой усталостью [6] можно записать в виде:

$$\int_0^N \left(\frac{\Delta \varepsilon}{2D(\tau)} \right)^m dN + \int_0^N \frac{\varepsilon_{\text{НАК}}}{D(\tau)} dN = 1, \quad (2)$$

где N — число циклов нагружения ствола;
 $\Delta \varepsilon$ — размах упругопластических деформаций в цикле;
 $\varepsilon_{\text{НАК}}$ — накопленная остаточная деформация (для случая мягкого нагружения);
 $D(\tau)$ — истинная пластичность с учетом длительности нагружения;
 m — эмпирический коэффициент.

Здесь первый интеграл характеризует величину односторонне накопленной деформации (вследствие термоциклической анизотропии или действия дополнительной статической нагрузки), а второй — величину циклически накопленной пластической деформации за N циклов.

Если рассматривать жесткое нагружение, которое в той или иной степени реализуется обычно в деталях, разрушающихся от термоусталости, то уравнение (2) преобразуется в уравнение Коффина, для случая неизотермического циклического нагружения [7]:

$$\int_0^N \left(\frac{\Delta \varepsilon}{2D(\tau)} \right)^m dN = 1. \quad (3)$$

В формировании предельного малоциклового повреждения при неизотермическом нагружении значима роль характеристик длительной пластичности D , которая коррелирует с сопротивлением малоциклового усталости. Поэтому одним из главных вопросов при использовании деформационных критериев, как при неизотермическом, так и при изотермическом нагружении является выбор предельной пластичности. При этом необходимо учитывать зависимость пластичности от времени деформирования.

Другими подходами по оценке долговечности при малоциклового термической усталости являются подходы, основанные на использовании деформационно-кинетического критерия [8, 9], в которых показано, что линейное суммирование долей статической и циклической повреждаемости справедливо, если их представить в виде выражения:

$$2^m \int_0^N \left(\frac{\Delta \varepsilon}{2D(\tau)} \right)^m dN + \int_0^N \frac{(\varepsilon_{\text{НАК}})_R}{D(\tau)} dN = 1. \quad (4)$$

Здесь первый интеграл характеризует долю усталостного повреждения Π_1 , а второй — долю квазистатического повреждения Π_2 . При этом, в общем случае нагружения, когда в материале возникают все виды неупругих деформаций, суммарное повреждение Π следует определять, как сумму относительных долей повреждений:

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 + \dots + \Pi_n, \quad (5)$$

где n — количество всех видов неупругих деформаций.

Известно, что изменение температуры во время стрельбы происходит по треугольному циклу [10, 11], поэтому, при нормальных режимах стрельбы, происходит накопление только усталостного повреждения.

Следовательно, одностороннего накопления пластических деформаций не происходит, и уравнение (4), теряя второе слагаемое, превращается в уравнение Коффина (3). При этом в уравнении (4) не учтена специфика влияния разрушения поверхности канала ствола, за счет химического воздействия пороховых газов.

Поэтому для оценки доли накопления повреждений, вносимой химическим воздействием пороховых газов, на основании выражений (1) и (5), представляется целесообразным дополнить уравнение (4) членом, который характеризует это накопление. Его можно представить в виде отношения между циклической плотностью энергии пороховых газов, расходуемой на разрушение поверхностного слоя металла ствола h_{xi} (радиальный износ ствола в сечении x), к суммарной плотности энергии h_x за предполагаемый ресурс N , то есть при оценке термоэрозионного износа целесообразно деформационно-кинетический критерий (4) трансформировать следующим образом:

$$\frac{2^m \Delta \varepsilon^m}{[D(\tau)]^m} N + \sum_{i=1}^N \frac{h_{xi}}{h_x} = 1, \quad (6)$$

где $\sum_{i=1}^N \frac{h_{xi}}{h_x}$ — доля повреждения, вносимая хемосорбцией и адсорбцией.

Таким образом, уравнение (6), для расчета термоэрозионного износа, можно преобразовать к виду:

$$h_x = \frac{h_{xi} N}{1 - \left[\frac{2^m \Delta \varepsilon}{(D(\tau))^m} N \right]} \quad (7)$$

Приведенная зависимость (7) дает принципиально новую возможность вычисления характеристик повреждаемости и термоэрозионного износа поверхности канала ствола малокалиберных автоматических пушек, определения энергетических затрат на повреждение поверхности в конкретном сечении ствола. Для реализации такого расчета необходимо многократное решение задачи внутренней баллистики и тепловой задачи для ствола разной степени износа. В рамках проведенных исследований было создано программное обеспечение, которое позволило на основе разработанной методики решения задачи о тепловом нагружении ствола автоматической пушки разработать машинную программу, предназначенную для расчета термоэрозионного износа стволов малокалиберных автоматических пушек с учетом их настрела [12]. Моделирование расчета параметров термоэрозионного износа реализуется на основе решения системы дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности конечно-разностным методом. Разработанное программное обеспечение для расчета термоэрозионного износа стволов определяет возможность его реализации в работах по исследованию температурного поля агрегата ствола.

Выводы

На основании рассмотренных в статье результатов исследований можно сделать следующее заключение, что приведенные исследования и их результаты позволяют обосновать перспективные подходы для косвенной оценки и прогнозирования скорости изнашивания стволов с различными конструктивно-технологическими параметрами и возможности использования, в конечном итоге, комплексной задачи о температурном напряженно-деформированном состоянии ствола как самостоятельной, независимо от других методов исследования. Получен-

ные в материалах статьи закономерности теплового нагружения агрегата артиллерийского ствола при выстреле, могут быть использованы в инженерной практике при расчете теплового состояния стволов и влияния его на параметры функционирования малокалиберной автоматической пушки, строить температурное поле ствола на различных режимах стрельбы и оценивать эффективность боевого применения малокалиберной автоматической пушки.

Список источников

1. Лазарев С.Ю., Калинин В.Ю., Медяников М.А. О возможности улучшения параметров ствольных систем методом устранения потерь при выстреле // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2021. № 2 (117). С. 136–142.
2. Шипунов А.Г., Швыкин Ю.С. Живучесть стволов скорострельных пушек и способы ее обеспечения. М.: Машиностроение, 1977. 168 с.
3. Пушкарёв А.М., Абрамычев И.С. К вопросу оценки живучести стволов малокалиберного автоматического оружия; сб. науч. тр. научно-техн. конф. «Перспективы совершенствования боеприпасов и развития спецхимии». Пенза: филиал ВА МТО. 2024. С. 527–530.
4. Логвинов В.С. Расчет эрозионного изнашивания канала ствола // Оборонная техника. 1991. № 1. С. 49–51.
5. Дульнев Р.А. Суммирование повреждений и условие прочности при термоциклическом нагружении // Проблемы прочности. 1971. № 10. С. 101–104.
6. Серенсен С.В., Шнейдерович Р.М., Гусенков А.П. и др. Прочность при малоцикловом нагружении. М.: Наука, 1975. 287 с.
7. Coffin L.F. Thermal stress and thermal stress fatigue. SESA Proceedings. 1958. Vol. IV. No 2. Pp. 117–130.
8. Гусенков А.П., Котов П.И. Малоцикловая усталость при неизотермическом нагружении. М.: Машиностроение, 1983. 240 с.
9. Шнейдерович Р.М., Гусенков А.П. Деформационно-кинетические подходы к оценке длительной циклической прочности // Материалы Всесоюзного симпозиума по малоцикловой усталости при повышенных температурах. Челябинск: ЧПИ. 1974. Вып. 3. С. 140–165.

10. Иванова С.А., Романов Р.Б. Расчет двухмерного температурного поля ствола автоматического оружия // Оборонная техника. 1980. № 7. С. 39–41.

11. Хижняк А.Е., Сметанин С.Д., Калинин В.Ю. Оценка теплового состояния стволов артиллерийских орудий при стрельбе // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2013. № 3 (78). С. 35–39.

12. Методика расчета теплового состояния ствола автоматической пушки при стрельбе: свид. о гос. регистр. программы для ЭВМ 2025616203 Рос. Федерация № 2025614538; заявл. 03.03.2025; опублик. 13.03.2025, Бюл. № 3.

References

1. Lazarev S.Y., Kalinin V.Y., Medyanikov M.A. On the possibility of improving the parameters of barrel systems by eliminating losses during firing // Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. 2021. No 2 (117). Pp. 136–142.

2. Shipunov A.G., Shvykin Yu.S. The survivability of the barrels of rapid-fire guns and methods of its provision. M.: Mashinostroenie. 1977. 168 p.

3. Pushkarev A.M., Abramychiev I.S. On the issue of assessing the survivability of small-caliber automatic weapon barrels // Collection of scientific papers of the scientific and technical conference «Prospects for the improvement of ammunition and the development of special chemistry». Penza: branch of VA MTO. 2024. Pp. 527–530.

4. Logvinov V.S. Calculation of Erosion Wear of the Barrel Channel // Defense Technology. 1991. No 1. Pp. 49–51.

5. Dulnev R.A. Summation of Damage and Strength Condition under Thermocycle Loading // Problems of Strength. 1971. No 10. Pp. 101–104.

6. Serensen S.V., Shneiderovich R.M., Gusenkov A.P. et al. Strength under low-cycle loading. M.: Nauka. 1975. 287 p.

7. Coffin L.F. Thermal stress and thermal stress fatigue. SESA Proceedings. 1958. Vol. IV. No 2. Pp. 117–130.

8. Gusenkov A.P., Kotov P.I. Low-cycle fatigue under non-isothermal loading. M.: Mashinostroenie, 1983. 240 p.

9. Shneiderovich R.M., Gusenkov A.P. Deformation-kinetic approaches to assessing long-term cyclic strength // Materials of the All-Union Symposium on Low-cycle Fatigue at Elevated Temperatures. Chelyabinsk: ChPI. 1974. Issue 3. Pp. 140–165.

10. Ivanova S.A., Romanov R.B. Calculation of the two-dimensional temperature field of the barrel of automatic weapons // Defense technology. 1980. No 7. Pp. 39–41.

11. Khizhnyak A.E., Smetanin S.D., Kalinin V.Y. Assessment of the thermal condition of the barrels of artillery guns during firing // Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. 2013. No 3 (78). Pp. 35–39.

12. Methodology for Calculating the Thermal State of the Barrel of an Automatic Cannon during Shooting: Certificate of State Registration of the Computer Program № 2025616203 of 13.03.2025.

УДК 14.11

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_112

**ТВЕРДОФАЗНАЯ ПРОКАТКА РЕАКТОРНОГО ПОРОШКА
СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА
С ПОСЛЕДУЮЩИМ ОРИЕНТАЦИОННЫМ УПРОЧНЕНИЕМ**

**SOLID-PHASE ROLLING OF REACTOR POWDER OF ULTRAHIGH
MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE WITH SUBSEQUENT ORIENTATION
HARDENING**

*М.М. Цыганков¹, Т.Д. Шидловский¹, Ю.М. Бойко¹, Л.П. Мясникова¹, В.Ф. Дроботько²,
С.А. Терехов², А.П. Борзенко², И.М. Макмак², О.С. Новак³*

*M.M. Tsygankov, T.D. Shidlovskii, Yu.M. Boiko, L.P. Miasnikova, V.F. Drobotko, S.A. Terekhov,
A.P. Borzenko, I.M. Makmak, O.S. Novak*

¹ *Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,*

² *Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, ³ НПО Спецматериалов*

В статье рассмотрен метод переработки реакторных порошков сверхвысокомолекулярного полиэтилена в высокопрочные высокомодульные волокна и пленки. Описаны комплексные исследования механических свойств прокатанных тонких лент из реакторных порошков сверхвысокомолекулярного полиэтилена с последующей многоступенчатой зонной ориентационной вытяжкой. Установлено влияние изменения средней скорости деформации при прокате на модуль упругости и предел прочности на разрыв. Образцы были исследованы методом рентгеноструктурного анализа, что позволило установить тип структуры прокатанных пленок на финальных стадиях. Произведен поиск оптимальных режимов прокатки спеченных порошков для получения прекурсоров, обеспечивающих достижение предельных ориентационных удлинений и получение, соответственно, высокопрочного полимерного материала.

Ключевые слова: реакторные порошки сверхвысокомолекулярного полиэтилена, СВМПЭ, метод прокатки, упрочнение, метод многостадийной зонной ориентационной вытяжки.

The article discusses a method for processing ultra-high-molecular-weight polyethylene reactor powders into high-strength, high-modulus fibers and films. Comprehensive studies of the mechanical properties of rolled thin tapes made of ultra-high-molecular-weight polyethylene reactor powders with subsequent multi-stage zone orientation extraction are described. The effect of changes in the average rate of deformation during rolling on the modulus of elasticity and tensile strength has been established. The samples were examined by X-ray diffraction analysis, which made it possible to determine the type of structure of the rolled films at the final stages. A search has been made for optimal rolling modes of sintered powders to obtain precursors that ensure the achievement of maximum orientational elongations and, accordingly, obtain a high-strength polymer material.

Keywords: ultra-heavy-molecular-weight polyethylene reactor powders, UHMWPE, rolling method, hardening, multistage zone orientation extraction method.

Введение

В 2023 году в АО «НПО Спецматериалов» впервые в России было открыто производство нетканого баллистического полотна из нити сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) под торговой маркой «РУССИЛ». СВМПЭ «РУССИЛ» успешно применяется для производства гибких [1] и жестких защитных элементов, тыльных слоев многослойных композитных броневых структур, в средствах индивидуального [2] и коллективного бронирования [3]. Нить СВМПЭ производится методом переработки реакторных порошков (РП). Для повышения защитных и эксплуатационных характеристик [4] изделий из СВМПЭ «РУССИЛ» необходимо развивать технологии как производства непосредственно баллистического полотна [5], так и технологии производства его компонентов.

В настоящее время интенсивно развивается твердофазный («сухой») метод переработки РП СВМПЭ в высокопрочные высокомодульные волокна и пленки [6, 7], альтернативный дорогостоящему и экологически небезопасному методу гель-технологии (прядение малоконцентрированного 3–5 % раствора СВМПЭ в полярных растворителях, кристаллизация полимера из состояния геля и последующее упрочнение путем ориентационной вытяжки) [8].

Твердотельная прокатка полимеров с последующим деформационным упрочнением позволяет осуществить непрерывный процесс производства ориентированных высокомодульных пленок, пленочных нитей и лент непосредственно из продуктов синтеза полимеров, т.н. реакторных порошков. Детальные исследования структурных изменений в ориентированных прокатанных и отожженных пленках полиэтилена низкой плотности со структурой монокристалла были проведены еще в 60–70-х годах прошлого века в работах А. Келлера и др. [9].

Основная часть

На начальных этапах растяжения были выявлены различные моды деформации, такие как внутри- и межламеллярное скольжение, наклоны цепей, определены критические напряжения сдвига для действующих мод деформации в данных температурно-временных условиях дефор-

мирования. При сжатии наблюдалось скольжение по различным кристаллографическим плоскостям, двойникование, мартенситный переход и переход из орторомбической в моноклинную решетку. Обзор этих работ дан в главе III монографии В.А. Марихина, Л.П. Мясниковой «Надмолекулярная структура полимеров» [10]. При дальнейшем растяжении происходит твердофазный переход кристаллов со складчатыми цепями (КСЦ) в ламелях в кристаллы с выпрямленными цепями (КВЦ) в образующихся фибриллах [10].

Во время прокатки при вхождении полимера в узкое пространство между вальками происходит резкое уменьшение толщины материала, сопровождающееся преимущественным выстраиванием молекулярных цепей вдоль направления прокатки, что приводит к увеличению прочности материала в этом направлении, в то время как в поперечном направлении молекулярные цепи ориентируются очень незначительно [11]. Причем молекулы линейных полимеров, таких, как полиэтилен (ПЭ) [10], полиоксиметилен (ПОМ) [12] и полиэтилентерефталат (ПЭТФ) [11] могут почти идеально выстраиваться в направлении прокатки.

Метод прокатки обладает еще и тем преимуществом, что подавляет образование пор, часто возникающих при обычной ориентационной вытяжке за счет образования микрошеек, предвещающих образование макрошейки. Оказалось, что образование этих пор можно подавить в процессе прокатки за счет сжимающей составляющей при однонаправленной прокатке в канале, образованном по окружности одного валька другим вальком, имеющим толщину, соответствующую ширине канала [13], по типу шип-паза.

В работе [14] такая же конструкция использовалась при исследовании возможностей твердофазной переработки разных РП СВМПЭ непрерывным способом и влияния температуры вальков на деформационно-прочностные свойства прокатанных лент. При сравнении степеней вытяжки прокатанных лент при растяжении на Instron и при многоступенчатой ориентационной вытяжке, обнаружена существенная разница в величине достижимых степеней вытяжки, которая объясняется не только существенным отличием в скорости деформирования, но и разной деформируемостью РП с разной морфологией.

Механизм прокатки кристаллических полимеров был подробно описан в [15] на основании сравнительного исследования структуры поверхностей прокатываемых образцов, прилегающих к валкам и послойного исследования объема по толщине, методом Фурье-ИК спектроскопии. Была обнаружена заметная разница в молекулярной ориентации в объеме и на поверхности пленок, причем, если после первой прокатки молекулярная ориентация в середине прокатываемого образца вообще не наблюдалась, и только постепенно увеличивалась с увеличением степени прокатки, то даже при предельной прокатке разориентация «с»-осей в объеме оставалась чуть больше, чем на поверхности.

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию структурно-деформационных процессов, происходящих при прокатке, представляется затруднительным сформулировать научно-обоснованный путь к получению прокатанного материала, оптимального для последующего деформационного упрочнения, поскольку все результаты получены на разных полимерах, при разных температурах, разных скоростях прокатки и при разных конструктивных характеристиках вальцов.

Недавно начатые нами комплексные исследования механических свойств прокатанных тонких лент из реакторных порошков СВМПЭ с последующей многоступенчатой зонной ориентационной вытяжкой показали, что механические характеристики прокатанных образцов, упрочненных последующей ориентированной вытяжкой, существенно зависят от степени предварительной прокатки [16].

Важными параметрами процесса прокатки являются температура валков, средняя скорость деформации при прохождении валков (скорость вращения валков, диаметр валков), толщина исходной спеченной пленки, подвергаемой прокатке, и механические свойства полимера, т.н. прекурсора для деформационного упрочнения (ориентационной вытяжки) [17].

Целью настоящей работы был поиск оптимальных режимов прокатки спеченных порошков для получения прекурсоров, обеспечивающих достижение предельных ориентационных удлинений и получение, соответственно, высокопрочного материала. Как известно, не все РП СВМПЭ могут быть переработаны «сухим»

методом. Несмотря на многочисленные работы, посвященные поиску критериев пригодности РП СВМПЭ для твердофазной переработки, существуют многие разнообразные оценки, начиная от низкой плотности молекулярных зацеплений, низкой насыпной плотности, высокой степени кристалличности, высокой температуры плавления, высокой энтальпии плавления и, заканчивая типом морфологии порошка [6]. Для проведения работы был выбран РП СВМПЭ, синтезированный на металлоценовом катализаторе Ф-97, поскольку, как было показано в [18], он хорошо спекается и ориентируется.

Исследования проводили на реакторном порошке СВМПЭ-5230, синтезированном в лабораторных условиях в Институте высокомолекулярных соединений РАН (г. Санкт-Петербург) путем суспензионной полимеризации в толуоле на одноцентровом металлоценовом катализаторе Ф-97 при температуре 30 °С. Молекулярная масса порошка $M_w = 4 \times 10^6$ г/моль, насыпная плотность 0,056 г/см³.

Образцы для прокатки толщиной около 0,35 мм готовили путем холодного компактирования РП с последующим спеканием при 130 °С при давлении 100 МПа в течение 30 минут в пресс-форме прямоугольной формы (9×50 мм) с открытыми торцами.

Прокатку спеченных прекурсоров осуществляли в валковом прессе специальной конструкции, изготовленном в Донецком физико-техническом институте им. А.А. Галкина и описанном в [16]. Валки выполнены в форме типа шип-паз [19, 21]. Процесс включает в себя прокатку материала внутри канала, сформированного по окружности одного валка другим валком, имеющим толщину, соответствующую ширине канала в первом валке. Второй валок выполняет функцию пуансона, а стенки сторон канала на первом валке составляют боковые ограничения, как в пресс-форме канала. На начальном этапе процесса прокатки наблюдается упругое восстановление деформированных СВМПЭ лент. Всегда на выходе после валков толщина ленты оказывается на 8–39 % больше размера зазора между валками. Для выравнивания толщин, каждую ленту приходилось прокатывать между валками 5–7 раз при одном и том же зазоре. Коэффициент вытяжки валками $\lambda_{пр}$ оценивали как отношение исходной толщины образца h_0 к толщине проката

танного образца h : $\lambda_{\text{пр}} = h_0 / h$. Толщина образцов уменьшалась вследствие их удлинения, а ширина практически не изменялась.

Для получения максимального значения степени вытяжки валками λ прокатку многократно повторяли в одном и том же направлении с уменьшением размера зазора после каждого прохода не более 20 % от исходной толщины образца.

Прокатку осуществляли при температуре валков 124 °С со скоростью 30 и 300 см/мин в несколько стадий с последовательно уменьшающимся зазором между валками (от 200 до 50 мкм). Эта температура была выбрана на основании анализа термограмм спеченных порошков по отклонению хода термограммы от базовой линии.

Кроме того, прокатку спеченных пленок проводили и при более низких температурах: 85 °С и 116 °С. Среднюю скорость деформации при прокатке рассчитывали по формуле Целикова

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_1}{l} \frac{(h_0 - h)}{h_0}, \quad l = \sqrt{\left(\frac{D}{2}(h_0 - h)\right)},$$

где v_1 — скорость вращения валков, (м/с);
 h_0 — толщина ленты до прокатки, (м);
 h — толщина ленты после прокатки, (м);
 D — диаметр рабочего валка, (м),
 l — горизонтальная проекция дуги захвата, м.

Тестирование на растяжение прокатанных лент проводилось согласно ГОСТ 14236–81 на двусторонних лопаточках с размерами рабочей части 30×7 мм и толщиной образцов $d = 0,130$ – $0,140$ мм с помощью машины испытания пластмасс 2167 Р-50 со скоростью 5 мм/мин ($\dot{\varepsilon} = 0,0028 \text{ с}^{-1}$) до разрыва.

Для последующей ориентационной многостадийной вытяжки прокатанные пленки нарезались на полоски вдоль направления прокатки шириной 1 мм. Вытяжка проводилась на локальном (ножевом) нагревателе с длиной контактной зоны около 1 мм. Схема проведения ориентационной вытяжки на локальном нагревателе приведена на рис. 1.

Ориентируемый образец 3, закрепленный в зажимах 2, подается мотором 1 к локальному нагревателю 4 и перемещается по нему под дейст-

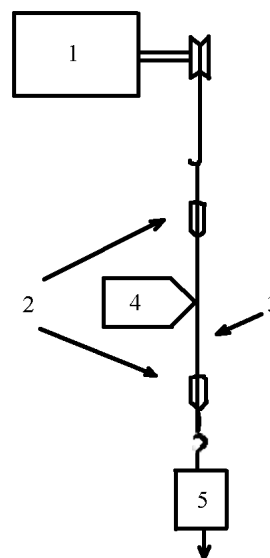


Рис. 1. Схема ориентационной вытяжки

вием груза 5. Процедура повторяется несколько раз с изменением груза или температуры.

Ориентационная вытяжка представляет собой конкуренцию двух процессов [21].

1. Упрочнения за счет выстраивания молекулярных цепей вдоль направления ориентации и разупрочнения из-за разрывов перенапряженных молекул по термофлуктуационному механизму, согласно формуле Журкова:

$$t = t_0 \exp(U_0 - \sigma\gamma) / KT,$$

где t — время жизни материала под нагрузкой;
 t_0 — период колебаний атомов относительно положения равновесия, равный 10^{-13} с;
 U_0 — прочность связи;
 σ — напряжение;
 γ — структурно-чувствительный фактор;
 K — постоянная Больцмана;
 T — абсолютная температура.

Ориентационную вытяжку останавливали при достижении какой-нибудь степени вытяжки ($\lambda_{\text{лок1}}$, $\lambda_{\text{лок2}}$, $\lambda_{\text{лок3}}$), и определяли прочность на разрыв образца, ориентированного до данной степени вытяжки на машине Shimadzu (Япония) при скорости раздвижения зажимов 10 см/мин. Многостадийная зонная ориентационная вытяжка проведена пока только для нескольких образцов.

Рентгеновские измерения проводились на дифрактометре ДРОН-3М в геометрии отра-

жения Брэгга–Брентано в $\text{Cu K}\alpha$ -излучении (0,15418 нм) при ускоряющем потенциале 30 кВ и токе трубки 20 мА. Параметр кристаллографической плоскостной ориентации (CPO) определяется как отношение между 200 и 110 площадями кристаллических пиков полного разложения экспериментальной WAXS кривой на кристаллические и аморфные компоненты.

Установлено, что модули упругости и пределы прочности на разрыв при прокатке уменьшаются с увеличением средней скорости деформации лент при трех различных постоянных температурах. Большие скорости деформации $\sim 22\text{--}36\text{ с}^{-1}$ приводят к появлению дефектов и уменьшению прочностных характеристик. Молекулы в складчатых кристаллитах ламелей должны разгибаться и выстраиваться в направлении прокатки, причем при большой скорости

прокатки многие молекулы будут рваться и прочность уменьшается, а при медленной прокатке разгибание и выстраивание молекул в одном направлении происходит эффективнее и прочность увеличивается.

Как видно из рис. 2, эффект увеличения скорости деформации аналогичен эффекту снижения температуры испытания.

Поскольку наилучшие деформационно-прочностные свойства демонстрировали пленки, прокатанные при 124°C , то для последующей многостадийной зонной ориентационной вытяжки были выбраны пленки из образцов, параметры процесса прокатки которых представлены в табл. 1.

Как следует из табл. 1 достаточно тонкие пленки, пригодные для последующей ориентационной вытяжки на локальном нагревателе,

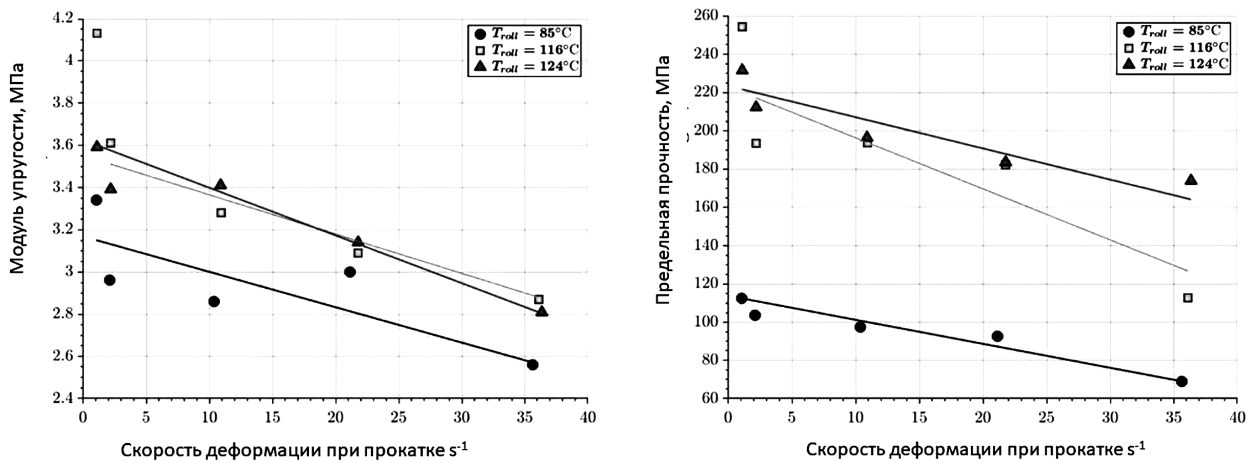


Рис. 2. Упругие модули и пределы прочности на разрыв как функции скорости деформации для спеченных лент СВМПЭ-5230 при трех различных температурах прокатки 85°C , 116°C и 124°C

Таблица 1

Параметры процесса прокатки

№ обр.	Кол. цикл.	m , мг	$d_{\text{исх}}$, мкм	$d_{\text{мв}}$, мкм	$d_{\text{пп}}$, мкм	$T_{\text{пр}}$	$V_{\text{пр}}$, см/мин	λ_d , $d_{\text{исх}}/d_{\text{пп}}$	b , мм	L , мм	$\lambda_{\text{пр}}$
41(3)	3	150	350	100	118	124	30	2,97	9,5	145	2,9
41(4)	4	150	350	50	50	124	30	7,0	9,6	240	4,8
42(2)	2	150	350	200	200	124	300	1,42	9,4	82	1,64
42(3)	3	150	350	100	105	124	300	3,43	9,5	165	3,3
42(4)	4	150	350	50	60	124	300	5,92	9,6	250	5,0

m — величина навески РП;

$d_{\text{исх}}$, $d_{\text{пп}}$ — толщина исходной спеченной пленки до прокатки и после прокатки;

$d_{\text{мв}}$ — расстояние между вальками; $T_{\text{пр}}$ — температура вальков; $V_{\text{пр}}$ — скорость прокатки;

λ_d — уменьшение толщины пленки после прокатки;

b — ширина пленки; L — длина пленки; $\lambda_{\text{пр}}$ — степень вытяжки пленки по длине

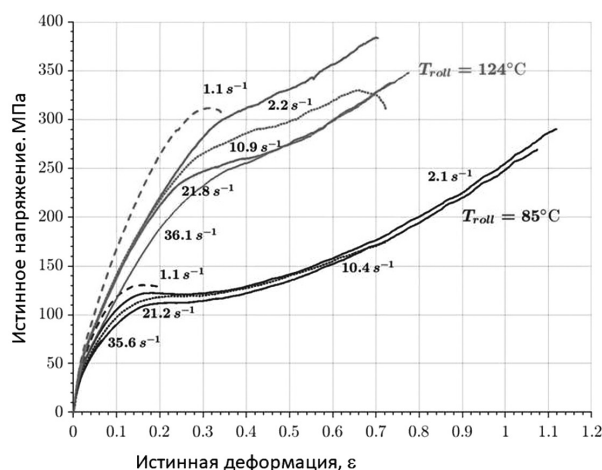


Рис. 3. Истинные кривые «напряжение-деформация» лент СВМПЭ-5230, прокатанных валками, при различных температурах и скоростях деформации

получаются после последовательных третьего (100 мкм) и четвертого (50 мкм) прохода между валками.

Рентгеноструктурный анализ в больших углах, проведенный на дифрактометре ДРОН-3М

в геометрии Брэгг-Брентано с фильтрованным никелем излучением $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 0,154$ нм), свидетельствует о формировании в прокатанных пленках на последних стадиях прокатки ярко выраженной плоскостной текстуры. Об этом можно судить по соотношению между интенсивностями и площадями рефлексов 110 и 200 в рентгенограммах, представленных на рис. 4, а, б, и в табл. 2.

Экспериментальные кривые были разложены на отдельные пики подгонкой профильных функций программой LIPRAS MATLAB [22]. Использовались профильные симметричные функции Гаусса, Пирсон-VII и псевдо-Фойгта. Подгонка осуществлялась при использовании алгоритмов Trust-Region-Reflective Least Squares и Левенберга-Марквардта. Качество подгонки и разложения оценивали коэффициентом детерминации R^2 и критерием согласия. Кроме интенсивных пиков орторомбической решетки 110 и 200 в рентгенограмме присутствует аморфное гало и пик от метастабильной моноклинной фазы, которая существует только под напряжением.

Таблица 2

Соотношения между интенсивностями и площадями рефлексов

№ образца	D_{110} , nm	D_{200} , nm	FWHM_{110} , FWHM_{200} , degree	Peak Ratio, 200/110	Peak Area Ratio, 200/110	Mono, M_{001} , %	Ortho, %	Cryst, %	Amorph. %
42(2)	18,0	16,7	0,470 0,505	1,52	1,370	29,07 0,199	70,93	83,54	16,46
42(3)	15,7	15,2	0,530 0,548	1,53	1,336	37,08 0,195	62,92	78,68	21,32
42(4)	14,7	15,8	0,565 0,534	2,06	1,546	36,09 0,254	63,91	84,46	15,54

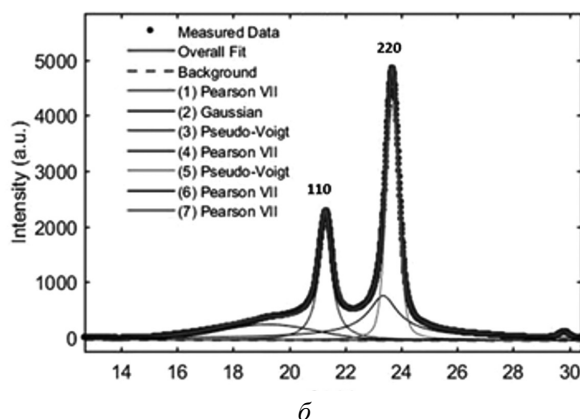
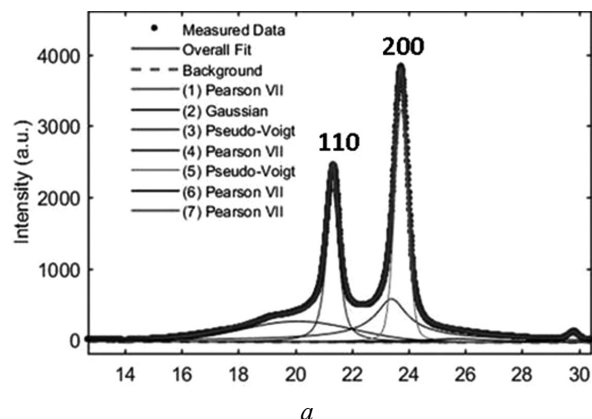


Рис. 4: а — Рентгенограмма прокатанной пленки СВМПЭ 5230 -42(3);
б — рентгенограмма пленки ВМПЭ 5230 -42(4)

Видно, что поперечные размеры кристаллитов D_{110} уменьшаются с каждым проходом, в то время как закономерности в изменении размеров кристаллитов в направлении, перпендикулярном кристаллографической плоскости 200, не наблюдается. В то же время, с увеличением числа проходов все заметнее становится развитие плоскостной текстуры прокатанных пленок, и больший вклад в рассеяние начинает вносить рассеяние от моноклинной кристаллической фазы, что свидетельствует о генерации микронапряжений, поскольку моноклинная фаза нестабильна и может существовать только под напряжением.

Для проведения деформационного упрочнения путем разработанного в ФТИ им. А.Ф. Иоффе метода многостадийной зонной ориентационной вытяжки были выбраны прокатанные образцы 42(3) и 42(4).

На рис. 5 показаны зависимости разрывной прочности прокатанных и упрочненных пленок от результирующей степени вытяжки $\lambda_{\text{общ}} = \lambda_{\text{пр}} \times \lambda_{\text{лок}}$.

Вопреки ожиданиям оказалось, что более прочные прекурсоры 42(4), прокатанные до более высоких степеней продольной вытяжки ($\lambda_{\text{пр}} = 5,0$), тянутся хуже, чем прекурсоры, полученные после третьего прохода валков (42(3), $\lambda_{\text{пр}} = 3,3$), и, соответственно демонстрируют худшие механические свойства в ориентированном состоянии. Причем, если при общей степени вытяжки $\lambda_{\text{общ}} = 20$ прочности образцов еще одинаковы, то при дальнейшей вытяжке прочность образца не только не возрастает, но даже немного уменьшается. В то же время, образец 42(3) после

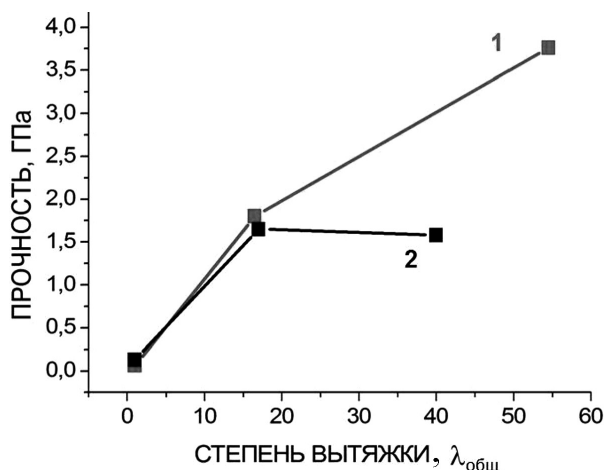


Рис. 5. Зависимости разрывной прочности от результирующей степени вытяжки

20-кратной общей вытяжки все еще сохраняет пластичность и эффективно упрочняется вплоть до 60-кратной вытяжки. Измерения прочности проводились не менее, чем на 8 образцах. Прочность ориентированных образцов, полученных и, прокатанных пленок 42(3), не уступает промышленным гель-волокон Spectra и Dyneema.

Заключение

Можно сделать вывод, что во время 4-го прохода между валками, несмотря на существенное уплотнение фибриллярной структуры, которое обеспечивает повышенную прочность прекурсора, в нем генерируются микродефекты, которые «срабатывают» при дальнейшей ориентационной вытяжке. Баланс между упрочнением и разупрочнением, о котором говорилось выше, нарушается. Это предположение планируется в дальнейшем проверить, в частности, при помощи метода ИК-спектроскопии, проводя сравнительную оценку количества концевых групп в прекурсорах после 3-го и 4-го проходов между валками. В дальнейшем также планируется провести сравнительное деформационное упрочнение остальных пленок, прокатанных при температуре валков 124 °C и выше.

Список источников

1. Ризванова Е.А., Новак О.С., Сильников Н.М. Переработка волокнистых отходов из СВМПЭ иглопробивным способом для дальнейшего создания войлока // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2024. № 3–4 (189–190). С. 152–156.
2. 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.
3. Сильников Н.М., Фомичев А.Б., Гук И.В. и др. Применение сверхвысокомолекулярного полиэтилена «РУССИЛ» для защиты корпусных конструкций судов в сборнике: новые технологии в судостроении НТС-2023; сб. тр. отраслевой научно-технической конференции. Санкт-Петербург, 2023. С. 141–146.

4. 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 // *Reviews on Advanced Materials and Technologies*. 2022. Vol. 4. No 1. Pp. 14–20.
5. Сильников Н.М., Новак О.С., Каранин Г.А. Термомеханическое прессование полотна «РУС-СИЛ» // *Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму*. 2023. № 7–8 (181–182). С. 144–146.
6. Myansikova L.P., Boiko Yu.M., Egorov V.M. et al. Fine structure of UHMWPE reactor powder and its change in mechanical and thermal fields, Chapter 5. Pp. 93–153 in *Reactor Powder Morphology* ed. by P. Lemstra and L. Myasnikova Nova Sci. Publ., 2011.
7. Ozerin A.N., Ivanchev S.S., Chvalun S.N. et al. Properties of Oriented Film Tapes Prepared via Solid-State Processing of a Nascent Ultrahigh-Molecular-Weight Polyethylene Reactor Powder Synthesized with a Postmetallocene Catalyst. *Polym.Sci., A*, 12, 950 (2012).
8. Smith P., Lemstra P.J. High-strength polyethylene fibres from solution and gel spinning. *Macromol. Chem.*, 1979. 180 p. 2983.
9. Keller A., Pope D.P. Identification of Structural Processes in deformation of Oriented Polyethylene *J. Mater. Sci.* 1971. Pp. 453–478.
10. Марихин В.А., Мясникова Л.П. Надмолекулярная структура полимеров, химия. Ленинград, 1977. 240 с.
11. Bahadur Sh. The Effect of Hot and Cold Rolling on the Properties of Poly(oxymethylene) // *Polymer Journal*, 1975. Vol. 7, No 6. Pp. 613–621.
12. Gezovich D.M. and Geil P.H. Deformation of polyoxymethylene by rolling *J. Mater. Sci.*, 6, 509 (1971)
13. Morawiec J., Bartczak Z., Kazmierczak T., Galeski A. Rolling of polymeric materials with side constraints *Materials Science and Engineering A317* (2001). Pp. 21–27.
14. Joo Y. L., Zhou H., Lee S.-G. et al. Solid-State Compaction and Drawing of Nascent Reactor Powders of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 98, (2005). Pp. 718–730.
15. Qiu J., Murata T., Wu X., Kudo M. et al. Plastic deformation mechanism of crystalline polymer materials during the rolling process *J Mater Sci* (2013) 48:1920–1931.
16. Дроботько В.Ф., Мясникова Л.П., Борзенко А.П. и др. Двухэтапный метод получения высокопрочных лент СВМПЭ путем твердофазного формования // *Физика и техника высоких давлений* 2023. Том 33, № 2. С. 86–100.
17. Дроботько В.Ф. Мясникова Л.П., Макмак И.М. и др. Влияние прокатки на структуру и механические свойства компактированных пленок из порошков сверхвысокомолекулярного полиэтилена // *Материалы LXVI Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (АПП-2023)*. 23–27 сентября, Зеленогорск, Санкт-Петербург, Россия. С. 67.
18. Голубев Е.К., Куркин Т.С., Озерин А.Н. Высокопрочные пленочные нити, полученные твердофазной переработкой насцентных реакторных порошков сверхвысокомолекулярного полиэтилена // *Известия Академии наук. Серия химическая*. 2023. Том 72, № 3. С. 749–762.
19. New Trends in Physical Science Research Vol. 3, Ch. 9, Discussion on: Structural Changes in UHMWPE Reactor Powders during Sintering under Different Conditions Pp. 89–99, (2022)
20. Bartczak Z. Influence of molecular parameters on high-strain deformation of polyethylene in the plane-strain compression. Part II. Strain recovery *Polymer* 46, 10339, P. 1033 (2005)
21. Marikhin V.A., Myasnikova L.P. Structural Basis of high-strength high-modulus polymers, Chapter 2 (Pp. 36–92) in the book *Oriented Polymer Materials*, ed. by S.Fakirov Huethig &Wepf Verlag Zug Heidelberg (1996), Pp. 512.
22. Esteves G., Ramos K., Fancher Ch. M., Jones J. L. LIPRAS: Line-Profile Analysis Software. (2017)

References

1. Rizvanova E.A., Novak O.S., Silnikov N.M. Needle-punched processing of fibrous waste from UHMWPE for further felt production // *Issues of defense technology. Episode 16. Technical means of countering terrorism*. 2024. No 3–4 (189–190). Pp. 152–156.
2. Silnikov N.M., Novak O.S., Shifrina V.Yu. Improving the protective characteristics of special products through the use of polymer armor // *Issues of defense technology. Episode 16. Technical means of countering terrorism*. 2023. No 7–8 (181–182). Pp. 122–128.

3. Silnikov N.M., Fomichev A.B., Guk I.V. et al. The use of ultra-high molecular weight polyethylene «RUSSIL» for the protection of hull structures of ships // In the collection: New technologies in shipbuilding NTS-2023. Proceedings of the industry scientific and technical conference. Saint-Petersburg, 2023. Pp. 141–146.
4. 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 // Reviews on Advanced Materials and Technologies. 2022. Vol. 4. No 1. Pp. 14–20.
5. Silnikov N.M., Novak O.S., Karanin G.A. Thermomechanical pressing of the «RUSSIL» canvas // Issues of defense technology. Episode 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 7–8 (181–182). Pp. 144–146.
6. Myasnikova L.P., Boiko Yu.M., Egorov V.M. et al. Fine structure of UHMWPE reactor powder and its change in mechanical and thermal fields, Chapter 5. Pp. 93–153 in Reactor Powder Morphology ed. by P. Lemstra and L. Myasnikova Nova Sci. Publ., 2011.
7. Ozerin A.N., Ivanchev S.S., Chvalun S.N. et al. Properties of Oriented Film Tapes Prepared via Solid-State Processing of a Nascent Ultrahigh-Molecular-Weight Polyethylene Reactor Powder Synthesized with a Postmetallocene Catalyst. Polym.Sci., A, 12, 950 (2012).
8. Smith P., Lemstra P.J. High-strength polyethylene fibres from solution and gel spinning. Macromol. Chem., 1979. 180 p. 2983.
9. Keller A., Pope D.P. Identification of Structural Processes in the deformation of Oriented Polyethylene J. Mater. Sci. 1971. Pp. 453–478.
10. Marikhin V.A., Myasnikova L.P. Supramolecular structure of polymers, chemistry. Lenin-grad, 1977. 240 p.
11. Bahadur Sh. The Effect of Hot and Cold Rolling on the Properties of Poly(oxymethylene) // Polymer Journal. 1975. Vol. 7. No 6. Pp. 613–621.
12. Gezovich D.M. and Geil P.H., Deformation of polyoxymethylene by rolling J. Mater. Sci., 6, 509 (1971).
13. Morawiec J., Bartczak Z., Kazmierczak T., Galeski A. Rolling of polymeric materials with side constraints Materials Science and Engineering. A317 (2001). Pp. 21–27.
14. Joo Y. L., Zhou H., Lee S.-G. et al. Solid-State Compaction and Drawing of Nascent Reactor Powders of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene Journal of Applied Polymer Science, (2005). Vol. 98. Pp. 718–730.
15. Qiu J., Murata T., Wu X. et al. Plastic deformation mechanism of crystalline polymer materials during the rolling process J Mater Sci (2013) 48:1920–1931.
16. Drobotko V.F., Myasnikova L.P., Borzenko A.P. et al. A two-stage method for obtaining high-strength UHMWPE tapes by solid-phase molding // Physics and Technology of High Pressures. 2023. Vol. 33, No 2. Pp. 86–100.
17. Drobotko V.F., Myasnikova L.P., Makmak I.M. et al. The effect of rolling on the structure and mechanical properties of compacted films from ultrahigh molecular weight polyethylene powders // Proceedings of the LXVI International Conference «Actual Problems of Strength» (APP-2023), September 23–27, Zelenogorsk, St. Petersburg, Russia. P. 67.
18. Golubev E.K., Kurkin T.S., Ozerin A.N. High-strength film filaments obtained by solid-phase processing of bulk reactor powders of ultrahigh molecular weight polyethylene // Proceedings of the Academy of Sciences. The chemical series. 2023. Vol. 72, No 3. Pp. 749–762.
19. New Trends in Physical Science Research Vol. 3, Ch. 9, Discussion on: Structural Changes in UHMWPE Reactor Powders during Sintering under Different Conditions. Pp. 89–99. (2022).
20. Bartczak Z. Influence of molecular parameters on high-strain deformation of polyethylene in the plane-strain compression. Part II. Strain recovery Polymer 46, 10339. P. 1033 (2005).
21. Marikhin V.A., Myasnikova L.P. Structural Basis of high-strength high-modulus polymers, Chapter 2 (Pp. 36–92) in the book Oriented Polymer Materials, ed. by S.Fakirov Huethig & Wepf Verlag Zug Heidelberg (1996). 512 p.
22. Esteves G., Ramos K., Fancher Ch. M., Jones J. L. LIPRAS: Line-Profile Analysis Software. (2017).

УДК 623

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_121

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ 12ЧН 15/18, ОСНАЩЕННОГО ГИДРОПРИВОДОМ
АГРЕГАТА ГАЗОТУРБИННОГО НАДДУВА**

**SIMULATION MODELING OF A 12CHN 15/18 DIESEL ENGINE EQUIPPED
HYDRAULIC DRIVE FOR A GAS TURBINE SUPERCHARGER UNIT**

С.В. Ершов

S.V. Ershov

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

В статье представлены результаты разработки имитационной модели дизельного двигателя 12ЧН 15/18, оснащенного нерегулируемым турбокомпрессором. Детально описан процесс поэтапного создания модели, а также выполнена процедура ее верификации по результатам экспериментальных исследований. Для изучения влияния модернизации системы наддува на динамические качества дизельного двигателя, имитационная модель была дополнена модулем, моделирующим работу устройства вспомогательного раскручивания вала турбокомпрессора с использованием гидротурбины Пельтона. Полученные с помощью модернизированной модели разгонные характеристики двигателя позволяют оценить эффективность предложенного технического решения.

Ключевые слова: дизельный двигатель, турбокомпрессор, имитационная модель, гидротурбина Пельтона, переходный процесс.

The article presents the results of developing a simulation model of a 12CHN 15/18 diesel engine equipped with a non-adjustable turbocharger. The process of step-by-step creation of the model is described in detail, and the procedure for its verification based on the results of experimental studies is performed. To study the effect of the turbocharging system upgrade on the dynamic qualities of the diesel engine, the simulation model was supplemented with a module simulating the operation of the auxiliary turbocharger shaft spin-up device using a Pelton hydraulic turbine. The acceleration characteristics of the engine obtained using the upgraded model allow us to evaluate the effectiveness of the proposed technical solution.

Keywords: diesel engine, turbocharger, simulation model, Pelton turbine, transient process.

Характерной проблемой современных дизельных двигателей, оснащенных нерегулируемым газотурбинным наддувом, является ухудшение динамики их разгона, обусловленное инерционностью ротора турбокомпрессора. Оценка эффективности применения в агрегате газотурбинного наддува дизельного двигателя 12ЧН 15/18 вспомогательного гидравли-

ческого привода с высокоскоростным колесом Пельтона [1–4] требует анализа сложной системы нелинейных дифференциальных уравнений, основанной на фундаментальной математической модели динамики дизельного двигателя, описывающей работу поршневой части, его впускных и выпускных устройств и агрегатов наддува [5, 6]:

$$\frac{d\omega_d}{dt} = \frac{M_i - M_{\pi} - M_c}{J_d};$$

$$\frac{d\omega_{\text{ТК}}}{dt} = \frac{M_{\text{Т}} - M_{\text{К}}}{J_{\text{ТК}}};$$

$$\frac{dp_{\text{К}}}{dt} = \frac{R_{\text{в}} \cdot T_{\text{К}}}{V_{\text{ВП}}} (G_{\text{К}} - G_{\text{д}});$$

$$\frac{dp_{\text{Г}}}{dt} = \frac{R_{\text{Г}} \cdot T_{\text{Г}}}{V_{\text{ВЫП}}} (G_{\text{д}} + G_{\text{ТОПЛ}} - G_{\text{Т}}),$$

где ω_d — угловая скорость коленчатого вала двигателя;

t — время;

M_i — индикаторный крутящий момент дизельного двигателя;

M_{π} — момент внутренних потерь в дизельном двигателе;

M_c — момент сопротивления на коленчатом вале двигателя;

J_d — приведенный момент инерции двигателя и потребителя;

$\omega_{\text{ТК}}$ — угловая скорость ротора ТКП;

$M_{\text{Т}}$ — крутящий момент, развиваемый турбиной ТКП;

$M_{\text{К}}$ — крутящий момент, необходимый для привода компрессора;

$J_{\text{ТК}}$ — приведенный момент инерции ротора ТКП;

$p_{\text{К}}$ — давление, создаваемое компрессором;

$R_{\text{в}}$ — газовая постоянная воздуха;

$T_{\text{К}}$ — температура воздуха на выходе из компрессора;

$G_{\text{К}}$ — массовый расход воздуха через компрессор;

$G_{\text{д}}$ — массовый расход воздуха через поршневую часть дизельного двигателя;

$V_{\text{ВП}}$ — объем впускного коллектора;

$p_{\text{Г}}$ — давление отработавших газов в выпускном коллекторе двигателя;

$R_{\text{Г}}$ — газовая постоянная отработавших газов;

$T_{\text{Г}}$ — температура газов перед турбиной ТКП;

$G_{\text{ТОПЛ}}$ — массовый расход топлива дизельным двигателем;

$G_{\text{Т}}$ — массовый расход газа через турбину;

$V_{\text{ВЫП}}$ — объем выпускного коллектора.

Решение таких уравнений традиционными методами крайне затруднительно. MATLAB/Simulink как современный инструмент имитационного моделирования существенно упрощает реализацию и расчет подобных моделей, благодаря встроенным библиотекам компонентов [7, 8]. В данной статье представлена верифицированная модель в Simulink R2024a, позволяющая исследовать влияние гидропривода на разгонные характеристики дизельного двигателя 12ЧН 15/18 и оценить эффективность такого способа снижения длительности переходного процесса системы «ДВС — турбокомпрессор».

Имитационное моделирование построено по следующему плану:

- построение имитационной модели существующего двигателя 12ЧН 15/18 в среде Simulink MATLAB R2024a, ее верификация по результатам экспериментальных исследований;

- дополнение имитационной модели двигателя моделью устройства, раскручивающего вал ротора турбокомпрессора гидротурбиной Пельтона, получение разгонных характеристик до и после модернизации.

Для реализации плана и управления процессами моделирования разработан Live-script в среде MATLAB R2024a.

Имитационная модель двигателя построена с учетом следующих ограничений и допущений:

- разгон двигателя осуществляется в диапазоне от 1300 до 2000 мин⁻¹, что соответствует частоте вращения коленчатого вала при максимальном крутящем моменте и максимальной мощности соответственно;

- нагрузка на двигатель осуществляется дискретно, со значениями 100, 80, 60, 40 и 0 процентов от номинала по нагрузочной характеристике при частоте вращения 2000 мин⁻¹;

- функции изменения коэффициента избытка воздуха, подаваемого на вход модели, получены по результатам интерполяции результатов натурных измерений, полученных при указанных выше нагрузках, и не изменяются при увеличении динамики разгона ротора турбокомпрессора (экспериментальные данные, полученные на ООО «ЧТЗ-УРАЛТРАК» в 2020 году при определении скоростной, нагрузочных и характеристики холостого хода дизельного двигателя 12ЧН 15/18, а также расчетные данные, полученные в программном комплексе «Дизель-РК»

разработчик А.С. Кулешов, МГТУ им. Баумана) [9];

– зависимости степени наддува от частоты вращения ротора турбокомпрессора и массового расхода воздуха получены методом линейной регрессии результатов измерений при испытаниях существующего турбокомпрессора ТКР 337-300СБ № 2Ш03АТ0503 (характеристики турбокомпрессора в точках совместной работы с двигателем 12СН 15/18 на номинальном режиме и режиме максимальной мощности получены в ходе безмоторных испытаний в ГСКБД «Турбина» в 2017 году) [10];

– внешние условия в процессе моделирования остаются постоянными;

– моделирование происходит с шагом 0,001 с, что во много раз больше несущей частоты и выполняет требования к частоте дискретизации аналоговых сигналов по теореме Котельникова;

– в качестве решателя выбран алгоритм с постоянным шагом вычисления.

Имитационная модель содержит следующие блоки моделирования: тепловой расчет двигателя, поршневая часть двигателя, расчет характеристик компрессора, расчет характеристик турбины; механическая система компрессор-турбина-гидротурбина Пельтона; расчет характеристик гидротурбины Пельтона; элементы для верификации с результатами натурного эксперимента.

Тепловой расчет двигателя

Тепловой расчет двигателя осуществляется в блоке, являющимся внутренней функцией MATLAB. Как видно из рис. 1, блок принимает



Тепло_engine

Рис. 1. Блок «Тепловой расчет двигателя» и фрагмент содержимого функции

на вход текущие значения: частоты вращения коленчатого вала двигателя, коэффициента избытка воздуха, температуры воздуха на выходе из компрессора, давления отработавших газов в выпускном коллекторе двигателя, температуры газов перед турбиной ТКП, давления, создаваемого компрессором.

На выход из блока подаются значения: эффективного крутящего момента, секундного массового расхода воздуха, эффективной мощности.

Внутри блока происходит расчет тепловых процессов двигателя, в результате которого вычисляется среднее эффективное давление, и на его основании остальные выходные текущие параметры.

Поршневая часть двигателя

Блок «Поршневая часть двигателя» выполнен с использованием элементов библиотеки Simscape Simulink и предназначен для имитации динамических процессов в механической системе двигателя: влияние инерции, вязкостного и сухого трения на динамику разгона двигателя (рис. 2).

На вход блок принимает текущие значения крутящего момента, рассчитанного в блоке Тепловой расчет двигателя, а также коэффициент нагрузки, создаваемой испытательным стендом. На выходе из блока — текущая частота вращения коленчатого вала двигателя.

Расчет характеристик компрессора

Блок «Расчет характеристик компрессора» выполнен в виде функции MATLAB (рис. 1), которая принимает на вход текущие значения

```
% Впуск свежего заряда
Pa = ((epsil-1)*Th_v * Pk * (Tk + dT)/Tk + Pr)/epsil;
%Давление рабочего тела в конце такта впуска
gamma = Pr * Tk / ((epsil-1) * Th_v * Pk * Tr);
%Коэффициент остаточных газов
Ta = (Tk + dT + gamma * Tr) / (1 + gamma);
%Температура рабочего тела в конце впуска
va = 0.008314 * Ta / (28.97 * Pa);
%Удельный объем рабочего тела в конце такта впуска, м3/kg
```

частоты вращения вала ротора компрессора, секундный массовый расход воздуха, температуру и давление забираемого из атмосферы воздуха, частоту вращения коленчатого вала двигателя.

Степень повышения давления вычисляется с помощью регрессионной модели (табл. 1), рассчитанной по результатам экспериментальных значений параметров турбокомпрессора ТКР 337-100СБ (получены в отделе ГСКБД на безмоторном стенде и при проверке параметров наддува в составе двигателя 12ЧН 15/18). Результаты регрессионного анализа сведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, значения «Р-Значение» $< 0,05$ для всех факторов, что с доверительной вероятностью 0,95 говорит о высокой статистической значимости каждого из них.

Расчет характеристик турбины

Блок «Расчет характеристик турбины» (рис. 3) принимает на вход текущие значения мас-

сового расхода воздуха, удельную адиабатическую работу сжатия компрессором, температуру отработавших газов, поступающих на вход турбины, давление воздуха на выходе из турбины и коэффициент избытка воздуха. На выходе из блока получено давление отработавших газов перед турбиной и мощность, создаваемая турбиной для раскрутки вала ротора компрессора.

Внутри блок «Расчет характеристик турбины» содержит: блок вычисления расхода отработавших газов через турбину, блок вычисления давления перед турбиной, функцию расчета мощности.

Верификация имитационной модели

Для оценки правильности подбора коэффициентов в модель введены блоки верификации:

- разгонная характеристика двигателя до модернизации (рис. 4);
- внешняя скоростная характеристика двигателя.

Таблица 1

Результаты регрессионного анализа

Фактор	Коэфф. регрессии	Стандартная ошибка	t-статистика	Р-Значение	Нижние 95 %	Верхние 95 %
Смещение	-2,18680350	0,171215771	-12,772	1,039E-12	-2,538	-1,834
n , мин ⁻¹	0,000133633	7,00196E-06	19,085	8,155E-17	0,000119	0,000148
$G_{в.пр}$	-1,13682310	0,175906786	-6,462	7,54E-07	-1,498	-0,775

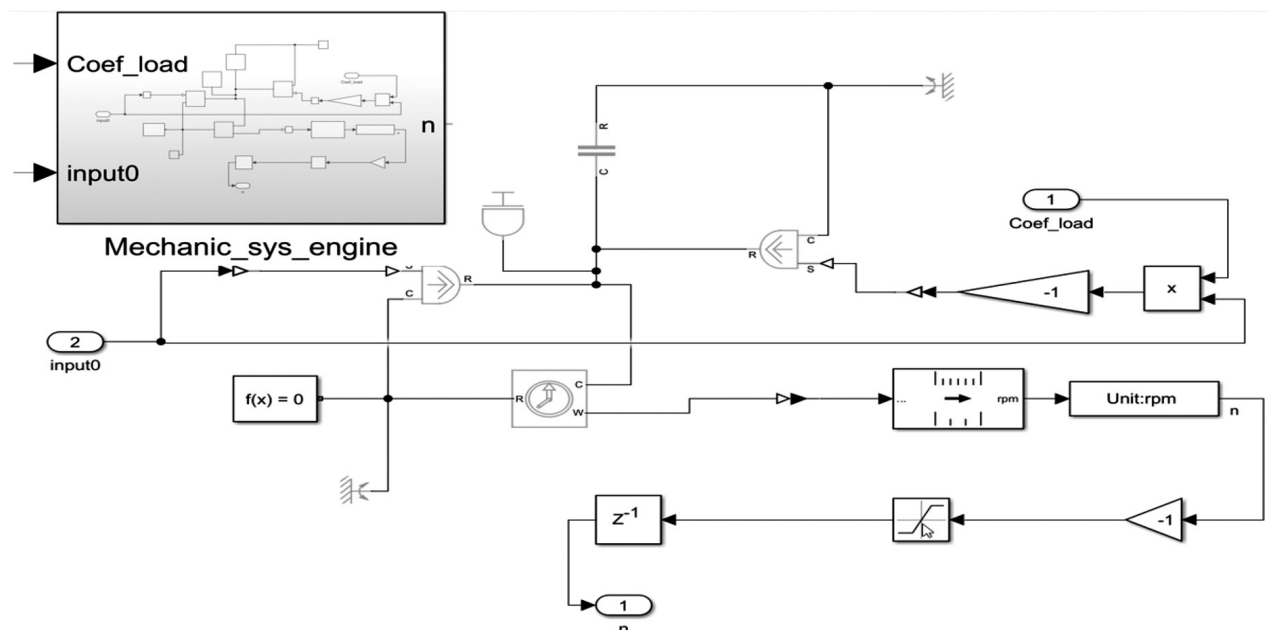


Рис. 2. Блок «Поршневая часть двигателя» и его содержимое

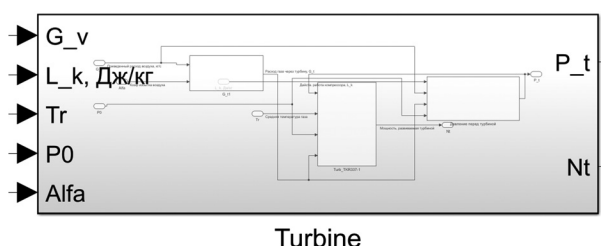


Рис. 3. Блок «Расчет характеристик турбины» и его содержимое

Блок «Разгонная характеристика двигателя до модернизации» выдает в зависимости от заданного извне значения нагрузки, разгонную характеристику, полученную опытным путем.

Результаты эксперимента аппроксимированы полиномами второй степени и записаны в виде функций, как показано на табл. 2.

Блоки внешней скоростной характеристики (рис. 5) получены путем интерполяции табличных значений результатов натурального эксперимента при различных нагрузках. На вход принимают значения частоты вращения коленчатого вала двигателя и процент нагрузки. На выходе получаем значение эффективной мощности, крутящего момента.

Верификация построенной имитационной модели двигателя производилась без учета влияния турбины Пельтона путем сравнения характе-

ристик, полученных моделированием, с результатами натуральных экспериментов:

- внешней скоростной характеристики (ВСХ);
- разгонных характеристик на нагрузках 100, 80, 60, 40 и 0 процентов.

Для верификации по внешней скоростной характеристике в LiveScript запускалась модель без турбины Пельтона, извлекались результаты моделирования, строилась внешняя скоростная характеристика (рис. 6).

Оценка сходимости ВСХ по результатам модельного и натурального эксперимента производилась по среднему квадратическому отклонению результатов модельного и натурального экспериментов.

Среднее квадратическое отклонение эффективной мощности, полученной моделированием, от результатов эксперимента составило 2,69 кВт, что дает основание сделать вывод об адекватном описании процессов в имитационной модели.

Для верификации по разгонным характеристикам в LiveScript запускалась модель без турбины Пельтона, извлекались результаты моделирования, строились разгонные характеристики при нагрузках 100, 80, 60, 40 и 0 процентов (рис. 7).

Оценка сходимости разгонной характеристики при различных режимах нагрузки по ре-

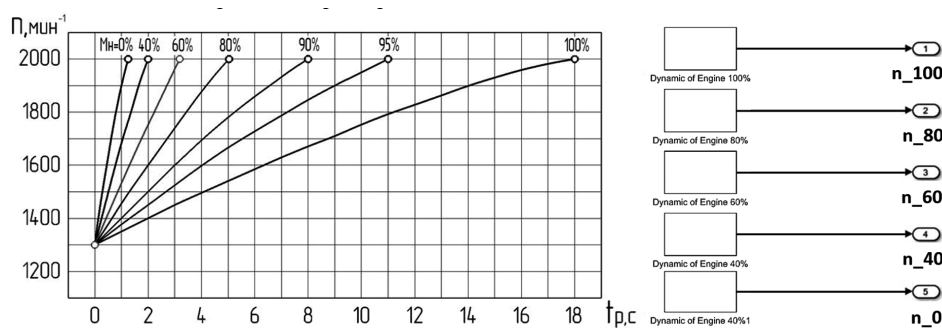


Рис. 4. Блок разгонной характеристики

Результаты регрессионного анализа

Нагрузка, %	Уравнение регрессии	R^2
100 %	$y = -0,6981x^2 + 51,653x + 1299,7$	0,9997
80 %	$y = -3,1513x^2 + 154,22x + 1303,7$	0,9992
60 %	$y = -11,905x^2 + 250,71x + 1301,2$	0,9995
40 %	$y = -42,857x^2 + 435,71x + 1298,6$	0,9995
0 %	$y = -37,852x^2 + 668,75x + 1301,1$	0,9992

Таблица 2

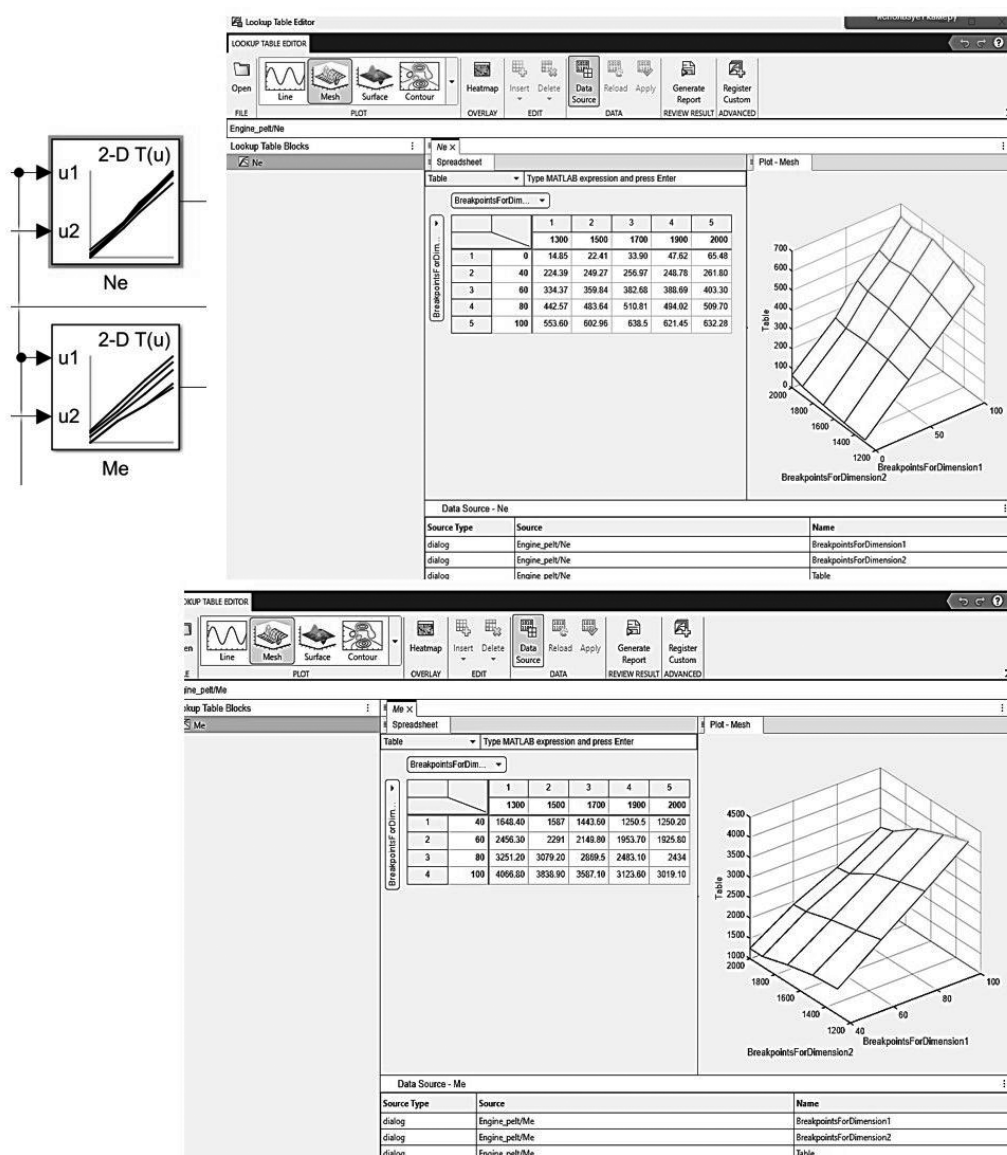


Рис. 5. Блоки внешней скоростной характеристики, полученные экспериментальным путем

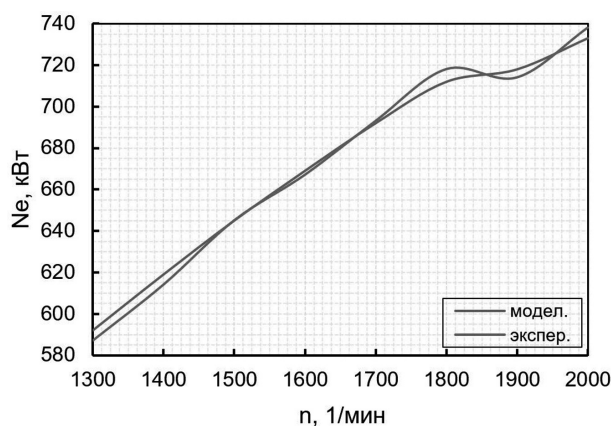


Рис. 6. Сравнение N_e по внешней скоростной характеристике двигателя 12ЧН 15/18 по результатам модельного и натурного экспериментов

результатам модельного и натурного эксперимента производилась по среднему квадратическому отклонению результатов модельного и натурного экспериментов.

Среднее квадратическое отклонение частоты вращения коленчатого вала двигателя, полученной моделированием, от результатов эксперимента составило: $12,6 \text{ мин}^{-1}$ — при нагрузке 100 %; $24,0 \text{ мин}^{-1}$ — при нагрузке 80 %; $6,0 \text{ мин}^{-1}$ — при нагрузке 60 %; $8,6 \text{ мин}^{-1}$ — при нагрузке 40 %; $42,3 \text{ мин}^{-1}$ — при нагрузке 0 %.

Таким образом, как следует из рис. 7, среднеквадратическое отклонение результатов модельного эксперимента от натурного не превышает 5 % от минимального значения измеряемых величин, что говорит о достаточной адекватности построенной имитационной модели.

Построенная имитационная модель серийного двигателя 12ЧН 15/18 в среде Simulink MATLAB R2024a после ее верификации была дополнена моделью устройства, раскручивающего вал ротора турбокомпрессора гидротурбины Пельтона. В имитационную модель введены следующие блоки моделирования:

- механическая система компрессор-турбина-гидротурбина Пельтона;
- расчет характеристик гидротурбины Пельтона.

Блок «Механическая система компрессор-турбина-гидротурбина Пельтона» (рис. 8) служит для имитации механических процессов динамики разгона ротора турбокомпрессора и выполнен с использованием библиотеки механических компонентов Simscape.

Блок принимает на вход суммарный крутящий момент от газовой турбины, компрессора и турбины Пельтона. На выход выдается текущая угловая скорость ротора.

Блок «Расчет характеристик гидротурбины Пельтона» (рис. 9) принимает на вход текущие значения частоты вращения коленчатого вала двигателя, угловую скорость вала ротора турбокомпрессора, на выход выдается крутящий момент, создаваемый гидротурбиной Пельтона, а также момент, отбираемый масляным насосом от двигателя.

Блок, кроме вычислительных элементов сигналов, содержит в себе элементы механической

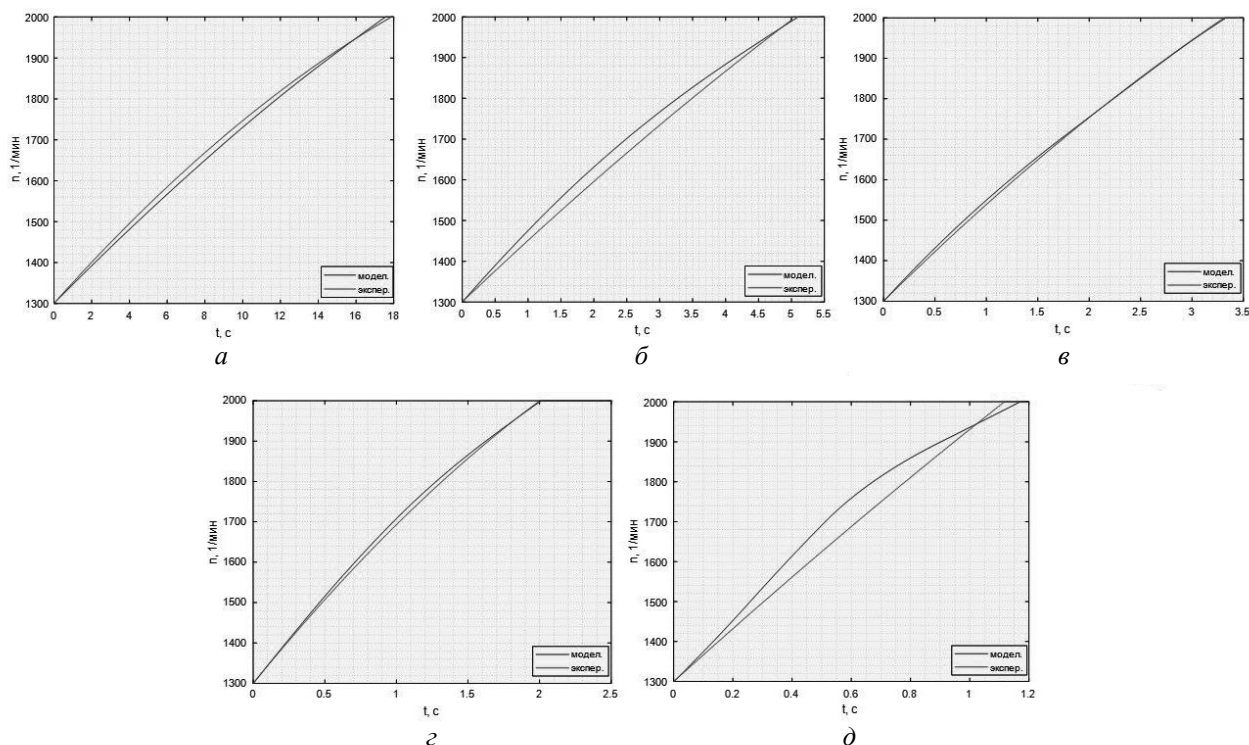


Рис. 7. Сравнение разгонных характеристик двигателя 12ЧН 15/18 по результатам модельного и натурного экспериментов при различных режимах нагрузки:

а — 100 %; б — 80 %; в — 60 %; г — 40 %; д — 0 %

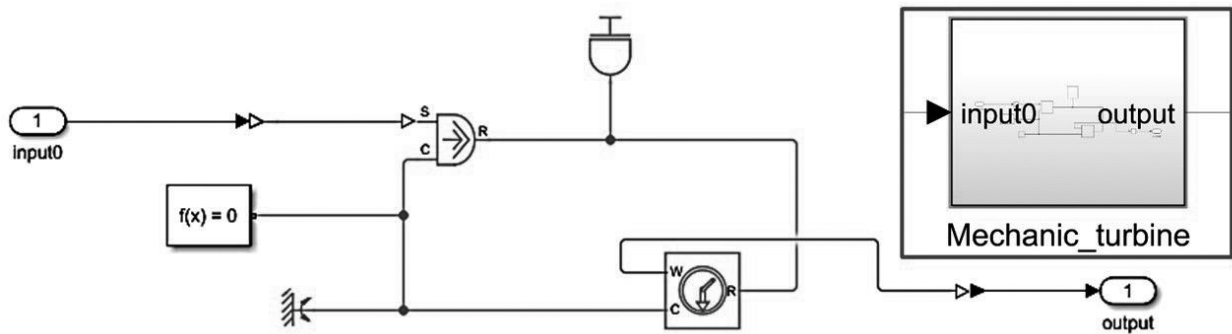


Рис. 8. Блок «Механическая система компрессор-турбина-гидротурбина Пельтона» и его содержимое

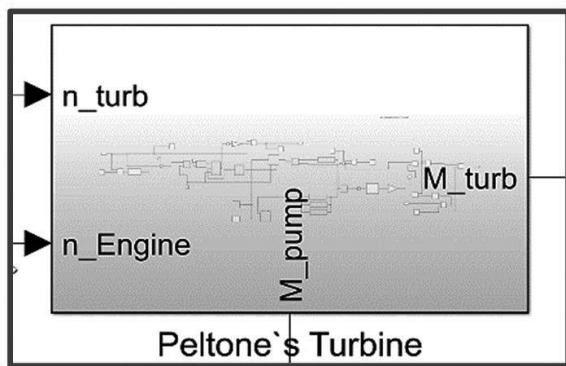


Рис. 9. Блок «Расчет характеристик турбины Пельтона»

библиотеки Simscape, а также элементы гидравлической библиотеки. Механическая часть получает на вход значения частоты вращения коленчатого вала двигателя, которое преобразуется редуктором и передается на насос. Система имеет возможность отключения насоса по значению частоты вращения коленчатого вала. Созданное насосом давление передается в гидравлическую часть, в которой имитируется гидравлическое сопротивление в трубопроводах и трех форсунок турбины Пельтона. Значения массового расхода масла и его давление на выходе из форсунок далее преобразуются в скорость истечения, а затем, с учетом текущей скорости колеса — в силу давления на лопатки. Последняя преобразуется в крутящий момент, который с учетом редуктора подается на выход из блока.

Таким образом, разработана и верифицирована детализированная имитационная модель дизельного двигателя 12ЧН 15/18 в MATLAB/Simulink. Адекватность модели подтверждена малыми отклонениями от натурных экспериментов по внешней скоростной характеристике

(2,69 кВт) и разгонным характеристикам ($<42,3 \text{ мин}^{-1}$, $<5 \%$). Интеграция в модель системы наддува устройства на основе гидротурбины Пельтона, преобразующего гидравлическую энергию потока штатного масляного насоса в механическую работу для раскрутки ротора ТКП, позволяет получить разгонные характеристики модернизированного двигателя. Предварительный анализ полученных характеристик указывает на потенциальное улучшение динамики разгона. Предложенный способ и имитационная модель представляют практический интерес для повышения приемистости дизельных двигателей с газотурбинным наддувом (ГТН) в условиях переменных нагрузок. Дальнейшие исследования целесообразно направить на оптимизацию параметров гидропривода, экспериментальную проверку эффективности модернизации и оценку ее экономической целесообразности.

Список источников

1. Устройство для повышения эффективности агрегата наддува силовой установки танка: пат. 2837174 С1 Рос. Федерация, № 2024128039; заявл. 23.09.2024; опубл. 26.03.2025, Бюл. № 9. 9 с.
2. Агрегат наддува силовой установки танка: пат. 230468 U1 Рос. Федерация, № 2024128281; заявл. 25.09.2024; опубл. 05.12.2024, Бюл. № 34. 8 с.
3. Турбокомпрессор дизельного двигателя военной гусеничной машины с устройством для разгона танка: пат. 214066 U1 Рос. Федерация: № 2022114629; заявл. 30.05.2022; опубл. 11.10.2022, Бюл. №29. 7 с.
4. Устройство для разгона ротора турбокомпрессора силовой установки танка: пат. 2784830

С1 Рос. Федерация № 2022114630: заявл. 30.05.2022: опубл. 30.11.2022, Бюл. № 34. 9 с.

5. Крутов В.И., Рыбальченко А.Г. Регулирование турбонаддува ДВС: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1978. 212 с.

6. Крутов В.И., Шатров В.И. Некоторые результаты экспериментального исследования переходных процессов дизеля с турбонаддувом // Известия вузов. Машиностроение. 1965. № 12. С. 23–26.

7. MathWorks. Simscape User's Guide (R2024a). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape> (дата обращения: 02.07.2025).

8. Овинников А.А. Основы работы в средах MATLAB и Simulink: учеб. пособие. М.: КУРС, 2025. 137 с. Текст: электронный. URL: <https://znanium.ru/catalog/product/2192127> (дата обращения: 02.07.2025).

9. Кулешов А.С. Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС: диссертация докт. техн. наук., МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2011. 235 с.

10. Техническая справка о результатах испытаний турбокомпрессоров 337-100СБ и 4353.00.000, ЧТЗ-УРАЛТРАК», Челябинск, 2020. 5 с.

References

1. Ustrojstvo dlya povu'sheniya e'ffektivnosti agregata nadduva silovoj ustanovki tanka: 2837174 S1 Ros. Federaciya: zayavl. 23.09.2024: opubl. 26.03.2025.

2. Agregat nadduva silovoj ustanovki tanka: pat. № 230468 U1 Ros. Federaciya: zayavl. 25.09.2024: opubl. 05.12.2024.

3. Turbokompressor dizel'nogo dvigatelya voennoj gusenichnoj mashiny` s ustrojstvom dlya razgona tanka: pat. 214066 U1 Ros. Federaciya: zayavl. 30.05.2022: opubl. 11.10.2022.

4. Ustrojstvo dlya razgona rotora turbo-kompressora silovoj ustanovki tanka: pat. 2784830 S1 Ros. Federaciya: zayavl. 30.05.2022: opubl. 30.11.2022.

5. Krutov V.I., Ry`bal`chenko A.G. Regulirovanie turbonadduva DVS / Uchebnoe posobie dlya vuzov. M.: Vy`sshaya shkola, 1978. 212 p.

6. Krutov V.I., Shatrov V.I. Nekotory`e rezul`taty` e`ksperimental'nogo issledovaniya perexodny`x processov dizelya s turbonadduvom // Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. 1965. No 12. Pp. 23–26.

7. MathWorks. Simscape User's Guide (R2024a). [E`lektronny`j resurs]. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape> (data obrashheniya: 02.07.2025).

8. Ovinnikov A.A. Osnovy` raboty` v sredax MATLAB i Simulink : uchebnoe posobie. Moskva: KURS, 2025. 137 P. Tekst: e`lektronny`j. URL: <https://znanium.ru/catalog/product/2192127> (data obrashheniya: 02.07.2025).

9. Kuleshov A.S. Razvitie metodov rascheta i optimizaciya rabochix processov DVS. Dissertaciya dokt. texn. nauk., MGTU im. N.E`.Baumana, Moskva, 2011. 235 p.

10. Texnicheskaya spravka o rezul`tatax ispy`taniy turbokompressorov 337-100SB i 4353.00.000, ChTZ-URALTRAK», Chelyabinsk, 2020. 5 p.

УДК 623.483

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_130

**ПЕРСПЕКТИВНАЯ СИСТЕМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ
В ЗОНЕ ПРОВЕДЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ВОЕННОЙ ОПЕРАЦИИ**

**A PROSPECTIVE DECISION-MAKING SYSTEM FOR ACCELERATING THE
RECOVERY OF MILITARY-INDUSTRIAL COMPLEXES IN THE SVO ZONE**

Канд. техн. наук К.М. Комаров, канд. соц. наук С.А. Дикунов

Ph.D. K.M. Komarov, Ph.D. S.A. Dikunov

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

В статье рассмотрен вопрос повышения оперативности восстановления образцов вооружения и военной техники (ВВТ) в рамках существующей системы управления восстановлением ВВТ с учетом имеющихся средств обмена информацией. Проведен анализ организации управления восстановлением ВВТ в условиях СВО. Предлагается провести совершенствование существующей системы в два этапа. На первом этапе разработать информационно-управляющую перспективную систему принятия решений (ПСПр) на восстановление ВВТ с локализацией управления на трех уровнях системы восстановления — бригадном, армейском и уровне группировки войск (сил). На втором этапе создать единый центр управления восстановлением, развернутый на базе Управления технического обеспечения (ТехО) группировки войск (сил).

Ключевые слова: система управления восстановлением, вооружение и военная техника, перспективная система принятия решений, информационно-управляющая система.

The article considers the issue of increasing the efficiency of restoring weapons and military equipment samples (hereinafter referred to as IWT) within the framework of the existing IWT restoration management system, taking into account the available means of information exchange. The analysis of the organization of the IWT restoration management in the conditions of the SVO is carried out. It is proposed to improve the existing system in two stages. At the first stage, we will develop an information and management perspective decision-making system (hereinafter referred to as the CPMS) for the restoration of weapons and military equipment with localization of management at three levels of the restoration system — brigade, army and group of forces (forces). In the second stage, create a unified recovery management center based on the Technical Support Directorate (TechO) of the group of troops (forces).

Keywords: recovery management system, weapons and military equipment, advanced decision-making system, information and control system.

Своевременное восстановление работоспособности вышедших из строя ВВТ в ходе специальной военной операции на стратегических направлениях (СН) — одна из главных проблем ТехО, возложенных на автомобильную службу (АС).

При изучении особенностей организации восстановления ВВТ в условиях проведения СВО был сделан вывод о формировании новых принципов построения системы управления восстановлением (СУВ) ВВТ, сложившихся в настоящее время под воздействием современных

средств поражения и тактики их применения противником. Данные принципы охватывают все основные процессы восстановления ВВТ — организацию технической разведки, эвакуации и ремонта поврежденных образцов [1].

Рассмотрим отдельно организацию функционирования системы восстановления в каждом из этих режимов.

1. Организация технической разведки. Согласно классической схеме техническая разведка районов размещения эвакуационного фонда проводится силами и средствами эвакуационных подразделений, временными формированиями, выделяемыми от ремонтных подразделений и воинских частей [2]. К ним относятся:

- ремонтно-эвакуационные группы (РЭГ);
- эвакуационные группы (ЭГ);
- комплексные эвакуационные группы (КЭГ).

В ходе специальной военной операции, когда образцы ВВТ применяются в основном автономно (не в составе штатных подразделений), командный состав боевых подразделений лучше владеет обстановкой и чаще всего сам заинтересован в обнаружении и скорейшей эвакуации неисправной (пораженной) техники. Поэтому вся информация о наличии, размещении и техническом состоянии ремонтного фонда поступает на пункты управления ТехО с различных направлений и концентрируется в технических частях ремонтных батальонов, где происходит оценка возможности восстановления объектов (в зависимости от тяжести повреждений, наличия специалистов-ремонтников, в том числе в выездных ремонтных бригадах (ВРБ) промышленности, и наличия ЗИП на складе).

Введение в штат отдельного ремонтно-восстановительного батальона (комплексного ремонта) (*орвб(кр)*) отделения технической разведки позволило расширить возможности батальона по ведению технической разведки.

2. Организация эвакуации. Эвакуация неисправных (поврежденных) образцов ВВТ проводится силами подвижных средств эвакуации (ПСЭ) ремонтных подразделений боевых частей [2], которые сосредотачивают ремонтный фонд в своих тыловых районах, где силами ремонтных подразделений этих частей производится первичная дефектация с занесением данных в план восстановления вооружения и военной тех-

ники воинской части. В дальнейшем этот план пересылается в *орвб(кр)*, где производится оценка возможности выполнения ремонта силами ремонтных подразделений (учитываются возможности ремонтных подразделений по наличию специалистов-ремонтников, свободных машиномест и ЗИП).

Ремонтный фонд, после согласования с заместителем командующего армией по вооружению, в указанное время отправляется на техническую позицию батальона силами и средствами отправителя (части).

В случае отсутствия у отправителя подвижных средств эвакуации, по предварительному согласованию, перемещение осуществляется силами и средствами отдельного автомобильного батальона (многоосных тяжелых колесных тягачей — МТКТ) бригад материально-технического обеспечения (МТО). Седельные автотягачи с полуприцепами-тяжеловозами рассредоточены по стоянкам и «площадкам подскока» в районах ответственности и, в случае необходимости, готовы осуществить перевозку ремонтного фонда из тылового района части на техническую позицию ремонтной воинской части и обратно.

По прибытии изделия в ремонт оно сразу же подается на ремонтный участок в производственное помещение, представляющее собой цеховое здание, хранилище или бокс (укрытие) (рис. 1).

Стоянка неисправной техники под открытым небом, а также скопление ремонтного фонда или готовой продукции не допускается. Такой порядок отличен от классического, когда ремонтная рота (эвакуации и ремонтного фонда) разворачивает своими силами сборный пункт поврежденных машин (далее — СППМ), и в дальнейшем на нем разворачиваются остальные ремонтные подразделения батальона. Принятый порядок обусловлен, прежде всего наличием у противника эффективных средств разведки (далее — СР) (спутниковая орбитальная группировка, разведывательные БПЛА), а также средств поражения большой дальности. Отдельного внимания требует вопрос эвакуации техники из-под огня и из районов, находящихся под воздействием средств поражения противника. Как правило, эвакуация осуществляется в ночное время с помощью КЭГ. Сначала с помощью бронированной ремонтно-эвакуационной машины (БРЭМ-1М) до мес-



Рис. 1 Временный участок по ремонту ВВТ

та погрузки на трал (вне зоны досягаемости средств поражения противника), потом тралом до тылового района части или на технические позиции ремонтно-восстановительного органа (РВО) (*орвб(кр)*).

Ремонтно-восстановительные органы разворачиваются в основном на территории бывших промышленных объектов — автомобильных заводов, автошкол ДОСААФ и т.д.

3. Организация ремонта имеет следующие тенденции:

1) широкое использование имеющейся промышленной базы, причем не только в качестве укрытия, но и в качестве технологической базы (поиск и реанимация станочного оборудования, ремонт и использование стационарных грузоподъемных устройств, закупка станков и конструирование дополнительного технологического оборудования).

На большинстве объектов имеется промышленная электрическая сеть номиналом 380 и 220 вольт. В случае ее отсутствия личный состав использует имеющиеся штатные дизельные электростанции ЭД-30 (АД-30);

2) использование ремонтными воинскими частями цеховых помещений для размещения производственных участков, с применением штатного технологического и грузоподъемного оборудования, не восстанавливая имеющееся, или разрабатывая и производя новое из подручных материалов;

3) стремление ремонтных частей и подразделений расширить объем выполняемых работ, занимаясь литейным производством, сложным ремонтом двигателей внутреннего сгорания (ДВС), бортовых передач (БП), топливных насо-

сов высокого давления (ТНВД), коробок передач и т.д. Изготовление дополнительных защитных противодронных сеток и экранов;

4) недостаток самых востребованных номенклатур ЗИП приводит к созданию обменных пунктов агрегатов (ОПА), в которых сосредотачиваются исправные узлы, блоки и агрегаты, демонтированные с ВВТ безвозвратных потерь (БВП), а также снятые и затем отремонтированные. Это позволяет осуществлять срочный ремонт агрегатным методом (рис. 2);

5) на базе ремонтных подразделений и воинских частей происходит обмен техническим опытом специалистов-ремонтников с других воинских частей. Ценятся специалисты-электрики и специалисты по ремонту ДВС, трансмиссии и топливной аппаратуры;

6) широко применяются ВРБ от ремонтных частей и подразделений.

Из-за особенности их работы на переднем крае принято решение об их перемещении на легковых автомобилях повышенной проходимости. Перемещение ВРБ осуществляется с необходимым оборудованием на легковых автомобилях повышенной проходимости типа УАЗ-39034. Штатные автомобили КамАЗ-5350 или Урал-4320 обладает повышенными демаскирующими признаками (заметность для средств разведки, повышенный шум при перемещении, низкая маневренность в сочетании с большими габаритами).

Применяемые для перемещения ВРБ автомобили оборудованы защитными экранами, изготовленными из сварной сетки, и комплексными средствами РЭБ (оборудование для борьбы с БПЛА квадрокоптерного типа и FPV-дронами), а также штатными маскировочными сетями.

Использование ВРБ на таких автомобилях позволяет:

- сократить сроки прибытия личного состава к месту проведения работ;
- упростить маскировку подвижных средств технического обслуживания и ремонта (далее — ПСТОР) и технологического оборудования с использованием защитных свойств местности;
- повысить возможности по подъезду непосредственно к орудиям и боевым машинам, находящимся на позиции;
- сократить сроки покидания места проведения работ в случае воздействия огневых средств противника;
- исключить демаскирующие факторы, связанные с использованием штатных ПСТОР (звук от перемещения, внешние контуры, высота профиля, звук от работы собственного генератора).

Организация управления восстановлением ВВТ осуществляется должностными лицами автомобильной службы через заместителей командиров (командующих) по вооружению всех уровней (рис. 3).

При этом запрос на использование сил и средств старшего начальника (по необходимости) производится последовательно снизу-вверх. Схема информационных связей между элементами действующей системы управления восстановлением (СУВ) ВВТ представлена на рис. 4.

Повышение оперативности восстановления ВВТ в рамках существующей СУВ с учетом имеющихся средств обмена информацией можно достичь в следующих двух вариантах построения (этапах ее развития).

Первый этап. Разработка перспективной системы принятия решений на восстановление ВВТ с локализацией управления на трех уровнях системы восстановления — бригадном, армейском и уровне ГрВ(с).

Второй этап. Дополнение разработанной перспективной системы принятия решений на восстановление ВВТ с созданием единого центра управления восстановлением, развернутом на базе пункта управления ТехО ГрВ(с).

В первом варианте развития СУВ предлагаемая схема организации функционирования и



Рис. 2. Пример обменного пункта агрегатов



Рис. 3. Организация восстановления ВВТ

информационного обмена между структурными элементами СУВ ВВТ с учетом штатных и перспективных средств связи и обмена информацией имеет вид, который представлен на рис. 5.

Вся зона боевых действий делится на зоны ответственности — бригады, армии и ГрВ(с). Внутри каждой зоны в части, касающейся СУВ, имеются управляющие и исполнительные элементы.

К управляющим элементам СУВ относятся Центры управления восстановлением (ЦУВ), возглавляемые заместителями командиров (командующих) по вооружению, развернутые на тыловых пунктах управления соответствующих звеньев — бригады, армии и ГрВ(с).

Основной задачей ЦУВ является сбор, обработка поступающей информации об элементах системы восстановления в своей зоне ответственности и принятие оперативных решений на проведение комплекса мероприятий по технической разведке, эвакуации и ремонту неисправных (поврежденных) образцов ВВТ. А в случае недостаточности собственных сил и средств — организация привлечения сил и средств старшего начальника.

К исполнительным элементам СУВ относятся ремонтно-восстановительные подразделения и воинские части, части материально-технического обеспечения, имеющие в своем составе ПСЭ, а также назначенные из их состава подвижные группы эвакуации и технической разведки.

Информационный обмен между уровнями СУВ осуществляется по существующим и перспективным каналам связи, рассмотренным на рис. 4 и 5.

Для оптимизации процесса восстановления предлагается внедрить в СУВ информационно-управляющую ПСПР, обеспечивающую сопровождение процесса восстановления на семи уровнях: от первого — поддержка работы группы технической разведки, до седьмого — принятие решений заместителем командующего группировкой по вооружению.

Рассмотрим функционирование ПСПР на каждом уровне подробнее.

Первый уровень. Повышение оперативности работы группы технической разведки достигается введением в ее состав БПЛА с имеющимися на борту оптическими средствами разведки и воздушного лазерного сканирования (ВЛС).

С целью сокращения средней продолжительности технической разведки поврежденной ВВТ, а именно средней продолжительности обнаружения, опознавания и определения технического состояния пораженного образца, предложен алгоритм автоматизированной обработки данных беспилотной воздушной съемки, реализуемый с помощью специального программного обеспечения (СПО) в составе программно-аппаратного комплекса, разработанного с применением нейросетевой технологии [3], и позволяющего определять состояние эвакупригодности образца [4, 5], координаты объекта эвакуации с применением геоинформационной платформы и акцентно визуализировать отклонения в его техническом состоянии.

Полученная геоинформация об объекте эвакуации передается и обрабатывается на втором уровне системы.

Второй уровень. Центр управления восстановлением бригады, оснащенный ПСПР, принимает информацию от групп технической разведки об объектах эвакуации, техническом состоянии объектов и их доступности (формируется эвакуационная обстановка). Основываясь на актуальной базе данных наличия, технического состояния объектов, маршрутов эвакуации и возможностях ПСЭ подразделений технического обеспечения бригады, система подготавливает для лица, принимающего решения варианты решений на организацию эвакуации обнаруженных образцов ВВТ [6].

После принятия решения на эвакуацию сформированная КЭГ (ЭГ, РЭГ) перемещается по выбранному маршруту в район первичной дефектации (РПД), находящийся вблизи объекта эвакуации и вне зоны действия основных средств поражения противника.

Третий уровень. Эвакуация ВВТ с места ее выхода из строя происходит, как правило, в ночное время силами ПСЭ (БРЭМ-Л и т.д.) в зависимости от складывающейся боевой обстановки. Перемещение эвакуационного фонда осуществляется до РПД, где с использованием элементов ПСПР (в диалоговом режиме) осуществляется первичная диагностика с определением объема и трудоемкости ремонтных операций. Работа на третьем уровне основана на созданной базе данных неисправностей и отказов по прецедентам, анализа причин их возникновения и спосо-

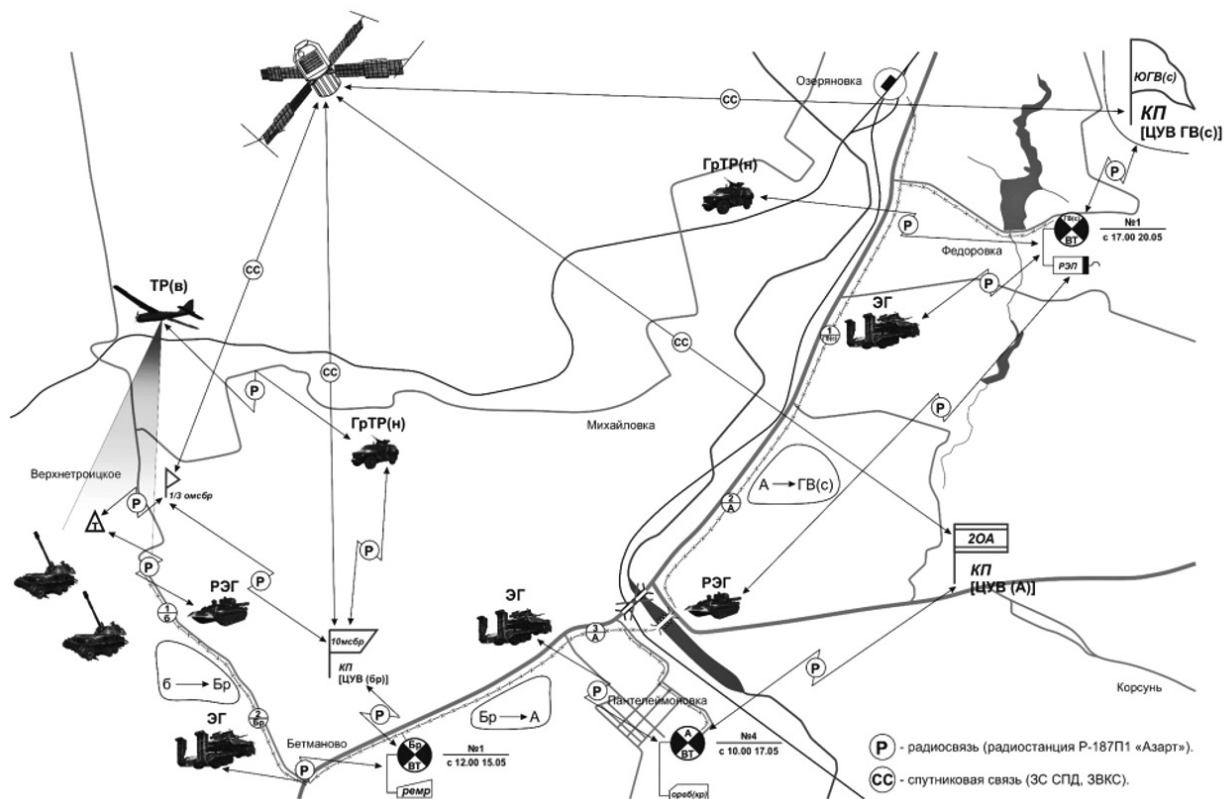


Рис. 4. Организация обмена информацией между элементами существующей СУВ

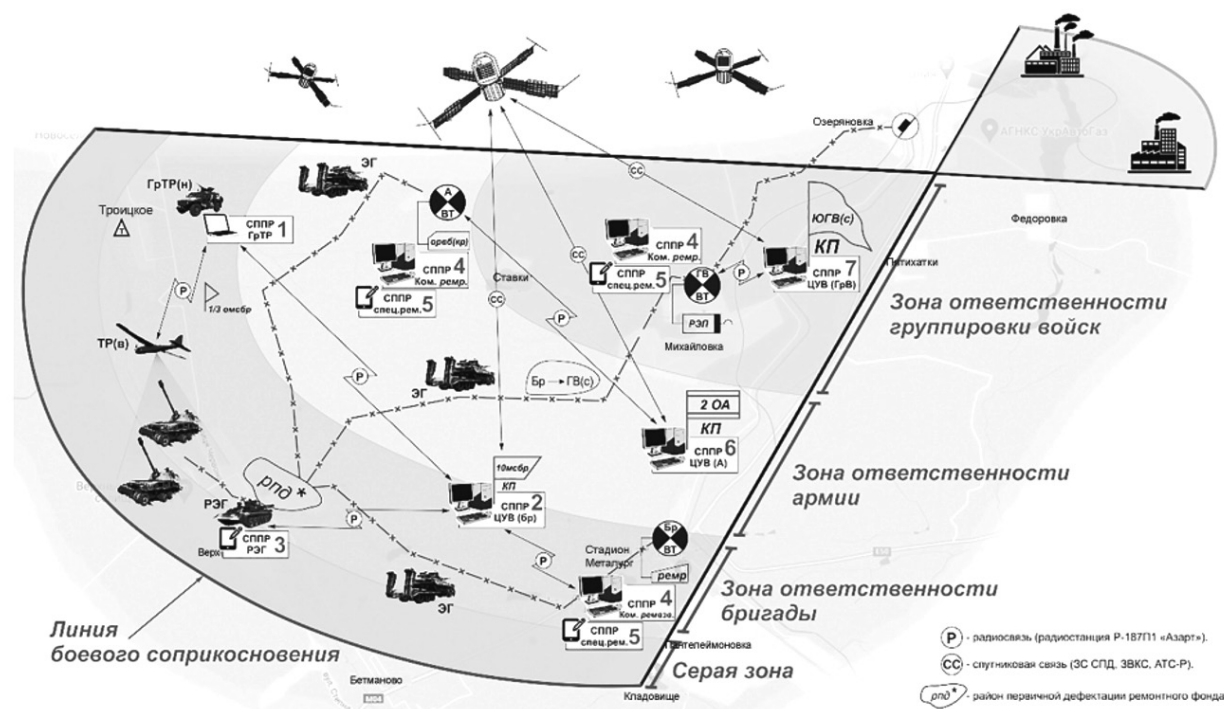


Рис. 5. Организация обмена информацией между структурными элементами информационно-управляющей системы восстановления ВВТ на первом этапе развития

бов устранения с использованием накопленного опыта и статистических данных.

Полученные данные об объеме и трудоемкости предстоящих ремонтных работ передаются на второй уровень системы, где, основываясь на анализе данных о техническом состоянии и производственных возможностях ремонтных подразделений и частей, для лица, принимающего решение вырабатываются альтернативные варианты мест и способов восстановления образца ВВТ.

В случае если ремонт ВВТ невозможен в ремонтных подразделениях и воинских частях бригадного уровня, ЦУВ бригады передает данные о техническом состоянии объекта ремонта и запрашивает привлечение сил и средств армейского (шестого) уровня [7]. Обмен информацией осуществляется по спутниковым каналам связи. Если требуется вмешательство сил и средств ремонтно-восстановительных органов ГрВ(с) или представителей ВРБ промышленности, то информация о техническом состоянии образца ВВТ передается на седьмой уровень, где по исходным данным, а также по имеющимся базам данных о производственных возможностях ремонтно-восстановительных органов ГрВ(с) и ВРБ предприятий промышленности подготавливаются решения о привлечении вышеупомянутых сил и средств, либо об отправке ремонтного фонда в глубокий тыл на предприятия промышленности.

Четвертый уровень. ПСПР этого уровня предлагается внедрить в ремонтно-восстановительных частях всех уровней ответственности. ПСПР данного уровня, основываясь на получении диагностической информации [8] и базе данных о возможностях сил и средств ремонтных подразделений части, трудоемкости ремонта поступившего ремонтного фонда, обеспечивают подготовку предложений о назначении специалистов-ремонтников на выполнение технологических операций с учетом их квалификации и достижения минимальной продолжительности ремонта образцов, находящихся в ремонтном подразделении. Одной из возможностей ПСПР является формирование и выдача суточного производственного задания каждому специалисту и контроль его выполнения в автоматизированном режиме. В основу решения этой задачи положен разработанный метод информационно-аналитической поддержки управления восстановлением ВВТ, обеспечивающий повышение коэффициента технической готовно-

сти образцов за счет сокращения времени восстановления путем рационального распределения специалистов-ремонтников ремонтных органов по выполняемым технологическим операциям на участках ремонта с учетом стохастичности процесса восстановления.

Пятый уровень. Уровень информационного сопровождения технологических операций ремонта ВВТ является самым низшим — начальным уровнем ПСПР. Поддержка выполнения ремонтных операций на объекте ремонтного фонда осуществляется за счет разработки так называемых «визуализированных операционных карт» (ВОК) технического обслуживания и ремонта ВВТ. ВОК представляют собой пошаговую инструкцию выполнения заданной технологической операции, представленную в виде трехмерной модели, реализованной как на бумажном носителе, так и в качестве интерактивного электронного технического руководства (ИЭТР). Алгоритм автоматизации формирования ВОК позволяет производить ее формирование по результатам технического диагностирования объекта ремонта.

Шестой уровень. Центр управления восстановлением армии, оснащенный ПСПР, по структуре и функциям аналогичен ЦУВ бригады, однако имеет более обширную базу данных за подчиненные ремонтно-восстановительные органы, а так же данные о наличии ЗИП во всех нижестоящих уровнях восстановления. Осуществляет сбор, анализ и управление подчиненным *орвб(кр)* в части обеспечения технической разведки, эвакуации и ремонта ВВТ.

Седьмой уровень. Центр управления восстановлением ГрВ(с), оснащенный ПСПР, по структуре и функциям аналогичен ЦУВ бригады и армии, однако имеет более обширную базу данных за подчиненные ремонтно-восстановительные органы, а также данные о наличии ЗИП во всех нижестоящих уровнях восстановления. Осуществляет сбор, анализ и управление подчиненными *орвб(в)* и ПСЭ бригады МТО в части обеспечения технической разведки, эвакуации и ремонта ВВТ.

Дополнительно по согласованию с Главным автобронетанковым управлением (ГАБТУ) Министерства обороны Российской Федерации ЦУВ ГрВ(с) организует отправку ремонтного фонда на предприятия промышленности.

В настоящее время основной проблемой реализации рассмотренного варианта модели

функционирования СУВ путем совершенствования информационно-управляющей ПСПР восстановления ВВТ является отсутствие защищенных устойчивых каналов связи, позволяющих осуществлять информационный обмен (фото-, видео-, геоинформации) в режиме реального времени.

Решение проблемы маскированной передачи визуальной информации в виде снимков элементов ВВТ по открытым каналам связи [9], обеспечивающей конфиденциальность информационного обмена на основе псевдослучайных последовательностей и бинарных ортогональных преобразований без сложных криптографических алгоритмов, позволяет реализовать второй этап совершенствования информационно-управляющей ПСПР СУВ образцов ВВТ, сущность которого представлена ниже.

Схема организации функционирования и информационного обмена между структурными элементами СУВ ВВТ с учетом перспективных средств связи и обмена информацией представлена на рис. 6.

Основной функционал элементов модели функционирования СУВ остается прежним. Отличительной особенностью, представленной ПСПР, от предыдущей (рис. 5) является сокра-

щение ЦУВ с трех до одного, разворачиваемого на пункте боевого управления ГрВ(с). Пункты управления уровней армия — бригада перекалифицируются в исполнительные элементы СУВ.

Благодаря использованию защищенных каналов связи появляется возможность обмена информацией внутри СУВ, проведения ее сбора, обработки и поддержки принятия оперативных решений.

Таким образом, внедрение предлагаемой информационно-управляющей ПСПР в СУВ образцов ВВТ позволит добиться повышения оперативности восстановления техники и возвращения ее в строй.

Список источников

1. Волков В.В., Занчуковский А.В., Шаяхметов И.М. Анализ структуры системы восстановления вооружения, военной и специальной техники и процессов ее функционирования // Актуальные исследования. 2024. № 7 (189). С. 41–44.
2. Об утверждении Руководства по материальной части и организации производственного процесса отдельного ремонтно-восстановительного батальона (комплексного ремонта): приказ

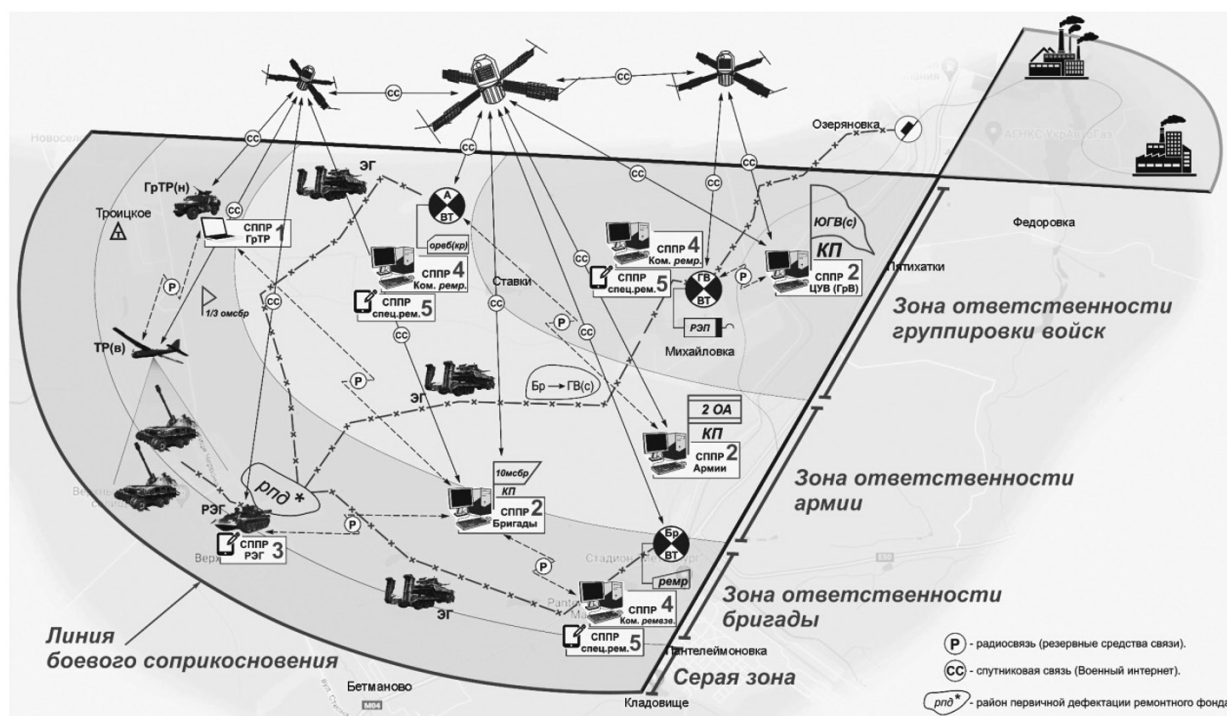


Рис. 6. Организация обмена информацией между элементами информационно-управляющей системы восстановления ВВТ на втором этапе развития

заместителя Министра обороны Российской Федерации от 07.08.2018 № 555.

3. Тарасенко П.Н., Цыганков В.Н. Перспективные подвижные средства восстановления вооружения и военной техники // *Новости науки и технологий*. 2009. № 2 (11). С. 26–32.

4. Абросимов В.К., Горский А.С. Методический подход к решению задач классификации систем (технологий) искусственного интеллекта в интересах Вооруженных Сил Российской Федерации // *Вооружение и экономика*. 2021. № 4 (58). С. 41–48.

5. Соболев Е.Г., Ильин А.В., Шуляева И.И. Эвакупригодность бронетанкового вооружения и техники // *Наука и военная безопасность*. 2024. № 2 (37). С. 26–31.

6. Соболев Е.Г. Методические аспекты комплексной оценки эксплуатационно-технических свойств объектов ВВТ // *Стратегическая стабильность*. 2012. № 4 (61). С. 59–66.

7. Алчинов В.И. Информационное обеспечение управления эксплуатацией восстанавливаемых систем. Пенза: Изд-во Пенз. гос университета, 2015. 272 с.

8. Филатов П.В., Полянсков А.В., Ошкин А.А. Особенности диагностирования буксируемых артиллерийских орудий в полевых условиях. Часть II // *Материально-техническое обеспечение Вооруженных Сил Российской Федерации*. 2023. № 11. С. 69–76.

9. Гринченко Н.Н. Методы и алгоритмы обработки маскированных изображений при передаче информации по каналам в специальных системах управления: дисс. ... канд. техн. наук. Пенза: Пензенский государственный университет, 2025. 278 с.

References

1. Volkov V.V., Zanchukovsky A.V., Shayakhmetov I.M. Analysis of the structure of the system

for restoring weapons, military and special equipment, and the processes of its functioning // *Actual Research*. 2024. No 7 (189). Pp. 41–44.

2. On Approval of the Manual on the Material Part and the Organization of the Production Process of a Separate Repair and Restoration Battalion (Complex Repair): Order of the Deputy Minister of Defense of the Russian Federation dated 07.08.2018 No 555.

3. Tarasenko P.N., Tsygankov V.N. Promising Mobile Means of Repairing Weapons and Military Equipment // *News of Science and Technology*. 2009. No 2 (11). Pp. 26–32.

4. Abrosimov V.K., Gorsky A.S. Methodological Approach to Solving the Problems of Classification of Artificial Intelligence Systems (Technologies) in the Interests of the Armed Forces of the Russian Federation // *Armament and Economics*. 2021. No 4 (58). Pp. 41–48.

5. Sobolev E.G., Ilyin A.V., Shulyayeva I.I. Evacuation Suitability of Armored Weapons and Equipment // *Science and Military Security*. 2024. No 2 (37). Pp. 26–31.

6. Sobolev E.G. Methodological Aspects of Comprehensive Assessment of Operational and Technical Properties of Military-Technical Equipment // *Strategic Stability*. 2012. No 4 (61). Pp. 59–66.

7. Alchinov V.I. Information Support for Managing the Operation of Restorable Systems. Penza: Penza State University, 2015. 272 p.

8. Filatov P.V., Polyanskov A.V., Oshkin A.A. Features of Diagnosing Towed Artillery Guns in Field Conditions. Part II // *Material and Technical Support of the Armed Forces of the Russian Federation*. 2023. No 11. Pp. 69–76.

9. Grinchenko N.N. Methods and algorithms for processing masked images during information transmission over channels in special control systems: Diss. ... Cand. Tech. Sci. Penza: Penza State University, 2025. 278 p.

УДК 621.391

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_139

МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВЕТОВЫХ ПУТЕЙ В ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЯХ

MODEL OF OPTIMAL DISTRIBUTION OF LIGHT PATHS IN OPTICAL TRANSPORT NETWORKS

Канд. техн. наук А.П. Бойко

Ph.D. A.P. Boiko

Военная академия связи им. С.М. Буденного

Современные оптические транспортные сети строятся на основе технологий спектрального уплотнения с гибкой сеткой частот и программным распределением спектрального ресурса. Задачей при проектировании таких сетей является маршрутизация и назначение спектра для составных оптических каналов, называемых световыми путями. Предлагается расширенная модель светового пути, в которой он рассматривается не только как маршрут прохождения по волоконно-оптической сети от источника к получателю, но и как связанный с ним непрерывный спектральный диапазон, выделяемый вдоль всего маршрута. Новизной является постановка и решение оптимизационной задачи распределения множества световых путей в сети с учетом требований к спектральной непрерывности, смежности частотных интервалов, и непересекаемости спектров.

Ключевые слова: оптическая транспортная сеть, световые пути, качество передачи, распределение световых путей.

Modern optical transport networks are built using wavelength-division multiplexing technology with a flexible frequency grid and software-controlled spectral resource allocation. The challenge in designing such networks is routing and interference assignment for composite optical channels called lightpaths. An extended lightpath model is proposed, in which the lightpath operates not only as a route through a fiber-optic line from the network source to the receiver, but also as an associated continuous spectral range distributed along the entire route. The novelty lies in the formulation and solution of an optimization problem for lightpath distribution in the network, taking into account requirements for spectral continuity, frequency interval connectivity, and spectral non-overlap.

Keywords: optical transport network, lightpaths, transmission quality, lightpath allocation.

Введение

Современные оптические транспортные сети (ОТС) строятся на базе волоконно-оптических систем передачи со спектральным разделением каналов (ВОСП СР). Технологии спектрального уплотнения каналов, лежащие

в основе ВОСП СР, позволяют использовать спектральный ресурс оптического волокна для формирования множества каналов, и тем самым условно разделить его на несколько виртуальных оптических волокон, в каждом из которых можно передавать оптический сигнал. До недавнего времени оптические сети связи формировались

по принципу «точка – точка», представляя собой объединение простейших топологий. Это было обусловлено ограничениями в технологиях оптической коммутации, отсутствием эффективных средств маршрутизации света и высокой стоимостью компонентов. Такие сети фактически были набором несвязанных или слабо связанных фрагментов, иногда объединенных на электронном уровне через опто-электронно-оптические (ОЭО)-преобразования, но не на оптическом. Появление таких устройств, как оптические кросс-коннекторы (optical cross-connect — ОХС), реконфигурируемые оптические мультиплексоры ввода/вывода (reconfigurable optical add/drop multiplexer — ROADM) и селективные переключатели длин волн (wavelength selective switch — WSS), позволило не только изменять маршруты оптических сигналов без их преобразования в электрическую форму, но и строить полноценные сетевые структуры — ячеистые, кольцевые, произвольные графы.

В оптической связи особый интерес представляют полностью оптические соединения между двумя корреспондирующими узлами, позволяющие передавать оптические сигналы без ОЭО-преобразования в транзитных узлах. Образованные отдельными спектральными каналами между двумя соседними узлами, данные оптические соединения являют собой составные оптические каналы с некоторыми дополнительными ограничениями, и носят название световых путей (lightpath) [1–3]. Отсутствие ОЭО-преобразования в процессе коммутации, маршрутизации и ретрансляции оптических сигналов способствует тому, что оптические сети на основе концепции световых путей имеют следующие особенности [4–6]:

- световые пути имеют низкую сквозную задержку передачи данных, что является одним из важнейших показателей при передаче мультимедийного трафика;

- оптические сигналы в волокнах обычно менее подвержены электромагнитным помехам, что повышает надежность передачи данных по световым путям;

- информацию, передаваемую по оптическим волокнам, сложнее перехватить в оптическом виде без специализированного оборудования, что обеспечивает дополнительный уровень безопасности;

- возможность программного управления и настройки световых путей позволяет оптимизировать сеть под конкретные требования пользователей и изменения в трафике;

- уменьшение количества ОЭО-преобразований способствует сохранению стабильности оптического и цифрового синхронизма;

- оптические сети требуют меньше энергии для передачи сигналов на дальние расстояния по сравнению с традиционными электрическими сетями, что способствует снижению энергопотребления;

- не смотря на тенденцию снижения, стоимость ОЭО-трансиверов по прежнему остается высокой и экспоненциально растет с увеличением скорости обрабатываемых в них сигналов;

- некачественные или несовместимые ОЭО-трансиверы могут вызывать искажение сигнала и привести к ошибкам в передаче данных и потере синхронизации между узлами сети, уменьшить дальность передачи или ухудшить производительность сети.

Создание световых путей в оптической транспортной сети возможно при выполнении определенных архитектурных требований к ее узлам и соединениям в них. Ключевым из таких требований является прозрачность оптической сети, которая означает способность передавать оптические сигналы от источника к получателю сквозь промежуточные узлы и сегменты сети без необходимости их преобразования в электрическую форму или в другие оптические форматы. Достижение прозрачности обеспечивается использованием безцветных, ненаправленных и безконфликтных (colorless, directionless, contentionless — CDC) ROADM, которые позволяют динамически маршрутизировать оптические каналы произвольного спектра без ОЭО-преобразований. Такая архитектура делает возможным реализацию гибких и масштабируемых схем распределения световых путей, полностью сохраняя спектральную непрерывность и согласованность сигнала вдоль всего маршрута [1, 2].

В ОТС с фиксированной сеткой частот, световой путь представляет собой последовательность узлов связи и соединяющих их волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), определяющих его маршрут. Каждому световому пути назначается полоса пропускания и центральная

частота в соответствии с применяемой на сети стандартной сеткой частот, например, с шагом 50 ГГц или 100 ГГц. Задача поиска маршрутов для световых путей и выбора центральных частот, называется задачей маршрутизации и назначения длин волн (routing and wavelength assignment — RWA) [7]. В сетях на основе CDC-ROADM и гибкой сеткой частот у световых путей есть дополнительная «степень свободы», заключающаяся в возможности изменения полосы пропускания. Задача поиска маршрутов для световых путей, выбора полос пропускания и центральных частот в таких сетях называется задачей маршрутизации и назначения спектра (routing and spectrum assignment — RSA) и также, как и RWA относится к классу NP — трудных [8]. Задача RSA может решаться при проектировании ОТС и в процессе ее эксплуатации.

Существует несколько подходов к решению RSA [1, 2, 8–10]. Среди них последовательные методы, когда задачи маршрутизации и назначения спектра выполняются поочередно, являются одними из самых простых и широко используемых. Сначала выбирается один из найденных (например, с помощью алгоритма Дейкстры) маршрутов, затем на нем подбирается подходящий свободный непрерывный диапазон частот достаточной ширины с использованием одной из стратегий:

- первый подходящий по ширине диапазон частот;
- диапазон частот, который уже используется чаще других в сети;
- диапазон частот, который используется реже всего в сети;
- среди всех допустимых диапазонов частот выбирается случайный.

Очевидный и ключевой недостаток последовательного решения задачи RSA — это локальность принятия решений, которая приводит к неоптимальности в глобальном смысле.

На сегодняшний день важным направлением в развитии научно-методического аппарата для современных ОТС на основе CDC-ROADM является формализация и решение задачи выбора подмножества световых путей между заданными корреспондирующими узлами, удовлетворяющего системе ограничений и обеспечивающего оптимальное значение заданного функционала [11]. Для корректной постановки и решения

такой оптимизационной задачи требуется разработка математической модели светового пути с учетом следующих требований: смежность элементарных частотных интервалов в пределах каждого светового пути, непрерывность спектра вдоль всего маршрута, размещение в рамках ограниченного спектрального ресурса сети. Кроме того, необходимо также формализовать ограничения на одновременную реализацию подмножества световых путей в ОТС при условии непересекаемости их спектров, а также задать целевую функцию и свести задачу к одной из известных форм математического программирования. Данная задача называется задачей распределения световых путей, а ее решение, доставляющее оптимальное значение заданному функционалу, будет называться оптимальным распределением световых путей.

Модель оптической транспортной сети с гибкой сеткой частот

С появлением перестраиваемых транспондеров с переменной полосой пропускания (bandwidth-variable transponder — BVT), оптические сети с фиксированной сеткой частот стали неэффективны [1, 2]. Им на смену пришли сети с гибкой сеткой частот, в которых дискретное множество частот, доступных для назначения в качестве центральных частот оптических каналов f^n , определяется выражением [12]:

$$f^n = 193,1 + n \cdot 0,00625 \text{ ТГц}, n \in \mathbb{Z}.$$

Таким образом, возможные центральные частоты: 193,1 ТГц ($n = 0$), 193,10625 ТГц ($n = 1$), 193,1125 ТГц ($n = 2$) и т.д.

Так как гибкая сетка частот представляет собой возможные значения центральных частот оптических каналов через каждые 6,25 ГГц, минимальная возможная ширина оптического канала (не считая равную нулю), может составлять 12,5 ГГц, то есть базовый шаг 6,25 ГГц влево и базовый шаг 6,25 ГГц вправо от центральной частоты [12]. Вообще, в ОТС с гибкой сеткой частот ширина спектральных каналов выбирается кратной четному количеству базовых шагов по 6,25 ГГц. Для этого вводится понятие элементарного частотного интервала (ЭЧИ) $\Delta f^{\text{эчи}}$, равного:

$$\Delta f^{\text{эчи}} = 2 \cdot 6,25 \text{ ГГц} = 12,5 \text{ ГГц}.$$

Таким образом ширина оптического канала всегда охватывает целое количество ЭЧИ, а значит, четное количество базовых шагов по 6,25 ГГц:

$$\Delta f^k = m \cdot \Delta f^{\text{эчи}} \text{ ГГц}, m \in \mathbb{Z}^+.$$

При этом нельзя сформировать оптический канал шириной равной нечетному количеству 6,25 ГГц, так как это неполный ЭЧИ. Типичные значения ширины оптического канала составляют: 12,5 ГГц, 25 ГГц, 50 ГГц, 75 ГГц, 100 ГГц, до ~400 ГГц, в зависимости от: модуляции, линейного кодирования, требуемой скорости передачи в оптическом канале, уровня гибкости сети. С более подробным объяснением почему именно 6,25 ГГц и 12,5 ГГц были выбраны как стандартизированные значения, и как это соотносится с модуляциями и скоростями передачи, можно ознакомиться в [12].

Используя вышеуказанные выражения, можно представить всю гибкую сетку частот в виде объединения полузамкнутых интервалов, образуемых базовыми шагами по 6,25 ГГц:

$$[193,1 + n \cdot 0,00625, 193,1 + (n+1) \cdot 0,00625), \\ n \in \mathbb{Z}.$$

Будем обозначать номер полузамкнутого интервала индексом, на основе которого вычисляется его нижняя граница. Так, если полузамкнутый интервал образован индексом $n = 4$:

$$[193,1 + 4 \cdot 0,00625, 193,1 + (4+1) \cdot 0,00625) = \\ = [193,125, 193,1315),$$

то ему соответствует номер 4. На рис. 1 представлено пояснение к вводимым понятиям, а также к принципу целочисленной нумерации полузамкнутых интервалов, на которые разделена сетка частот в оптическом волокне.

Представление базовых шагов гибкой сетки частот в виде полузамкнутых интервалов, пронумерованных целыми числами, позволяет удобно представить диапазоны доступных частот в волоконно-оптических линиях связи в виде подмножества целых чисел $\{c_n, c_{n+1}, \dots, c_{N_1}\} \subset \mathbb{Z}$, $N_1 < \infty$. Действительно, если для передачи оптических сигналов в конкретной ВОЛС ОТС доступен диапазон частот $f^n \dots f^b$, где $f^n = 193,1 + 0 \cdot 0,00625 = 193,1$ ТГц и $f^b = 193,1 + 21 \cdot 0,00625 = 193,23125$ ТГц — нижняя и верхняя частоты соответственно, то используя введенные обозначения, можно записать данный диапазон в виде подмножества целых чисел: $\{0, 1, \dots, 20\}$. Кроме того, полосу пропускания оптических каналов также можно представить в виде подмножества целых чисел. Действительно, если ширина оптического канала составляет $\Delta f^k = m \cdot \Delta f^{\text{эчи}}$ ГГц, а его центральная частота равна f^n , то нижние и верхние границы его полосы пропускания соответственно определяются с помощью выражений [13]:

$$f^n = f^n - \frac{\Delta f^k}{2}; f^b = f^n + \frac{\Delta f^k}{2}.$$

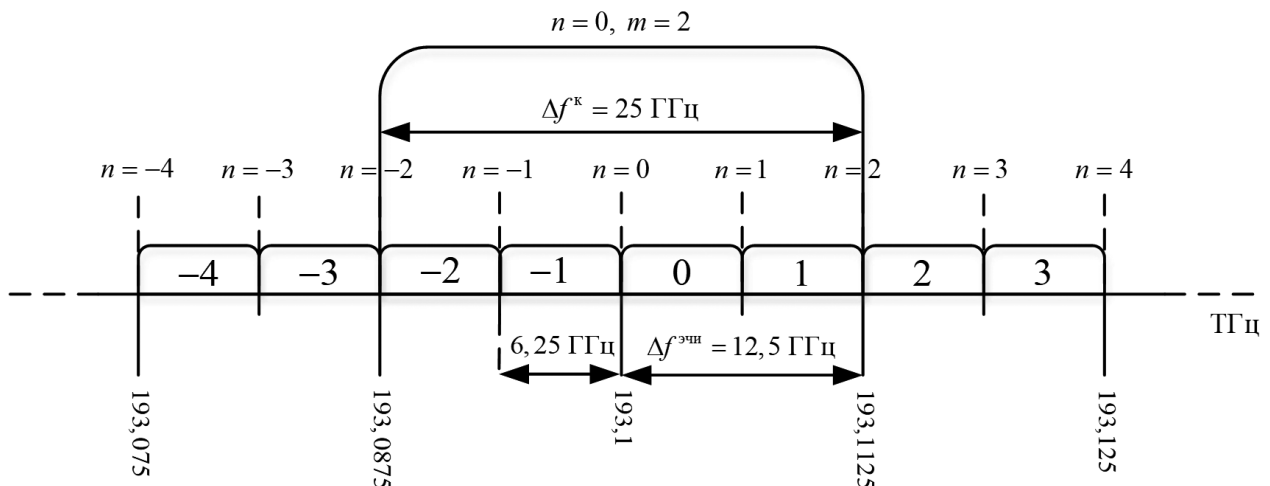


Рис. 1. Пояснение к понятиям, используемым при описании ОТС с гибкой сеткой частот

После несложных преобразований получаем:

$$\begin{aligned} f^n &= 193,1 + n \cdot 0,00625 - \frac{m \cdot 0,0125}{2} = \\ &= 193,1 + (n - m) \cdot 0,00625; \\ f^b &= 193,1 + n \cdot 0,00625 + \frac{m \cdot 0,0125}{2} = \\ &= 193,1 + (n + m) \cdot 0,00625. \end{aligned}$$

Используя переменные $(n - m)$ и $(n + m)$ можно определить полосу пропускания оптического канала в виде полузамкнутого целочисленного интервала: $[n - m, n - m + 1, \dots, n + m)$ или подмножества целых чисел: $\{n - m, n - m + 1, \dots, n + m - 1\}$. Так, например, если центральная частота оптического канала определяется переменной $n = 10$ и имеет ширину $m = 4$, то его полосу пропускания можно описать в виде следующего подмножества целых чисел: $\{6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13\}$. На рис. 2 изображены пояснения к целочисленному представлению диапазона частот, доступного для передачи оптических сигналов в ВОЛС, и полосы пропускания оптического канала.

Диапазоны частот, доступные для формирования оптических каналов в каждой ВОЛС, в совокупности представляют собой спектральный ресурс ОТС, являющийся ее ключевой характеристикой. Именно спектральный ресурс ОТС порождает основные ограничения при решении задачи распределения оптических каналов и световых путей.

Представим ОТС в виде неориентированного графа $G(V, E)$, где: $V = \{v_i\}$, $i \in 1, N_2$ — мно-

жество вершин, каждая из которых представляет собой узел ОТС; $E = \{e_{ij}\} \subset V \times V$ — множество ребер, каждое из которых представляет собой ВОЛС между узлами ОТС. Пусть в каждой ВОЛС ОТС для передачи оптических сигналов доступен некоторый диапазон частот. Тогда, используя введенные ранее понятия и обозначения, поставим в соответствие каждому ребру $e_{ij} \in E$ некоторое множество $C_{ij} = \{c_n, c_{n+1}, \dots, c_{N_1}\} \subset Z$, описывающее в виде подмножества из целых чисел пропускную способность ВОЛС между узлами i и j . Тогда множество $C = \bigcup C_{ij} | e_{ij} \in E$ — представляет собой спектральный ресурс ОТС в виде совокупности доступных во всех ВОЛС диапазонов частот, представленных целыми числами.

Зафиксируем две вершины графа s и t , образующие соответственно исток и сток. Тогда граф $G = (V, E)$ представляет собой двухполюсную сеть с полюсами s и t . Обозначим через $\mu_{s,t}$ маршрут из s в t , представляющий собой упорядоченную последовательность ребер $(e_{sv_1}, e_{v_1v_2}, \dots, e_{v_{k-1}t})$, начинающуюся в вершине s , заканчивающуюся в вершине t и не проходящую через одну и ту же вершину дважды, причем каждые два соседних ребра имеют общую вершину. Для того, чтобы различать маршруты из s в t введем дополнительный индекс k , обозначающий порядковый номер. Будем описывать маршрут перечнем ребер его образующих, то есть $\mu_{s,t}^k = (e_{sv_1}, e_{v_1v_2}, \dots, e_{v_{k-1}t})$. Множество всех маршрутов из s в t будем обозначать как $M_{s,t} = \{\mu_{s,t}^k\}$, $k \in 1, N_3$.

Для эффективного решения задачи оптимального распределения световых путей в ОТС требуется разработка строгой математической



Рис. 2. Доступный диапазон частот и полоса пропускания оптического канала

модели, адекватно описывающей структурные и спектральные свойства световых путей, а также учитывающей физические ограничения среды передачи. Такая модель должна позволять формализовать ключевые требования к световому пути [14]: непрерывность спектра на всем маршруте, смежность ЭЧИ, характеризующих полосу пропускания светового пути, непересекаемость с другими световыми путями (в одной ВОЛС нельзя использовать одинаковые ЭЧИ двумя световыми путями). Кроме того, модель должна быть пригодной для использования в задачах маршрутизации, спектрального назначения, анализа фрагментации спектра и планирования сетевой архитектуры.

В данной работе под световым путем понимается не только маршрут между парой узлов ОТС, но и выделенный для передачи сигнала непрерывный спектральный ресурс (группа смежных ЭЧИ), занимаемый на всем протяжении маршрута. Такая трактовка позволяет рассматривать световой путь как единый ресурс, аналогичный выделенной полосе движения на всем маршруте, проходящем по множеству участков дорожной сети. Исходя из этого, выдвигается гипотеза о том, что комплексное моделирование светового пути — с одновременным учетом маршрута и спектрального ресурса — позволяет формулировать и решать задачу их оптимального распределения как единую, что повышает вероятность получения глобально оптимального решения, в отличие от традиционного поэтапного подхода (сначала выбор маршрута, затем назначение спектра). Вместе с тем, не трудно спрогнозировать, что такой подход сопровождается рядом трудностей. Он существенно увеличивает вычислительную сложность задачи и требует разработки эффективных алгоритмов оптимизации. Для сравнения существующих и предлагаемого подхода, разработаем математическую модель светового пути и решим оптимизационную задачу по их распределению.

Модель светового пути

Расширим понятие светового пути и будем под ним понимать совокупность смежных полужамкнутых частотных интервалов в последовательности ВОЛС, обеспечивающих распространение оптического сигнала в заданной полосе

частот между двумя узлами без ОЭО-преобразования.

Обозначим через $p_{s,t}^{k,q}$ световой путь из s в t на основе k -го маршрута $\mu_{s,t}^k$ (q — порядковый номер светового пути), представляющий собой одинаковое упорядоченное множество элементов $\{c_g, c_{g+1}, \dots, c_l\}$ в каждом из ребер маршрута $\mu_{s,t}^k = (e_{sv_i}, e_{v_i v_j}, \dots, e_{v_l t})$, такое, что $c_{g+1} = c_g + 1$. Будем описывать q -й путь из s в t на основе k -го маршрута подмножеством образующих его элементов, то есть $p_{s,t}^{k,q} = \{c_g, c_{g+1}, \dots, c_l\}$. Множество всех световых путей из s в t на основе маршрута $\mu_{s,t}^k$ будем обозначать как $P_{s,t}^k = \{p_{s,t}^{k,q}\}$, $n \in \overline{1, N_4}$, а множество всех световых путей из s в t во всей ОТС будем обозначать как $P_{s,t} = \{P_{s,t}^k\}$, $k \in \overline{1, N_5}$.

Целочисленную функцию d_p , определенную на множестве $P_{s,t}$ так, что $d_p : P_{s,t} \rightarrow \mathbb{Z}^+$, будем называть шириной светового пути, если:

$$d_p(p_{s,t}^{k,q}) = |p_{s,t}^{k,q}|,$$

где $|p_{s,t}^{k,q}|$ — мощность множества $p_{s,t}^{k,q} = \{c_g, c_{g+1}, \dots, c_l\}$. По сути, при таком описании ширина светового пути представляет собой количество полужамкнутых частотных интервалов, характеризующих его полосу пропускания.

Зададим функцию $f_\mu : M_{s,t} \rightarrow C$, определенную на множестве $M_{s,t}$ так, что:

$$f_\mu(\mu_{s,t}^k) = \bigcap C_{ij} \mid e_{ij} \in \mu_{s,t}^k,$$

где $\bigcap C_{ij} \mid e_{ij} \in \mu_{s,t}^k$ — пересечение подмножеств весов всех ребер e_{ij} принадлежащих маршруту $\mu_{s,t}^k$. Функцию f_μ будем называть пропускной способностью маршрута.

Целочисленную функцию d_μ , определенную на множестве $M_{s,t}$ так, что $d_\mu : M_{s,t} \rightarrow \mathbb{Z}$, будем называть шириной маршрута, если:

$$d_\mu(\mu_{s,t}^k) = |f_\mu(\mu_{s,t}^k)|.$$

Примем без доказательства ряд утверждений.

Утверждение 1. На основе маршрута $\mu_{s,t}^k$ с шириной $d_\mu(\mu_{s,t}^k)$ можно сформировать множество световых путей $P_{s,t}^k = \{p_{s,t}^{k,q}\}$, $q \in \overline{1, N_6}$ с шириной $1 \leq d_p(p_{s,t}^{k,q}) \leq d_\mu(\mu_{s,t}^k)$, где:

$$N_6 = \frac{d_\mu(\mu_{s,t}^k) \cdot (d_\mu(\mu_{s,t}^k) + 1)}{2}.$$

Рассмотрим конкретные примеры, поясняющие суть введенных понятий и обозначений. На рис. 3 изображен граф с множеством вершин $V = \{v_i\}, i \in \overline{1,6}$ и множеством ребер $E = \{e_{12}, e_{23}, e_{14}, e_{25}, e_{36}, e_{45}, e_{56}\}$. Вершины $v_1 = s$ и $v_6 = t$ представляют собой исток и сток соответственно, и образуют двухполюсную сеть. Множество маршрутов из s в t состоит из четырех элементов: $M_{1,6} = \{\mu_{1,6}^k, k \in \overline{1,4}\}$, где $\mu_{1,6}^1 = (e_{12}, e_{23}, e_{36})$, $\mu_{1,6}^2 = (e_{12}, e_{25}, e_{56})$, $\mu_{1,6}^3 = (e_{14}, e_{45}, e_{52}, e_{23}, e_{36})$ и $\mu_{1,6}^4 = (e_{14}, e_{45}, e_{56})$.

Весы ребер маршрута $\mu_{1,6}^1$ представляют собой подмножества $C_{12} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$, $C_{23} = \{3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ и $C_{36} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$. Маршрут $\mu_{1,6}^1$ имеет пропускную способность $f_\mu(\mu_{1,6}^1) = \{3, 4, 5, 6\}$ и ширину $d_\mu(\mu_{1,6}^1) = 4$. Всего, на основе маршрута $\mu_{1,6}^1$ можно сформировать множество $P_{1,6}^1 = \{p_{1,6}^{1,q}, q \in \overline{1, N_6}\}$ из $N_6 = 10$ световых путей с шириной $1 \leq d_p \leq 4$.

Утверждение 2. На основе маршрута $\mu_{s,t}^k$ с шириной $d_\mu(\mu_{s,t}^k)$ можно сформировать множество путей $\{p_{s,t}^{k,q} | d_p(p_{s,t}^{k,q}) = \text{const}, q \in \overline{1, N_7}\}$ с одинаковой шириной $d_p(p_{s,t}^{k,q}) = \text{const} \leq d_\mu(\mu_{s,t}^k)$, такое, что $N_7 = d_\mu(\mu_{s,t}^k) - d_p(p_{s,t}^{k,q}) + 1$.

На рис. 4 приведен пример формирования множества путей $\{p_{s,t}^{k,q} | d_p(p_{s,t}^{k,q}) = 3, q \in \overline{1, N_7}\}$ ши-

риной $d_p(p_{s,t}^{k,q}) = 3$ на основе маршрута с шириной $d_\mu(\mu_{s,t}^k) = 8$.

Формализовав понятие обобщенного светового пути, оговорив импользуемые термины и понятия, а также введя ряд утверждений — решим задачу оптимального распределения световых путей в ОТС.

Модель оптимального распределения световых путей в ОТС

Пусть $P_{s,t}$ — множество всех световых путей из s в t в ОТС, описываемой графом $G(V, E)$.

Для каждого светового пути $p_{s,t}^{k,q} \in P_{s,t}$, $q \in \overline{1, N_8}$ (N_8 — общее количество световых путей из s в t) введем переменную $x_q \in \{0, 1\}$, такую, что $x_q = 1$ если световой путь реализуется в ОТС для передачи оптического сигнала и $x_q = 0$ в противном случае.

Очевидно, что реализовать в ОТС все найденные световые пути невозможно. Два световых пути ОТС считаются одновременно реализуемыми, если:

– маршруты, на основе которых они формируются не имеют общих ребер;

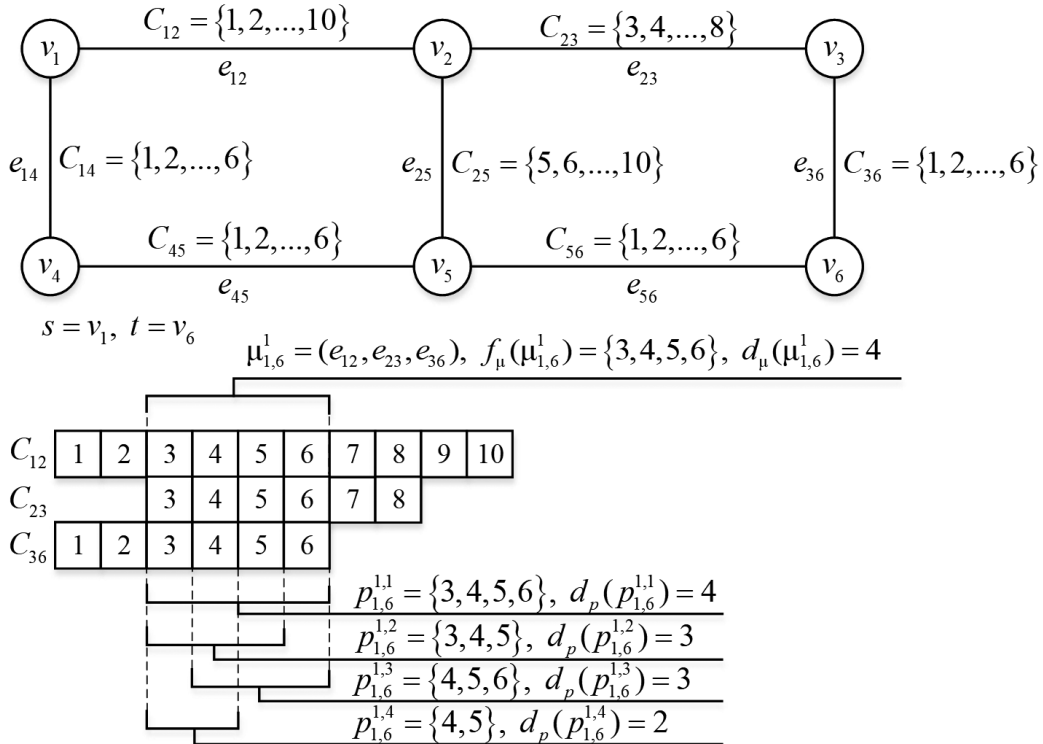


Рис. 3. Граф двухполюсной сети

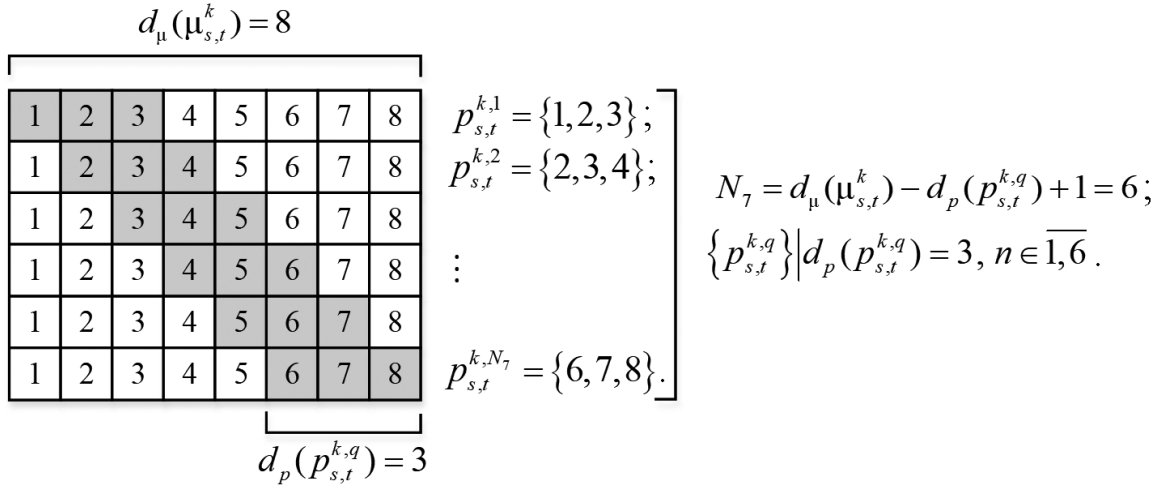


Рис. 4. Определение количества световых путей фиксированной ширины

– маршруты имеют общие ребра, но световые пути не имеют общих элементов, характеризующих используемые ими интервалы частот.

Таким образом, каждый полузакнутый интервал частот в каждой ВОЛС ОТС, может быть использован только для формирования одного светового пути. Формализуем данное ограничение. Система ограничений на одновременную реализацию световых путей, образованных маршрутом $\mu_{s,t}^k$ имеет вид:

$$\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{1}_{d_\mu(\mu_{s,t}^k)},$$

где $\mathbf{x} = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{N_8})^T$ — вектор, элементами которого являются двоичные переменные x_q ;

$\mathbf{1}_{d_\mu(\mu_{s,t}^k)} = (1_1 \ 1_2 \ \dots \ 1_{d_\mu(\mu_{s,t}^k)})^T$ — вектор из единиц;

\mathbf{A} — матрица размерности $N_8 \times d_\mu(\mu_{s,t}^k)$, строки которой соответствуют q -м световым путям, а столбцы — соответствуют элементам пропускной способности маршрута $c_g \in f_\mu(\mu_{s,t}^k)$. Элементы a_{qg} матрицы \mathbf{A} принимают значения 1 в том случае, если для реализации q -го светового пути используется g -й элемент (интервал частот). Все остальные элементы матрицы \mathbf{A} равны 0.

Пример. Пусть пропускная способность маршрута $\mu_{s,t}^k$ определяется множеством $f_\mu(\mu_{s,t}^k) = \{1, 2, 3, 4\}$. На его основе возможна реализация $N_6 = 10$ световых путей: $\{1\}$, $\{2\}$, $\{3\}$, $\{4\}$, $\{1, 2\}$, $\{2, 3\}$, $\{3, 4\}$, $\{1, 2, 3\}$, $\{2, 3, 4\}$, $\{1, 2, 3, 4\}$.

Тогда вектор \mathbf{x} состоит из 10 элементов, а матрица \mathbf{A} имеет вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

После перемножения матрицы \mathbf{A}^T и вектора \mathbf{x} , система ограничений на одновременную реализацию световых путей в пределах одного маршрута имеет вид:

$$\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{1}_{d_\mu(\mu_{s,t}^k)} \Leftrightarrow \begin{cases} x_1 + x_5 + x_8 + x_{10} \leq 1; \\ x_2 + x_5 + x_6 + x_8 + x_9 + x_{10} \leq 1; \\ x_3 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} \leq 1; \\ x_4 + x_7 + x_9 + x_{10} \leq 1. \end{cases}$$

Общую систему ограничений на одновременную реализацию световых путей и обеспечивающую их непересекаемость, можно формировать путем попарного перебора всех маршрутов или на основе ребер. Так как для графов сетей

реальных размерностей количество маршрутов на порядки превосходит количество ребер, формировать ограничения удобнее на основе перебора всех элементов пропускной способности каждого ребра. Далее на примере будет продемонстрирована суть данного подхода.

Для решения задачи оптимального распределения световых путей в ОТС, помимо системы ограничений, на основе которой формируется бюджетное множество, также необходимо сформировать целевую функцию. Особый интерес представляет задача поиска такого подмножества одновременно реализуемых световых путей, сумма величин пропускных способностей которых является максимальной для данного графа сети. Целевая функция данной задачи имеет вид:

$$f_0(x) = \sum_{q=1}^{N_8} x_q \cdot d_p(p_{s,t}^{k,q}) \rightarrow \max.$$

При этом на ширину световых путей могут накладываться дополнительные ограничения, то есть $P_{s,t} = \{p_{s,t}^{k,q} \mid d_p(p_{s,t}^{k,q}) \geq d_p^*\}$, где d_p^* — некоторое значение ширины светового пути, меньше которого не рассматриваются в задаче. Запишем окончательный вид задачи в матричной форме:

$$f_0(x) = \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{d}_p \rightarrow \max,$$

при условии, что:

$$\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{1}, \quad x_q \in \{0,1\},$$

где $\mathbf{d}_p = (d_p(p_{s,t}^{k,1}) \quad d_p(p_{s,t}^{k,2}) \dots d_p(p_{s,t}^{k,N_8}))^T$ — вектор, элементы которого представлены значениями ширины соответствующих световых путей.

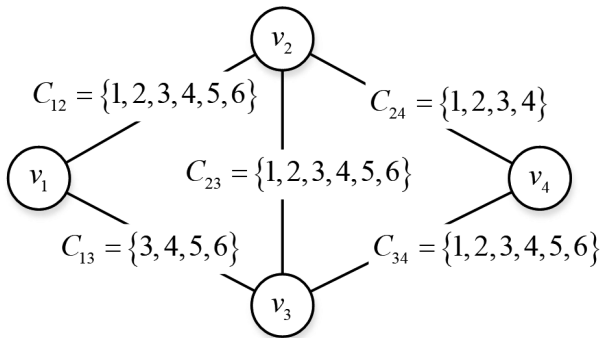


Рис. 5. Граф ОТС из четырех узлов

Пример моделирования и оценка эффективности

Рассмотрим конкретный пример нахождения оптимального распределения световых путей и сравним результаты, с полученными на основе последовательных методов.

Пусть ОТС описывается графом $G(V, E)$ изображенном на рис. 5. Между вершинами v_1 и v_4 необходимо найти такое одновременно реализуемое подмножество световых путей $P_{1,4}^* \subset P_{1,4}$, что сумма их ширины является максимальной. При этом ширина световых путей должна быть не меньше 2 и не более 4:

$$2 \leq d_p(p_{1,6}^{k,q}) \leq 4, \quad p_{1,6}^{k,q} \in P_{1,6}.$$

Между вершинами v_1 и v_4 существует 4 маршрута: $\mu_{1,4}^1 = (e_{12}, e_{24})$, $\mu_{1,4}^2 = (e_{12}, e_{23}, e_{34})$, $\mu_{1,4}^3 = (e_{13}, e_{32}, e_{24})$ и $\mu_{1,4}^4 = (e_{13}, e_{34})$ с пропускными способностями $f_\mu(\mu_{1,4}^1) = \{1, 2, 3, 4\}$, $f_\mu(\mu_{1,4}^2) = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, $f_\mu(\mu_{1,4}^3) = \{3, 4\}$ и $f_\mu(\mu_{1,4}^4) = \{3, 4, 5, 6\}$ соответственно. На основе каждого маршрута возможно сформировать подмножество световых путей, представленное в таблице.

Всего существует 25 световых путей и для удобства их индексацию можно заменить на сквозную, в соответствии с индексацией x_q . Тогда индекс q будет принимать значения от 1 до 25.

$P_{1,4} = \{p_{1,4}^{k,q}\}$, $q \in \overline{1, 25}$. Вектор \mathbf{x} будет иметь размерность \mathbb{R}^{25} , а элементы вектора \mathbf{d}_p , после несложных вычислений, будут иметь значения:

$$\mathbf{d}_p = (2 \ 2 \ 2 \ 3 \ 3 \ 4 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 4 \ 4 \ 4 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 3 \ 3 \ 4)^T.$$

Система ограничений, будет формироваться на основе каждого элемента из подмножества целых чисел, характеризующих пропускную способность каждого ребра. Так, полузамкнутый интервал, пронумерованный цифрой 1 в ребре e_{12} , может быть использован для формирования световых путей $p_{1,4}^{1,1} = \{1, 2\}$, $p_{1,4}^{1,4} = \{1, 2, 3\}$, $p_{1,4}^{1,6} = \{1, 2, 3, 4\}$, $p_{1,4}^{2,1} = \{1, 2\}$, $p_{1,4}^{2,6} = \{1, 2, 3\}$ и $p_{1,4}^{2,10} = \{1, 2, 3, 4\}$. Тогда ограничение, на одновременную реализацию множества световых путей, порожаемое данным полузамкнутым интервалом, будет иметь вид:

$$x_1 + x_4 + x_6 + x_7 + x_{12} + x_{16} \leq 1.$$

Световые пути, образованные на основе маршрутов

Пропускная способность маршрута	Световые пути и соответствующие им переменные x_q со сквозной нумерацией			
$f_\mu(\mu_{1,4}^1) = \{1, 2, 3, 4\}$	$p_{1,4}^{1,1} = \{1, 2\}$	x_1	$p_{1,4}^{1,4} = \{1, 2, 3\}$	x_4
	$p_{1,4}^{1,2} = \{2, 3\}$	x_2	$p_{1,4}^{1,5} = \{2, 3, 4\}$	x_5
	$p_{1,4}^{1,3} = \{3, 4\}$	x_3	$p_{1,4}^{1,6} = \{1, 2, 3, 4\}$	x_6
$f_\mu(\mu_{1,4}^2) = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$	$p_{1,4}^{2,1} = \{1, 2\}$	x_7	$p_{1,4}^{2,7} = \{2, 3, 4\}$	x_{13}
	$p_{1,4}^{2,2} = \{2, 3\}$	x_8	$p_{1,4}^{2,8} = \{3, 4, 5\}$	x_{14}
	$p_{1,4}^{2,3} = \{3, 4\}$	x_9	$p_{1,4}^{2,9} = \{4, 5, 6\}$	x_{15}
	$p_{1,4}^{2,4} = \{4, 5\}$	x_{10}	$p_{1,4}^{2,10} = \{1, 2, 3, 4\}$	x_{16}
	$p_{1,4}^{2,5} = \{5, 6\}$	x_{11}	$p_{1,4}^{2,11} = \{2, 3, 4, 5\}$	x_{17}
	$p_{1,4}^{2,6} = \{1, 2, 3\}$	x_{12}	$p_{1,4}^{2,12} = \{3, 4, 5, 6\}$	x_{18}
$f_\mu(\mu_{1,4}^3) = \{3, 4\}$	$p_{1,4}^{3,1} = \{3, 4\}$	x_{19}		
$f_\mu(\mu_{1,4}^4) = \{3, 4, 5, 6\}$	$p_{1,4}^{4,1} = \{3, 4\}$	x_{20}	$p_{1,4}^{4,4} = \{3, 4, 5\}$	x_{23}
	$p_{1,4}^{4,2} = \{4, 5\}$	x_{21}	$p_{1,4}^{4,5} = \{4, 5, 6\}$	x_{24}
	$p_{1,4}^{4,3} = \{5, 6\}$	x_{22}	$p_{1,4}^{4,6} = \{3, 4, 5, 6\}$	x_{25}

Перебирая каждый полузамкнутый интервал каждого ребра, сформируем общую систему ограничений. Чтобы не показаться излишне педантичными, но в то же время внести определенную ясность, отобразим лишь несколько строк общей системы ограничений:

$$\begin{cases} x_1 + x_4 + x_6 + x_7 + x_{12} + x_{16} \leq 1; \\ x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + \\ + x_{12} + x_{13} + x_{16} + x_{17} \leq 1; \\ x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_8 + x_9 + \\ + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{16} + x_{17} + x_{18} \leq 1; \\ \dots \\ x_{11} + x_{15} + x_{18} + x_{22} + x_{24} + x_{25} \leq 1. \end{cases}$$

Данная система ограничений формируется путем перемножения матрицы \mathbf{A}^T на вектор \mathbf{x} , в результате чего в матричном виде имеет вид:

$$\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{1}.$$

Имея все необходимое для формирования целевой функции и системы ограничений: \mathbf{x} , \mathbf{d}_p , \mathbf{A} , с использованием известных методов, разработанных для решения задач целочисленного линейного программирования [15, 16], находим оптимальное распределение световых путей: $x_6 = x_{11} = x_{20} = 1$. Световые пути, соответствующие данным переменным представлены в табл. Все остальные переменные x_q принимают значения 0. Оптимальное значение целевой функции составляет: $f_0(x) = 4 + 2 + 2 = 8$.

Для сравнения, решим задачу распределения световых путей для этой же ОТС последовательными методами. Множество маршрутов $M_{s,t} = \{\mu_{s,t}^k\}$, $k \in 1, 4$ и их пропускная способность уже известны. Начнем с маршрута $\mu_{1,4}^2$, имеющего наибольшую ширину: $d_\mu(\mu_{1,4}^2) = 6$. Поскольку все световые пути имеют одинаковую ценность, не зависимо от ширины, то нет принципиальной разницы в том, как распорядиться пропускной способностью маршрута. Это могут

быть световые пути $p_{1,4}^{2,10} = \{1, 2, 3, 4\}$ и $p_{1,4}^{2,5} = \{5, 6\}$, или $p_{1,4}^{2,6} = \{1, 2, 3\}$ и $p_{1,4}^{2,7} = \{2, 3, 4\}$. Главное, чтобы все 6 полузамкнутых интервалов были задействованы максимально эффективно. Таким образом, после того как вся пропускная способность самого широкого маршрута задействована, значение целевой функции увеличивается на 6 и становится: $f_0(x) = 6$. Далее веса ребер обновляются и формируется остаточная сеть $G'(V, E)$ (рис. 6).

В остаточной сети нет маршрутов с ненулевой пропускной способностью и значение целевой функции остается равным $f_0(x) = 6$. Но нам известно, что оптимальное значение целевой функции составляет $f_0(x) = 8$. Таким образом стратегия выбора самого широкого маршрута не дает оптимального решения.

Попробуем использовать стратегию выбора маршрута $\mu_{1,4}^3$ с наименьшей шириной: $d_\mu(\mu_{1,4}^3) = 2$. После выбора данного маршрута значение целевой функции становится равным $f_0(x) = 2$, веса ребер обновляются и формируется остаточная сеть $G'(V, E)$ (рис. 7, а). Пропускные способности маршрутов обновляются и становятся: $f_\mu(\mu_{1,4}^1) = \{1, 2\}$, $f_\mu(\mu_{1,4}^2) = \{1, 2, 5, 6\}$, $f_\mu(\mu_{1,4}^4) = \{5, 6\}$. Выбирая маршрут с наименьшей шириной (например маршрут $f_\mu(\mu_{1,4}^1) = \{1, 2\}$), увеличиваем значение целевой функции на 2:

$f_0(x) = 2 + 2 = 4$ и получаем остаточную сеть $G'(V, E)$ (рис. 7, б). Снова обновляем пропускные способности маршрутов и выбираем с наименьшей шириной $f_\mu(\mu_{1,4}^4) = \{5, 6\}$. Значение целевой функции становится $f_0(x) = 4 + 2 = 6$, а в остаточной сети не остается маршрутов с ненулевой пропускной способностью (рис. 7, в).

Таким образом стратегия выбора маршрута с наименьшей шириной, также не дает оптимального решения. Строгое оптимальное решение можно получить путем последовательного выбора маршрутов $f_\mu(\mu_{1,4}^1)$ и $f_\mu(\mu_{1,4}^4)$ и задействуя максимально их пропускную способность $f_0(x) = 4 + 4 = 8$. Данные маршруты являются кратчайшими, с точки зрения количества ребер их образующих. Однако строго утверждать, что данная стратегия всегда приводит к строгому оптимальному решению — нельзя. Авторами были исследованы множества стратегий последовательного решения задачи оптимального распределения световых путей, лишь две из которых представлены в данной статье. Результаты исследования позволяют утверждать, что лишь в ряде частных случаев удастся получить строгое оптимальное решение путем поиска маршрутов и последовательного назначения частот для световых путей.

Заключение

В данной статье предложен комплексный подход к формализации и решению задачи оптимального распределения световых путей в оптических транспортных сетях с гибкой сеткой частот. Введено расширенное определение светового пути как совокупности маршрута и непрерывного спектрального ресурса, выделенного вдоль всего маршрута в виде смежных элементарных частотных интервалов. Разработанная математическая модель учитывает ключевые

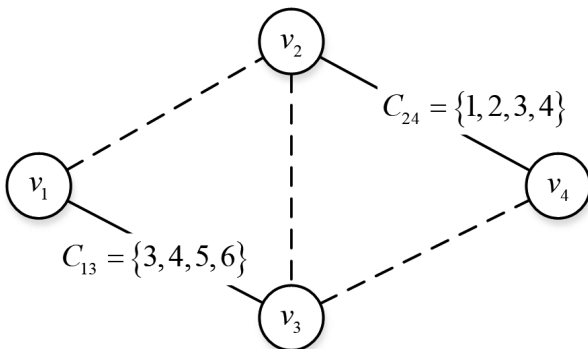


Рис. 6. Остаточная сеть

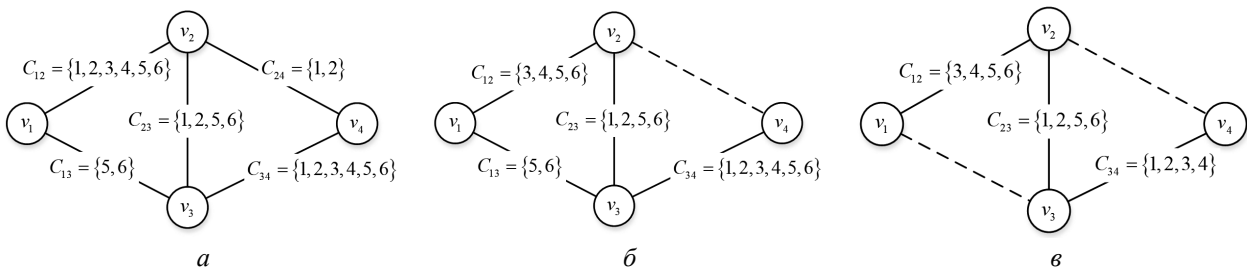


Рис. 7. Остаточные сети

ограничения, накладываемые на спектральные ресурсы: непрерывность, смежность, непересекаемость и ограниченность общей полосы частот в волоконно-оптических линиях.

Поставленная оптимизационная задача сведена к задаче целочисленного линейного программирования, что позволяет находить решения с гарантированным глобальным оптимумом. На конкретном примере продемонстрировано преимущество предлагаемого подхода по сравнению с распространенными последовательными стратегиями, основанными на локальных критериях выбора маршрутов и назначения спектра. Результаты показывают, что только комплексное моделирование, сочетающее маршруты и спектральные характеристики, позволяет получить строго оптимальное распределение световых путей и эффективно использовать ограниченный спектральный ресурс сети.

Предложенная модель может быть положена в основу интеллектуальных систем планирования, применяемых как на этапе проектирования, так и в процессе динамической настройки и перенастройки сетевой инфраструктуры. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку эффективных эвристических и приближенных методов решения задачи распределения световых путей для сетей реальных масштабов, а также на расширение модели с учетом факторов деградации сигнала, качества передачи и требований к надежности.

Список источников

1. Lupez V., Velasco L. Elastic Optical Networks: Architectures, Technologies, and Control. Springer, 2016. 299 с.
2. Bijoy C.C., Eiji O. Elastic Optical Networks: Fundamentals, Design, Control, and Management. New Delhi: South Asian University, 2020. 232 с.
3. Фокин В.Г., Ибрагимов Р.З. Гибкие оптические сети: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2022. 252 с.
4. Mukherjee B. Optical WDM Networks. University of California, Davis. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/0-387-29188-1> (дата обращения: 20.07.2025).
5. Фокин В.Г. Когерентные оптические сети. 2-е изд., испр. СПб.: Лань, 2023. 440 с.
6. Shimada T., Iiyama N., Kimura H., Hadama H. Dynamic Control Method of Queuing Delay without OEO Conversion in a Multi-Stage Access Network // Proc. of 2012 World Telecommunications Congress. Miyazaki, Japan, 2012. Pp. 1–6.
7. Wang Y., Cao X., Pan Y. Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Path Networks with Spectrum-Slicing // 2011 Proceedings IEEE INFOCOM. Shanghai, China, 2011. Pp. 1503–1511.
8. Behera S., Das G. Dynamic Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks with Minimal Disruption // 2020 National Conference on Communications (NCC). Kharagpur, India, 2020. Pp. 1–5.
9. Cheng B. et al. Routing and Spectrum Assignment Algorithm based on Spectrum Fragment Assessment of Arriving Services // 2019 28th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC). Beijing, China, 2019. Pp. 1–4.
10. Adhikari D.A. Dynamic Spectrum Allocation Scheme to Limit the FWM Effects in Elastic Optical Networks // 2022 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets). Palapye, Botswana, 2022. Pp. 1–6.
11. Карапузов А.Н., Панкин А.А., Курочкин П.В., Кузин П.И. Модель оценки вспомогательного служебного трафика при сетевом контроле // Известия Высшей военной школы Генерального штаба Вооруженных сил Республики Ангола. 2025. № 3. С. 43–45.
12. Кузин П.И., Челахов Д.М., Miguel Domingos P. Предложения по применению беспроводных сенсорных сетей в военной отрасли // Известия Высшей военной школы Генерального штаба Вооруженных сил Республики Ангола. 2025. № 1. С. 34–38.
13. Бойко А.П., Шевченко А.А., Кузин П.И. Модель оптической транспортной сети специального назначения в условиях деструктивных воздействий // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2025. Т. 22, № 1 (247). С. 42–50.
14. Бойко А.П., Ясинский С.А., Одоевский С.М. Обобщенная модель светового пути в оптических транспортных сетях на основе реконфигурируемых оптических мультиплексоров ввода/вывода // Электросвязь. 2024. № 7. С. 43–48.
15. Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях; пер. с англ. П.Л. Бузыцкого и др.; под ред. А.А. Фридмана. М.: Мир, 1974. 519 с.

16. Таха Х.А. Введение в исследование операций; пер. с англ. М.: Вильямс, 2001. 912 с.

References

1. Lupez V. & Velasco L. (2016). Elastic Optical Networks: Architectures, Technologies, and Control. Optical Networks Series, Springer. 299 p.
2. Bijoy C.C. & Eiji O. (2020). Elastic Optical Networks: Fundamentals, Design, Control, and Management. New Delhi: South Asian University. 232 p.
3. Fokin V.G. & Ibragimov R.Z. (2022). Flexible Optical Networks: Textbook. Saint Petersburg: Lan Publishing. 252 p.
4. Mukherjee B. (2006). Optical WDM Networks. Department of Computer Science, University of California, Davis. Springer. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/0-387-29188-1> (accessed: July 20, 2025).
5. Fokin V.G. (2023). Coherent Optical Networks (2nd ed.). Saint-Petersburg: Lan Publishing. 440 p.
6. Shimada T., Iiyama N., Kimura H. & Hadama H. (2012). Dynamic Control Method of Queuing Delay with/without OEO Conversion in a Multi-Stage Access Network. 2012 World Telecommunications Congress, Miyazaki, Japan. Pp. 1–6.
7. Wang Y., Cao X. & Pan Y. (2011). Study on Routing and Spectrum Allocation in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Networks. Proceedings IEEE INFOCOM 2011, Shanghai, China. Pp. 1503–1511.
8. Behera S., & Das G. (2020). Dynamic Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks with Minimal Disruption. 2020 National Conference on Communications (NCC), Kharagpur, India. Pp. 1–5.
9. Cheng B. et al. (2019). Routing and Spectrum Assignment Algorithm Based on Spectrum

Fragment Assessment of Arriving Services. 2019 28th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), Beijing, China. Pp. 1–4.

10. Adhikari D. (2022). A Dynamic Spectrum Allocation Scheme to Limit the FWM Effects in Elastic Optical Networks. 2022 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets), Palapye, Botswana. Pp. 1–6.

11. Karapuzov A.N., Pankin A.A., Kurochkin P.V., Kuzin P.I. Model for assessing auxiliary service traffic during network control // News of the Higher Military School of the General Staff of the Armed Forces of the Republic of Angola. 2025. No 3. Pp. 43–45.

12. Kuzin P.I., Chelakhov D.M., Miguel Domingos P. Proposals for the use of wireless sensor networks in the military industry. // News of the Higher Military School of the General Staff of the Armed Forces of the Republic of Angola. 2025. No 1. Pp. 34–38.

13. Boyko A.P., Shevchenko A.A., Kuzin P.I. (2025). A Model of a Special-Purpose Optical Transport Network under Destructive Impacts. Bulletin of Computer and Information Technologies, 22 (1). Pp. 42–50.

14. Boyko A.P., Yasinsky S.A., Odoyevsky S.M. (2024). Generalized Model of a Lightpath in Optical Transport Networks Based on Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexers. *Elektrosvyaz*. 2024 (7). Pp. 43–48.

15. Hu T.C. (1974). Integer Programming and Network Flows. Translated from English by P.L. Buzytsky et al., ed. by A. A. Fridman. Moscow: Mir Publishers. 519 p.

16. Taha H.A. (2001). Operations Research: An Introduction. Translated from English. Moscow: Williams Publishing House. 912 p.

УДК 005.6

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_152

**ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ
МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ
СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**PROBLEMS OF ASSESSING THE PERFORMANCE OF QUALITY MANAGEMENT
SYSTEM PROCESSES IN THE PRODUCTION OF SPECIAL-PURPOSE
PRODUCTS**

В.А. Пилюгина^{1,2}, А.В. Прищенко¹, Н.Е. Петрова^{1,2}

V.A. Piliugina, A.V. Prishchenko, N.E. Petrova

¹НПО Спецматериалов, ²СПбГЭУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

В статье исследованы проблемы оценки результативности процессов системы менеджмента качества при производстве изделий специального назначения, характерного для высокотехнологичных сфер. Проанализированы проблемы, с которыми сталкиваются организации, производящие широкую номенклатуру продукции специального назначения, при оценке результативности процессов системы менеджмента качества и предложены пути их решения. Проведен анализ методик, применяемых организациями оборонно-промышленного комплекса, при оценке результативности процессов системы менеджмента качества, а также определены основные направления совершенствования подхода к оценке результативности системы менеджмента качества, включая использование риск-ориентированных и экспертно-качественных методов.

Ключевые слова: система менеджмента качества, оценка результативности процессов, изделия специального назначения.

This article examines the challenges of assessing the effectiveness of quality management system processes in the production of special-purpose products typical of high-tech industries. It analyzes the challenges faced by organizations producing a wide range of special-purpose products when assessing the effectiveness of quality management system processes and proposes solutions. It also analyzes the methods used by defense industry organizations to assess the effectiveness of quality management system processes and identifies key areas for improving the approach to assessing quality management system effectiveness, including the use of risk-based and expert-qualitative methods.

Keywords: quality management system, assessment of process effectiveness, special-purpose products.

Введение

Производство изделий специального назначения, к которым относится продукция оборонно-промышленного комплекса, аэрокосмической отрасли, атомной энергетики и других высокотехнологичных сфер, как правило, сопровожда-

ется повышенными требованиями к качеству со стороны надзорных органов (таких как Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору) и заказчиков, в том числе государственных (Министерство обороны, Министерство внутренних дел, Федеральная служба безопасности Российской Федерации и

др.). В таких условиях система менеджмента качества (СМК) должна обеспечивать выполнение технических требований к продукции в условиях действия большого числа внешних по отношению к действующему производству факторов, а также внутренних факторов, связанных с балансом доходов и расходов, конкуренцией с производителями аналогичной продукции и влиянием научно-технического прогресса, при этом демонстрируя высокую результативность процессов [1]. Однако объективная оценка процессов СМК в данной сфере оказывается затруднена, так как сталкивается с рядом уникальных трудностей.

Особенности производства изделий специального назначения

Производственные процессы, связанные с выпуском специальной продукции, как правило, характеризуются высокой сложностью, длительным циклом изготовления, множеством уникальных требований и строгим контролем со стороны государственного оборонного заказа (ГОЗ) и надзорных органов.

Так, например АО «НПО Спецматериалов» — ведущее российское предприятие, осуществляющее полный цикл разработки, серийного производства и испытаний средств индивидуальной бронезащиты и других защитных изделий, осуществляет производство более 400 позиций продукции [2]. С 2023 года предприятие начало выпуск российского сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) [3] для дальнейшего производства элементов бронезащиты для продукции специального назначения, инвестировав в проект около 1 млрд рублей [4]. В подобных условиях традиционные методы оценки результативности процессов, применимые в массовом производстве, могут оказаться недостаточно чувствительными или неэффективными.

Основные проблемы оценки результативности процессов СМК при производстве изделий специального назначения

1. Отсутствие количественно измеримых критериев.

Даже при наличии широкого спектра продукции и регулярных поставок по ГОЗ, многие

процессы в производстве специальной продукции носят проектный или опытно-конструкторский характер, что затрудняет их количественную оценку ввиду отсутствия необходимого объема данных. Так оценка процессов, зачастую, основывается не на статистических данных, а на показателях оценки процессов. В связи с этим возникает новая сложность: важные критерии в данной сфере, например, уровень удовлетворенности заказчика, трудно поддаются стандартизации, особенно в условиях производства большого объема номенклатуры продукции и невозможности получения обратной связи от заказчиков [5].

2. Закрытость данных и ограниченный доступ к информации.

Изделия специального назначения часто сопровождаются ограничениями по доступу к информации (режим секретности, конфиденциальность). Это затрудняет полное и объективное измерение процессов, особенно при необходимости внешнего аудита или сертификации по международным стандартам (например, ISO 9001:2015) [6].

3. Длительность производственных циклов.

Оценка результативности процессов требует анализа их выходов, однако в сложных производственных цепочках результат одного процесса может проявляться только через месяцы или даже годы. Так процессы разработки нового материала (например, СВМПЭ), освоение новых производственных линий могут занимать годы, что ограничивает скорость реагирования и корректировки ключевых показателей эффективности (КПЭ). Это снижает объективность оценки процессов, а как следствие и оперативность корректирующих действий и увеличивает управленческие риски [7].

Пути решения проблемы

Несмотря на имеющиеся сложности при оценке процессов СМК в условиях производства специальных изделий актуальными остаются следующие решения:

– разработка индивидуальных критериев оценки для каждой группы процессов с учетом особенностей производства специальной продукции;

– индивидуализация КПЭ — разработка метрик под задачи конкретных проектов (напри-

мер, новый материал, запуск линии, выполнение ГОЗ) [8];

– использование качественных методов оценки, включая экспертные опросы, анализ удовлетворенности заказчика на основании опросов (в случае доступности данных), аудиты процессов и SWOT-анализ. Так АО «НПО Спецматериалов» проводит совместные научно-исследовательские проекты с ведущими вузами и научными учреждениями (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская академия наук), что обеспечивает регулярное экспертное вовлечение при оценке качества и результативности научных и технологических процессов [9].

Методики оценки результативности процессов системы менеджмента качества при производстве изделий специального назначения

В качестве примера рассмотрим методику оценки результативности процессов СМК, предлагаемую системой добровольной сертификации «Военный Регистр» [10] и методику оценки, используемую АО «НПО Спецматериалов».

В соответствии с методикой, разработанной специалистами АНО НИЦ «Военный Регистр», оценка результативности СМК включает следующие этапы:

- определение частных показателей второго уровня;
- определение частных показателей первого уровня;

– определение значения интегрального показателя результативности СМК;

– интерпретация значения интегрального показателя результативности СМК.

Оценка результативности СМК рассчитывается как средневзвешенная оценка пяти частных показателей, представленных в табл. 1.

В данной методике как при расчете частных показателей, так и при расчете результативности СМК в целом, используется метод средневзвешенных оценок.

Для расчета показателей первого уровня из таблиц, содержащих показатели второго уровня, в зависимости от вида деятельности, выбираются применимые для конкретной организации показатели, которые далее подставляются в формулы.

Величина R_1 рассчитывается на основании частных показателей второго уровня, приведенных в табл. 2, которые подставляются в следующую формулу:

$$R_1 = \frac{\sum_{i=1}^4 \gamma_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^4 \gamma_i}, \quad (1)$$

где S_i — значение i -го частного показателя второго уровня, приведенное в табл. 2;

γ_i — коэффициент значимости i -го частного показателя второго уровня, определяемый по табл. 2.

Величина R_2 характеризует степень выполнения организацией требований ГОСТ РВ 0015–002 [11] и рассчитывается на основании частных показателей второго уровня, приведенных в табл. 3.

Из табл. 3, также в зависимости от вида деятельности, выбираются применимые для кон-

Таблица 1

Частные показатели первого уровня

№ частного показателя	Обозначение частного показателя	Содержание частного показателя	Коэффициент значимости показателя, β
1	R_1	Характеризует удовлетворенность потребителей (заказчиков) качеством продукции (работ, услуг)	0,94
2	R_2	Характеризует соответствие требованиям к продукции	0,98
3	R_3	Характеризует степень выполнения требований ГОСТ РВ 0015–002, применительно к виду деятельности организации	0,88
4	R_4	Характеризует степень достижения целей организации в области качества и установленных критериев оценки результативности процессов	0,83
5	R_5	Характеризует качество продукции внешних поставщиков	0,86

Таблица 2

Частные показатели второго уровня для расчета R_1

№ частного показателя	Обозначение частного показателя	Содержание частного показателя второго уровня	Коэффициент значимости показателя, γ
1	S_1	Доля выполненных контрактов/договоров на поставку продукции (работ, услуг) в срок по отношению к общему количеству контрактов/договоров	0,99
2	S_2	Доля продукции (работ, услуг), сданной с первого предъявления заказчику	0,92
3	S_3	Доля продукции, на которую не получены рекламации, в общем числе сданной продукции	0,96
4	S_4	Доля продукции (работ, услуг), на которую от заказчика получены замечания, не оформленные в виде рекламаций, но признанные организацией, в общем числе сданной продукции (работ, услуг)	0,69

Таблица 3

Частные показатели второго уровня для расчета R_2

№ частного показателя	Обозначение частного показателя	Содержание частного показателя второго уровня	Коэффициент значимости показателя, δ
1	T_1	Доля продукции, не забракованной отделом технического контроля (ОТК) при операционном контроле	0,74
2	T_2	Доля продукции, сданной с первого предъявления ОТК	0,76
3	T_3	Доля продукции, принятой с отклонениями от заданной конфигурации по согласованию с заказчиком ($T_{\text{откл}} = 1 - T_{\text{откл}}$) по отношению к общему числу продукции $T_3 = 1 - T_{\text{откл}}$	0,95
4	T_4	Доля повторяющихся несоответствий (дефектов) продукции	0,85

кретной организации показатели, которые подставляются в формулу:

$$R_2 = \frac{\sum_{i=1}^4 \delta_i \cdot T_i}{\sum_{i=1}^4 \delta_i}, \quad (2)$$

где T_i — значение i -го частного показателя второго уровня, приведенное в табл. 3;

δ_i — коэффициент значимости i -го частного показателя 2-го уровня, определяемый по табл. 3.

Величина R_3 рассчитывается на основании частных показателей второго уровня, приведенных в табл. 4, которые подставляются в формулу:

$$R_3 = \frac{\sum_{i=1}^9 \lambda_i \cdot U_i}{\sum_{i=1}^9 \lambda_i}, \quad (3)$$

где U_i — значение i -го частного показателя второго уровня, приведенное в табл. 4;

λ_i — коэффициент значимости i -го частного показателя второго уровня, определяемый по табл. 4.

Величина R_4 определяется с учетом фактических величин критериев результативности процессов, определенных организацией как необходимые для СМК, а также достижения целей организации в области качества, поставленных на год.

Для расчета R_4 используется следующая формула:

$$R_4 = \frac{\sum_{i=1}^{K_{\text{РП}}} W_i + \sum_{j=1}^{K_{\text{Ц}}} Z_j}{K_{\text{РП}} + K_{\text{Ц}}}, \quad (4)$$

где W_i — «вклад в R_4 » i -го критерия результативности процессов;

Частные показатели второго уровня для расчета R_3

№ частного показателя	Обозначение частного показателя	Содержание частного показателя второго уровня	Коэффициент значимости показателя, I
Для проектирования			
1	U_1	Доля выполнения этапов научно-исследовательских работ (НИР), опытно-конструкторских работ (ОКР) в запланированные сроки по отношению к общему объему выполненных НИР, ОКР	0,96
2	U_2	Доля сданных этапов НИР, ОКР с первого предъявления заказчику по отношению к общему объему выполненных этапов	0,95
3	U_3	Доля конструктивных дефектов $U_{\text{деф}}$, выявленных по результатам государственных (межведомственных) испытаний, приведших к невыполнению программы испытаний $U_3 = 1 - U_{\text{деф}}$	0,99
4	U_4	Доля разработанных технологических процессов и технологической документации (ТД) на изготовление продукции, содержащих информацию о ключевых характеристиках по отношению к общему количеству разработанных технологических процессов и ТД	0,7
5	U_5	Доля замещенных комплектующих изделий (КИ), материалов (сырья) иностранного производства на отечественные аналоги по отношению к общему числу используемых КИ, материалов (сырья) иностранного производства	0,79
6	U_6	Доля изменений проектов и разработок, имеющих документальное подтверждение анализа изменений (записи), включающего оценку влияния изменений на составные части и уже поставленную продукцию	0,89
Для производства			
7	U_7	Доля технологического оборудования и оснащения, для которого плановые сроки проведения проверки на технологическую точность были соблюдены	0,93
8	U_8	Доля технологического оборудования, для которого плановые сроки проведения наладочных и ремонтных работ были соблюдены	0,93
9	U_9	Доля специальных и особо ответственных технологических процессов, имеющих свидетельства аттестации	0,99
10	U_{10}	Доля выхода годных образцов продукции из числа запущенных в производство	0,97
11	U_{11}	Доля дефектных образцов продукции ($U_{\text{обр}}$) в партии, потоке или в испытываемой выборке $U_{11} = 1 - U_{\text{обр}}$	0,9
12	U_{12}	Доля технологических операций без нарушения технологической дисциплины от общего количества проверенных технологических операций	0,91
13	U_{13}	Доля технических средств для измерения, прошедших поверку и аттестацию в запланированные сроки	0,92
14	U_{14}	Доля продукции, выпущенной и принятой в соответствии с производственным планом	0,91
15	U_{15}	Доля персонала, прошедшего обучение и аттестацию в соответствии с установленными сроками	0,86

№ частного показателя	Обозначение частного показателя	Содержание частного показателя второго уровня	Коэффициент значимости показателя, l
Для реализации (поставки)			
16	U_{16}	Доля брака КИ, сырья и материалов $U_{бр}$, выявленных при входном контроле и в ходе производства, к общему числу принятых КИ, сырья и материалов $U_{16} = 1 - U_{бр}$	0,97
17	U_{17}	Доля зафиксированных нарушений $U_{нар}$ установленных параметров производственной среды $U_{17} = 1 - U_{нар}$	0,91
18	U_{18}	Доля возвратов КИ, сырья и материалов $U_{возв}$ от заказчика в общем числе поставленных КИ, сырья и материалов $U_{18} = 1 - U_{возв}$	0,96

Z_j — «вклад в R_4 » j -го критерия достижения целей;

$K_{рп}$ — количество критериев результативности процессов;

$K_{ц}$ — количество критериев достижения поставленных на год целей.

Величина W_i i -го критерия результативности процессов принимает значение в зависимости от того, какие действия необходимо произвести по итогам оценки результативности процессов:

$W_i = 0$, если требуются корректирующие действия (фактическое значение критерия результативности хуже установленного норматива);

$W_i = 0,5$, если требуются действия по рассмотрению рисков и возможностей (фактическое значение критерия результативности находится в допустимом диапазоне, но отсутствует улучшение по сравнению с предыдущим периодом);

$W_i = 1$, если действия не требуются (фактическое значение критерия результативности лучше установленного норматива или находится в допустимом диапазоне и имеется динамика улучшения по сравнению с предыдущим периодом);

Величина Z_j критерия достижения j -й цели, поставленной за год, принимает значение в зависимости от того, достигнута ли цель:

$Z_j = 0$, если цель не достигнута;

$Z_j = 1$, если цель достигнута.

Величина R_5 рассчитывается как средневзвешенная оценка частных показателей второго уровня, приведенных в табл. 5, которые подставляются в формулу:

$$R_5 = \frac{\sum_{i=1}^2 \mu_i \cdot V_i}{\sum_{i=1}^2 \mu_i}, \quad (5)$$

где V_i — значение i -го частного показателя второго уровня, приведенных в табл. 5;

μ_i — коэффициент значимости i -го частного показателя второго уровня, определяемый по табл. 5.

Значение интегрального показателя результативности СМК $R_{СМК}$ рассчитывается как средневзвешенная оценка пяти частных показателей (R_1, R_2, R_3, R_4, R_5) по формуле:

$$R_{СМК} = \frac{\sum_{i=1}^5 \beta_i \cdot R_i}{\sum_{i=1}^5 \beta_i},$$

где R_i — значение i -го частного показателя первого уровня, рассчитанное по формулам (1), (2), (3), (4), (5);

β_i — коэффициент значимости i -го частного показателя первого уровня, определяемый по табл. 1.

Интерпретация полученного значения результативности СМК осуществляется на основании табл. 6, в которой представлено четыре уровня результативности СМК: недопустимая, допустимая, достаточная и высокая.

Преимуществом данного метода является то, что при расчете результативности СМК учитываются различные сферы, такие как качество сырья, материалов и комплектующих, способность СМК достигать поставленных целей, результативность процессов СМК, со-

Таблица 5

Частные показатели второго уровня для расчета R_s

№ показателя	Обозначение частного показателя	Содержание частного показателя второго уровня	Коэффициент значимости показателя, μ
1	V_1	Доля внешних поставщиков выполнивших свои договорные обязательства в соответствии с требованиями контракта (договора)	0,72
2	V_2	Доля годной продукции в общем количестве поставленной. Величина V_2 определяется как отношение количества забракованной продукции внешних поставщиков $k_{\text{брак}}$ к общему количеству поставленной поставщиками продукции $k_{\text{поставл}}$ по формуле: $V_2 = 1 - \frac{k_{\text{брак}}}{k_{\text{поставл}}}$	0,95
3	V_3	Доля отказов КИ, сырья и материалов по результатам актов исследования принятых рекламаций к общему числу поставленных КИ, сырья материалов	0,96

Таблица 6

Интерпретация полученных значений $R_{\text{СМК}}$

Полученная количественная оценка результативности СМК	Степень результативности СМК
$R_{\text{СМК}} < 0,75$	недопустимая
$0,75 \leq R_{\text{СМК}} < 0,85$	допустимая (необходима разработка программы (плана) по повышению результативности СМК)
$0,85 \leq R_{\text{СМК}} < 0,95$	достаточная
$0,95 \leq R_{\text{СМК}} < 1$	высокая

ответствие компетенций и знаний персонала установленным требованиям, результативность метрологического обеспечения производства, способность производить запланированный объем продукции, доля брака, результативность системы обслуживания инфраструктуры и удовлетворенность потребителей готовой продукцией. Таким образом данная оценка охватывает весь жизненный цикл продукция, начиная с проектирования и разработки, и заканчивая обслуживанием после поставки.

Недостатком данного метода является необходимость мониторинга и сбора большого количества данных для расчета всех необходимых показателей и сложность в проведении промежуточной оценки результативности СМК (например, полугодовой или поквартальной), так

как при данной оценке не учитывается то, что достижение целей в области качества планируется на год, то есть при проведении данных оценок большая часть целей в области качества не будут достигнуты.

Далее рассмотрим методику оценки результативности СМК, используемую АО «НПО Спецматериалов».

В АО «НПО Спецматериалов» на основе определения области применения СМК и основных задач организации представителем руководства по качеству и культуре безопасности совместно с генеральным директором, его заместителями, директором завода специальных материалов (далее — ЗСМ) и заместителями директора ЗСМ по направлениям выделены процессы СМК и назначены владельцы процессов.

Документирование процессов состоит из разработки карт процессов, в которых описаны: наименование и статус процесса; требования стандартов, которые применимы к данному процессу; назначение, владелец и участники процесса; основные виды деятельности в рамках процесса; документация процесса; входы, выходы процесса; процессы-поставщики и процессы-потребители; управляющие воздействия; виды используемых ресурсов, а также показатели оценки процесса, критерии его результативности и риски для данного процесса вместе с решениями по факторам риска.

За I полугодие и за год владельцы процессов по итогам мониторинга процессов совместно с участниками процессов подготавливают отчеты о результативности функционирования процессов с учетом:

- достижения установленных показателей;
- анализа причин невыполнения установленных показателей;
- воздействия факторов риска и принятия решений по ним;
- предложений по улучшению процесса.

Мониторинг процессов осуществляется для каждого из показателей процесса, для которого в карте процесса установлены критерии результативности.

Расчет результативности процесса осуществляется согласно следующей формуле:

$$P_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{пок}_i},$$

где $P_{\text{пр}}$ — результативность процесса в целом;
 $P_{\text{пок}_i}$ — результативность по показателю i , которая рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{пок}_i} = K_i \cdot Bk_i,$$

где K_i — значение критерия результативности процесса в баллах по показателю оценки процесса i ;

Bk_i — значение весового коэффициента, соответствующего i -му показателю оценки процесса.

Если показатель результативности данного процесса $0 \leq P_{\text{пр}} < 2$, то процесс считается нерезультативным.

Если показатель результативности данного процесса $2 \leq P_{\text{пр}} < 2,3$, то у процесса низкая результативность.

Если показатель результативности данного процесса $2,3 \leq P_{\text{пр}} < 2,6$, то у процесса средняя результативность.

Если показатель результативности данного процесса $2,6 \leq P_{\text{пр}} < 3$, то у процесса высокая результативность.

Результаты оценки результативности функционирования процессов СМК, подписанные владельцами процессов, направляются представителю руководства по качеству и культуре безопасности для проведения оценки результативности СМК.

Результативность СМК рассчитывается по следующей формуле:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i \cdot k_i,$$

где I_i — результативность i -го процесса СМК;

k_i — весовой коэффициент процесса;

n — количество процессов СМК.

Весовые коэффициенты для процессов определяются экспертным методом, ориентируясь на такие аспекты, как цели, задачи и миссия, основные требования заинтересованных сторон и др. На момент написания статьи в АО «НПО Спецматериалов» применяются коэффициенты процессов, представленные в табл. 7.

После определения оценки результативности СМК ее классифицируют по шкале значимости в соответствии с табл. 8.

Преимуществами данного метода является то, что при оценке результативности СМК учитывается результативность всех входящих в нее процессов организации, в следствие чего для оценки результативности СМК организации не требуется проведение анализа большого количества данных, так как оценку результативности процессов СМК проводят сами владельцы процессов, имеющие необходимые для оценки их процессов данные.

Недостатком данного метода можно считать то, что при оценке результативности СМК не учитывается результативность видов деятельности, которые не определены организацией как процессы.

Заключение

Таким образом оценка результативности процессов системы менеджмента качества в

Таблица 7

Коэффициенты значимости процессов СМК АО «НПО Спецматериалов»

№ процесса	Наименование процесса СМК	Коэффициент значимости процесса
1.1	Планирование	0,10
2.1	Определение требований заказчика (потребителя)	0,10
2.2	Проектирование и разработка	0,10
2.3	Закупки	0,15
2.4	Производство	0,20
2.5	Отгрузка	0,05
2.6	Анализ удовлетворенности заказчиков (потребителей)	0,10
3.1	Управление инфраструктурой	0,10
4.1	Внутренний аудит	0,05
4.2	Анализ функционирования СМК	0,05

Таблица 8

Интерпретация полученных значений результативности СМК (I) в АО «НПО Спецматериалов»

Оценка	Числовые интервалы результативности процессов, системы	Числовые интервалы результативности системы, %	Состояние устойчивости системы	Действия в отношении системы
Высокая	2,6–3,0	86–100	Устойчива	Система функционирует результативно, но требует разработки мероприятий, направленных на совершенствование, если $I = 100\%$, то система не требует разработки каких-либо действий.
Средняя	2,3–2,6	76–85	Устойчива	Система функционирует результативно, но требует разработки незначительных КД
Низкая	2,0–2,3	66–75	Устойчива	Система функционирует результативно, но требует разработки КД
Система нерезультативна	0–2,0	0–65	Неустойчива	Система функционирует нерезультативно и требует разработки значительных КД, вложения средств

производстве изделий специального назначения требует гибкого, комплексного и адаптивного подхода. Необходимы инструменты, позволяющие учитывать высокую степень неопределенности, индивидуальность проектов и специфические требования заказчиков. Опыт

АО «НПО Спецматериалов» иллюстрирует, что любые традиционные подходы к оценке результативности процессов СМК должны адаптироваться к условиям с высокой степенью технологической, нормативной и информационной сложности. Совершенствование

подходов к оценке результативности является не только задачей обеспечения соответствия деятельности предприятия стандартам, но и важным фактором повышения конкурентоспособности предприятий.

Список источников

1. Сильников М.В., Анастасиади Г.П. Математическая модель принятия решений в управлении качеством промышленной продукции // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2014. № 1 (81). С. 106–112.
2. Сильников Н.М., Новак О.С., Каранин Г.А. Термомеханическое прессование полотна «РУССИЛ» // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 7–8 (181–182). С. 144–146.
3. 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.
4. Коммерсантъ СПб: запуск производства СВМПЭ, 2023–2024 гг. URL: https://www.kommersant.ru/doc/6788049?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 17.07.2025).
5. Сычева М.Е., Мерзлякова И.В., Копылова Е.В. Разработка результативности процессов СМК // Перспективные материалы и технологии. (ПМТ – 2023): сборник докладов Национальной научно-технической конференции с международным участием Института перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА. 2023. Том 2. С. 271–275.
6. Савелов Г.А., Алешин А.И., Козлов В.А., Качарава Т.Н. Стратегическое управление предприятиями ОПК в условиях сокращения объемов государственного оборонного заказа // Скиф. Вопросы студенческой науки. 2019. № 11 (39). С. 606–615.
7. Хужина Ю.О., Метелев Д.А. Целеполагание системы менеджмента качества оборонно-промышленного предприятия, как основа

конкурентного преимущества // Физика. Технологии. Инновации (ФТИ – 2020): сб. ст. VII Межд. молодеж. науч. конф. 2020. С. 115–121.

8. Балдина А.С. Проблемы построения и оптимизации систем управления качеством на российских оборонных предприятиях // Траектории технологического развития. 2022. Т. 1, № 2 (2). С. 51–63.

9. НПО СМ: Главная страница [Электронный ресурс]. URL: <https://npo-sm.ru> (дата обращения: 17.07.2025).

10. Методика оценки результативности системы менеджмента качества организации / Система добровольной сертификации «Военный Регистр». М., 2023. 22 с.

11. ГОСТ РВ 0015-002–2020. Система разработки и постановки продукции на производство. Система менеджмента качества. Общие требования к системам менеджмента качества организаций, выполняющих заказы на поставку продукции для нужд обороны. М.: Стандартиформ, 2020. 27 с.

References

1. Silnikov M.V., Anastasiadi G.P. Mathematical model of decision-making in industrial product quality management // Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. 2014. No 1 (81). Pp. 106–112.
2. Silnikov N.M., Novak O.S., Karanin G.A. Thermomechanical pressing of the «RUSSIL» canvas // Issues of defense technology. Episode 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 7–8 (181–182). Pp. 144–146.
3. Silnikov N.M., Novak O.S., Shifrina V.Yu. Improving the protective characteristics of special products through the use of polymer armor // Issues of defense technology. Episode 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 7–8 (181–182). Pp. 122–128.
4. Kommersant St. Petersburg: launch of UHMWPE production, 2023–2024. URL: https://www.kommersant.ru/doc/6788049?utm_source=chatgpt.com (date of request: 07/17/2025).
5. Sycheva M.E., Merzlyakova I.V., Kopylova E.V. Development of the effectiveness of QMS processes // Advanced materials and technologies. (PMT – 2023): collection of reports of the National Scientific and Technical Conference

with international participation of the Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming of RTU MIREA. 2023. Vol. 2. Pp. 271–275.

6. Savelov G.A., Alyoshin A.I., Kozlov V.A., Kacharava T.N. Strategic management of defense industry enterprises in the context of a reduction in the volume of the state defense order // The Skiff. Questions of student science. 2019. No 11 (39). Pp. 606–615.

7. Khuzhina Yu.O., Metelev D.A. Goal setting of the quality management system of a military-industrial enterprise as the basis of a competitive advantage // Physics. Technologies. Innovations (FTI – 2020): collection of articles of the VII International Youth Scientific Conference. 2020. Pp. 115–121.

8. Baldina A.S. Problems of building and optimizing quality management systems at Russian defense enterprises // Trajectories of technological development. 2022. Vol. 1, No 2 (2). Pp. 51–63.

9. NGO SEE: Home page [Electronic resource]. URL: <https://npo-sm.ru> (date of reference: 07/17/2025).

10. Methodology for evaluating the effectiveness of the organization's quality management system / Voluntary certification system «Military Register». Moscow, 2023. 22 p.

11. GOST RV 0015-002–2020. Product development and commissioning system. The quality management system. General requirements for quality management systems of organizations that fulfill orders for the supply of products for defense needs. Moscow: Standartinform, 2020. 27 p.

УДК 623.535

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_163

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ДУЛЬНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ СТВОЛЬНОГО ОРУЖИЯ И МЕТОДОВ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

THE HISTORY OF MUZZLE GAS-DYNAMIC DEVICES AND METHODS OF THEIR DESIGN

М.А. Кауфман, д-р техн. наук С.В. Медвецкий

M.A. Kaufmann, D.Sc. S.V. Medvetzkiy

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рассмотрена история вопроса отдачи в пороховом оружии и подходов к его решению. Проведен обзор эволюции порохового оружия с момента его появления до настоящего времени. Проанализированы методы компенсации отдачи, применявшиеся для стрелкового и артиллерийского (пушечного) оружия в различные исторические этапы, вплоть до практически повсеместного внедрения дульных тормозов (ДТ) в современности. Рассмотрено возникновение и развитие методов расчета дульных газодинамических устройств (в частности – ДТ), а также обоснована их важность в истории становления порохового оружия и актуальность сегодня.

Ключевые слова: дульный тормоз, дульные газоотводные устройства, конструктивная характеристика, методика расчета, история, отдача.

The history of the issue of recoil in powder weapons and approaches to its solution is considered. An overview of the evolution of powder weapons from the moment of their appearance to the present has been conducted. The methods of recoil compensation used for small arms and artillery (cannon) weapons in various historical stages, up to the almost universal introduction of muzzle brakes in modern times, are analyzed. The article considers the emergence and development of methods for calculating muzzle gas dynamic devices (in particular, DT), and also substantiates their importance in the history of the development of powder weapons and their relevance today.

Keywords: muzzle brake, muzzle exhaust devices, design characteristics, calculation method, history, recoil.

Введение

В настоящее время практически все артиллерийские и стрелковые системы вооружения оснащены дульными газодинамическими устройствами (ДГУ). Это необходимо для обеспечения снижения до безопасных значений параметров отдачи, воздействующей при выстреле, соответственно, на конструкцию

артиллерийской системы или на стрелка. Кроме того, в последние годы в связи с развитием боевой робототехники и установкой на ней стрелковых и артиллерийских систем, важной задачей является адаптация оружия под подвижные носители. Избыточные параметры отдачи здесь вызывают нежелательные вибрационные нагрузки на носитель, ужесточают требования к его ТТХ, что влечет за собой раз-

работку более сложных систем управления и наведения оружия.

Поэтому разработка расчетных методик проектирования ДГУ является актуальной задачей. Однако, как показывает опыт развития техники, создание каких-либо новых систем и методов их расчета их всегда базируется на достигнутом уровне, являющимся высшей точкой исторического развития рассматриваемой области техники. В этой связи представляется полезным рассмотреть исторические аспекты создания ДГУ.

Появление и развитие ДГУ в контексте проблематики отдачи ствольного оружия

Самые первые прототипы ДГУ — дульных тормозов (ДТ) были разработаны еще в 19 веке и предназначались для компенсации отдачи крупнокалиберных пушек. Каких-либо теорий их проектирования в то время не существовало, поэтому их создание происходило опытным путем. Однако, принципиально эти ДТ не отличаются от современных. Они, как следует из названия, устанавливались на дульной части оружия. Основной же целью их использования являлось торможение оружия при отдаче.

Принцип действия ДТ заключался в полезном использовании энергии порохового газа, истекающего из канала ствола после вылета снаряда, что достигалось перенаправлением потока газов с образованием реактивной силы, которая компенсировала отдачу оружия, а в последствии и его откатных частей (рис. 1).

Первая научная публикация по этой тематике была выпущена только в 1923 году во Франции [1]. С этого момента по всему миру начинается активное развитие теорий, описывающих срабатывание дульных тормозов, продолжающих совершенствоваться и по сей день. Предлагается краткое описание истории развития этого научного направления.

В прошлом компенсация отдачи таким путем требовалась не всегда и не всякому пороховому оружию. Безусловно, если речь идет о стрелковом оружии (то есть носимом, в прошлом оно же — «ручная артиллерия»), то потребность в снижении импульса отдачи появилась с появлением этого самого оружия (XIV век). Вот только удовлетворить ее тогда было нечем: технологии машиностроения в то время не позволяли обеспечить ни изготовление настолько сложной конструкции, ни надежное ее закрепле-



Рис. 1. Компенсации отдачи дульным тормозом:

а — схема ДТ; б — внешний вид современного ДГУ; в — выстрел из орудия с ДГУ



Рис. 2. Пищали: а — пищаль (фото), национальный музей Республики Татарстан; б — ручные пищали XIV–XV вв [4, рис. 51]; 1 — канавка; 2 — затравочное отверстие; 3 — усиительное кольцо; 4 — ствол; 5 — железные обручи; 6 — гвоздь; 7 — ложка

ние на дульной части оружия. К тому же, отдача таких ружей (аркебузы, пищали, рис. 2) была не столь сильной, а дульная скорость пули едва доходила до скорости звука (порядка 300 м/с) [2].

Ситуация усложнилась с появлением зерненого пороха. Повышенная скорость горения заряда обеспечила более высокие давления в снарядном пространстве и позволила достичь более высоких дульных скоростей (400–500 м/с для мушкетов [3], рис. 3). Впрочем, по сравнению с современными образцами стрелкового оружия (830–950 м/с для автоматических и снайперских винтовок) это все еще очень небольшие скорости. Однако, даже в то время для обеспечения комфортного восприятия отдачи уже применяются специальные доспехи или кожаные подушки [4]. Вплоть до XX века при использовании стрелкового оружия этого было достаточно.

Тяжелее обстояла ситуация с пушечным оружием. В отличие от стрелковых систем, здесь конструкторы не были ограничены весом изделия, что позволяло значительно повышать дульную энергию снаряда путем прямого увеличения веса порохового заряда. Однако, это несло и негативные последствия: возросшая отдача зачастую сдвигала пушку еще до того, как ядро успевало покинуть канал ствола, что приводило к сбитию наводки. Также, конструкцию приходилось делать более массивной из соображений прочности.

За пушками приходилось насыпать земляные валы. С XIV века в конструкции пушек применяются лафеты [5]: специальные жесткие ложи, вкапываемые в землю и предотвращающие таким образом смещение оружия при выстреле. На какой-то период времени проблема была решена.

Но отрасль продолжала развиваться, и мощности пушек все росли. С появлением в XV веке зерненого пороха отдача возросла настолько, что лафетам перестало хватать конструкцион-

ной прочности и потребовались новые технические решения. Таковых было найдено сразу два, и, фактически, случайно. Пушки того времени изготавливались крайне массивными для сохранения прочности при выстреле, что затрудняло их транспортировку к месту боевых действий. Между тем выяснилось, что пушка — очень эффективное оружие против крепостей средневекового типа [6], которые на тот момент были повсеместно распространены и были слабо подвержены разрушению прочим видам оружия. Логичным решением стала перевозка относительно легких пушек с использованием конных повозок, на которые устанавливались специализированные лафеты [7]. Первоначально, по прибытии на место боевого столкновения пушка сгружалась с повозки и использовалась как обычно. Однако, вскоре выяснилось, что при стрельбе с подвижной платформы отдача уже не оказывает столь мощного воздействия на расчет. Так был открыт физический принцип «растягивания» импульса отдачи: одномоментное пиковое силовое воздействие заменялось на значительно менее мощное, но более протяженное во времени.

Таким образом, пушки стали монтировать на подвижных колесных платформах,двигающихся по прямой до вылета снаряда из канала ствола, а затем возвращаемых в исходное положение тем или иным образом. Впрочем, это техническое решение просуществовало недолго: смещение пушки при выстреле в любом случае негативно сказывалось на точности попадания, а действительно мощные пушки были слишком массивными для колес того времени.

Выяснилось, что, если надежно зафиксировать сам лафет, в который устанавливалась пушка для транспортировки, его деформация приведет к схожему эффекту: импульс отдачи окажется растянут во времени и пиковое усилие снизится. В развитие этих идей лафеты стали устанавливать на салазки, а позже появились и более совершенные технические решения, использующие этот принцип. Он же используется и в современных противоткатных устройствах (ПОУ).

Но к XIX веку стали повсеместно распространены крепости нового типа, значительно более защищенные от пушечного оружия. Это привело к тому, что мощность пушек снова «переросла» имеющиеся технологии [7]. Пока научное сооб-

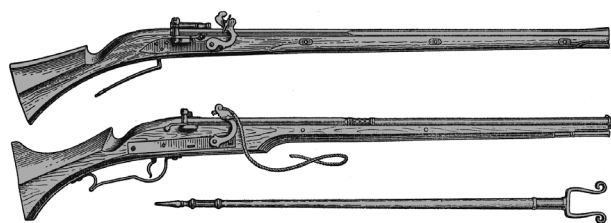


Рис. 3. Европейские фитильные мушкеты XVI–XVII вв [4]

щество занималось поиском более совершенных способов «растягивания» отдачи, впервые был предложен и более оригинальный способ решения этой проблемы: использование истекающих из дульного среза пушки пороховых газов.

В Российской империи дульный тормоз был впервые применен в 1862 году в трехпудровой пушке [8]: фактически, в стволе было просто просверлено 8 наклонных отверстий. Однако, в скором времени были разработаны более эффективные гидравлические ПОУ и ДТ утратили свою актуальность почти на полвека. Тем временем пушечное оружие начало приобретать характерные черты современной артиллерии.

Первая мировая война подстегнула развитие оружейной отрасли во всем мире, а с появлением в конце XIX века бездымных порохов мощность артиллерийских орудий вновь возросла, актуализируя заброшенную концепцию дульных устройств. Для промышленности того времени их изготовление уже не являлось неразрешимой задачей, по крайней мере для артиллерийских калибров. А по окончании войны наконец-то нашлось время и для науки: искать удачные конструктивные решения гораздо проще и дешевле путем расчета, нежели опыта.

Первопроходцем в области расчета эксплуатационных характеристик ДГУ принято считать французского ученого А. Рато (A. Rateau) [9]. В 1923 году в французском журнале «Mémorial de l'artillerie française» он публикует статью [1], где обобщает наиболее актуальные исследования в области расчета внутренней баллистики орудия и предлагает методику определения тянущего усилия, создаваемого ДГУ. В 1928 году его идеи получают развитие в работе итальянского ученого Э. Равелли (E. Ravelli) «О теории дульного тормоза» [10]. Полученная методика получила широкое распространение и с большим интересом рассматривалась учеными со всего мира [9, 11]. В 1932 году Л. Габо (L. Gabeaud) предлагает свой, в некоторых аспектах более совершенный подход к решению этой проблемы [12].

Советское научное сообщество на тот момент только начинало формироваться, обобщая наиболее современные научные концепции и предлагая свои. И, хотя до разработки первой полностью самостоятельной методики расчета ДГУ было еще далеко, в 1939 году М.М. Сергеевым закладываются фундаментальные основы

этого научного направления в СССР. Он переводит на русский язык работы А. Рато, Л. Габо, Е. Равелли, а также нескольких других ученых, и обобщает научное знание того времени в работе [11].

Вторая мировая война не располагала к дальнейшему развитию существующих научных концепций, тем более что для своего времени они показывали вполне удовлетворительную эффективность. Применение ДТ становится повсеместным и фактически обязательным для многих видов оружия. Промышленность наконец-то позволяет производить ДТ и для стрелкового оружия, которое становится нарезным и казнозарядным. Зачастую начинают применяться механизмы автоматики: в 1936 году на вооружение СССР впервые в мире принимается самозарядная винтовка со штатным дульным тормозом конструкции С.Г. Симонова — АВС-36. Примененные в ней концепции развивает Ф. В. Токарев в винтовке СВТ-38 (позднее доработана и переименована в СВТ-40, рис. 4). Дульный тормоз в самозарядном, (а вскоре и в автоматическом, стрелковом оружии оказывается настолько удачным решением, что в дальнейшем им начинают комплектовать все больше и больше образцов (АВТ, ППШ, ППС, ППД...).

В 1950 году М.А. Мамонтов предлагает новую методику расчета ДГУ, формируя принципы революционной концепции термодинамики тела переменной массы [13], которая в дальнейшем найдет применение в огромном спектре задач, связанных с открытыми термодинамическими системами. Саму теорию он окончательно формулирует в 1961 году [14], а в 1953 году выходит фундаментальная работа Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица [15], которая заложила основы для развития вычислительной газодинамики, нашедшей свое применение для широкого спектра



Рис. 4. Советские снайперские винтовки, сверху вниз: АВС-35, СВТ-38, СВТ-40 [4]

прикладных газодинамических задач, включая задачу расчета ДТ.

Б.В. Орлов в 1973 году проводит масштабное обобщение всех существующих на тот момент научных концепций для описания работы и расчетов порохового оружия: как артиллерийского, так и стрелкового. В том числе он формирует свою собственную методику расчета ДГУ [16] и впервые формулирует понятие конструктивной (конструктивно-импульсной) характеристики (КХ) дульного тормоза.

Здесь стоит оговориться, что конструктивная характеристика как параметр фигурировала и в более ранних работах. Однако, Б.В. Орлов впервые предлагает использовать ее для оценки эффективности ДТ, акцентируя внимание на ее независимости от параметров состояния потока — фактически, КХ является функцией только геометрии ДТ. Таким образом она показывает, насколько эффективно ДТ будет выполнять свою функцию вне зависимости от каких бы то ни было эксплуатационных условий. Таким образом становится возможным, например, легко верифицировать методику расчета: насколько точно вычислена характеристика — настолько точна методика. При этом экспериментально определить КХ не составляет никакой сложности.

С развитием вычислительной техники потребность в разработке новых методик расчета ДГУ снижается: методика Орлова пригодна для всех классифицированных в 1973 году конструкций ДГУ, при этом развитие стрелкового и артиллерийского порохового оружия не испытывает никаких революций и, фактически упирается в свой технологический предел. А с использованием газодинамических методов можно рассчитывать на ЭВМ любые ДГУ [17–19].

Сегодня технологический предел для стрелкового оружия значительно сдвинулся относительно 1973 года. Стало возможным производить хоть и, в общем-то, не новые принципиально, но все же значительно более совершенные образцы. В XX веке не было возможности снизить массу крупнокалиберной снайперской винтовки настолько, чтобы встал вопрос о слишком высокой скорости свободной отдачи. Сегодня это — данность. В вооруженных конфликтах все чаще успешно работают, так называемые, тяжелые снайперы, вооруженные крупнокалиберным снайперским оружием, параметры отдачи кото-

рого являются весьма значительными. Поэтому применение более эффективных ДГУ, снижающих параметры отдачи является важной задачей. Однако, бесконечно повышать эффективность ДГУ невозможно — возникающая ударная волна может повредить органы слуха стреляющего, а облако пыли от воздействия истекающих из ДГУ пороховых газов значительно увеличивает демаскирующие действие выстрела. Одним из путей решения этой проблемы может стать применение нестандартных конструкций ДГУ.

Установка же комплексов стрелковых систем (КСС) на роботизированные мобильные платформы — вообще принципиально новый способ их применения, для которого не существует готовых рецептов. Специализированные ДГУ также могут значительно повысить эффективность такой боевой единицы.

Хотя вычислительная газодинамика и является фактически универсальным методом расчета, использовать ее для определения КХ зачастую избыточно. Такой расчет чрезвычайно сложен и долговит в подготовке, а также чувствителен к качеству этой подготовки. При этом точность получаемых результатов как правило тем выше, чем дольше идет расчет, причем требуемое для хотя бы достаточной точности время расчета зачастую слишком велико.

В 2016 году Ю.П. Платонов предлагает расширенную и дополненную с учетом современной специфики, а также научных достижений методику расчета ДГУ [20]. Она основана на методике Б.В. Орлова, но показывает повышенную точность за счет использования продвинутого математического аппарата, который задействует в том числе и результаты, полученные с помощью методов вычислительной газодинамики. К тому же она применима к значительно более широкой номенклатуре устройств и учитывает особенности конструкций, которыми ранее пренебрегали.

В 2021 году китайский ученый Вонг Жень (Wang Zhen) предложил собственные улучшения методики Б.В. Орлова [21], а также провел ее сравнение с численным моделированием в ANSYS Fluent. По итогам сравнения автор заключает, что оба подхода показали схожую эффективность.

Таким образом, хотя расчет ДТ и является достаточно узким и специфическим научным

направлением, но это никак не умаляет его важности. С задачей расчета ДТ напрямую связано появление термодинамики переменной массы, а изыскания в этом направлении проводили многие знаменитые ученые со всего мира. Актуальность этого направления сегодня также не подлежит сомнению.

Выводы

Рассмотрены дульные газодинамические устройства в контексте проблематики отдачи стрелкового и артиллерийского оружия. Проведен краткий исторический обзор этой проблематики с момента появления ствольного оружия как такового, вплоть до современности.

Показаны исторические аспекты развития методик расчета ДГУ и отмечена актуальность данного научного направления сегодня.

Список источников

1. Rateau A., *Theorie des freins de bouche: «Mémorial de l'artillerie française»*. Т. XI, 1932. Fasc. 1. Pp. 5–34.
2. Guilmartin J.F. *The weapons of sixteenth century warfare at sea // Gunpowder and galleys: changing technology and Mediterranean warfare at sea in the sixteenth century*. Rev. ed. United States Naval Institute, 2003. Pp. 295–303.
3. Miller D.P. *Ballistics of 17th Century Muzkets*. Master's thesis. Cranfield University, Cranfield, UK, 2010. Pp. 27–46.
4. Маркевич В.Е. *Ручное огнестрельное оружие*. Изд. 2-е. СПб.: Полигон, 2005. 491 с. С. 28, 31, 396, 397.
5. Самардак В.А. *Артиллерия. История развития*. М.: Милитера, 2020, С. 18.
6. Контамин Ф. *Война в Средние века*; пер. с фр. Ю.П. Малинина, А.Ю. Карачинского, М.Ю. Некрасова; под ред. Ю.П. Малинина. СПб.: Ювента, 2001. 120 с.
7. Хогг Оливер. *История артиллерии. Вооружение. Тактика. Крупнейшие сражения. Начало XIV века – начало XX*. М.: Центрполиграф, 2014. С. 50–51. С. 97.
8. *Основания устройства и конструкция орудий и боеприпасов наземной артиллерии*; под ред. Соколова И.А. М.: Воениздат, 1976. 236 с.

9. Schwager O. *The Muzzle Break: Anti-aircraft Journal (The coast artillery journal)*, United States Coast Artillery Association., 1945. Т. 88. Pp. 32–36.
10. Ravelli E. *Studio per la teoria del freno di bocca: Rivista di Artiglieria e Genio*, 1928.
11. Сергеев М.М. *Теория и расчет дульного тормоза*. М.: Гос. изд-во оборон. пром-сти, 1939. С. 16–61.
12. Gabeaud L. *Sur la theory des freins de tir: «Mémorial de l'artillerie française»*, Т. XI, 1932. fasc. 1. Pp. 35–85.
13. Мамонтов М.А. *Некоторые случаи течения газа по трубам, насадкам и проточным сосудам*. М.: Гос. изд-во оборон. пром-сти, 1951. С. 282–381.
14. Мамонтов М.А. *Вопросы термодинамики тела переменной массы*. М.: Оборонгиз, 1961. 56 с.
15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Механика сплошных сред*. М.: ГТТИ, 1953. 788 с.
16. Орлов Б.В., Топчиев Ю.И., Устинов В.Ф., Алферов В.В. *Проектирование ракетных и ствольных систем: учебник для втузов*. М.: Машиностроение, 1974. С. 188–298.
17. Харлоу Ф. *Численный метод частиц в ячейках для задач гидродинамики // Вычислительные методы в гидродинамике*. М.: Мир, 1967. 460 с.
18. Флетчер К. *Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х томах: Т. 2; пер. с англ.* М.: Мир, 1992. 552 с.
19. Парфенов А.Ю. *Численное моделирование динамики внутрикамерных процессов при срабатывании артиллерийского орудия: диссер. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук*. Пермь: ПНИПУ, 2014. С. 16.
20. Платонов Ю.П. *Термогазодинамика автоматического оружия*. М.: Машиностроение, 2009. 356 с. С. 228–271.
21. Wang Zhen. *Flow Field Simulation and Efficiency Calculation of Muzzle Brake Based on ANSYS Fluent: E3S Web of Conferences*. 2021. No 261. Pp. 2–3.

References

1. Rateau A., *Theorie des freins de bouche: «Mémorial de l'artillerie française»*. Т. XI, 1932. Fasc. 1. Pp. 5–34.

2. Guilmartin J.F., The weapons of sixteenth century warfare at sea // Gunpowder and galleys: changing technology and Mediterranean warfare at sea in the sixteenth century. Rev. ed. United States Naval Institute, 2003. Pp. 295–303.
3. Miller D.P., Ballistics of 17th Century Muzzkets. Master's thesis. Cranfield University, Cranfield, UK, 2010. Pp. 27–46.
4. Markevich V.E., Hand-held firearms. Poligon St. Petersburg, 2005, 491 p. P. 28, 31, 396, 397.
5. Samardak V.A. The history of artillery evolution. Moscow: Militera, 2020. P. 18.
6. Contamine P. War in the Middle Ages; transl. from French by Yu.P. Malinin, A.Y. Karachinsky, M.Y. Nekrasov; ed. by Yu.P. Malinin. St. Petersburg: Juventus, 2001. 120 p.
7. Hogg O. The history of artillery. Weapons. Tactics. Main conflicts. Early XIV – early XX. Moscow: Tsentrpoligraph, 2014. Pp. 50–51, p. 97.
8. Sokolov I. Basics of field artillery and armament design and functionality. Moscow: Voenizdat, 1976. 236 p.
9. Schwager O. The Muzzle Break: Anti-aircraft Journal (The coast artillery journal), United States Coast Artillery Association, 1945, T. 88. Pp. 32–36.
10. Ravelli E. Studio per la teoria del freno di bocca: Rivista di Artiglieria e Genio, 1928.
11. Sergeev M.M. The muzzle break theory and calculation. Moscow: Oborogiz, 1939. Pp 16–61.
12. Gabeaud L. Sur la theory des freins de tir: «Mémorial de l'artillerie française», T XI, 1932. fasc. 1. Pp. 35–85.
13. Mamontov M.A., Some cases of gas flow through pipes, nozzles and flow-through vessels. Moscow: Oborogiz, 1951. Pp. 282–381.
14. Mamontov M.A. Variable mass thermodynamics. Moscow: Oborogiz, 1961. 56 p.
15. Landau L.D., Lifshits M.E. Continuum mechanics. Moscow: GTTI, 1953. 788 p.
16. Orlov B.V., Topcheev Yu.I., Ustinov V.F., Alferov V.V. Design of Rocket and Barrel Systems. Moscow: Mashinostroenie, 1974. Pp. 188–298.
17. Harlow F. Numerical method of particles in cells for problems of hydrodynamics // Computational methods in hydrodynamics. Moscow: Mir, 1967. 460 p.
18. Fletcher C., Computational Techniques for Fluid Dynamics. Vol. 2. Moscow: Mir, 1992. 552 p.
19. Parfenov A.Yu. Numerical simulation of the firing artillery gun intrachamber processes. Candidate of Technical Sciences thesis, PNIPU, Perm', 2014. 16 p.
20. Platonov Yu. P. Thermogas Dynamics of Automatic Weapon. Moscow: Mashinostroenie, 2009. 356 p. Pp. 228–271.
21. Wang Zhen. Flow Field Simulation and Efficiency Calculation of Muzzle Brake Based on ANSYS Fluent: E3S Web of Conferences. 2021. No 261. Pp. 2–3.

УДК 621.792.6

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_170

**ВЛИЯНИЕ РАСТВОРИТЕЛЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ
СОЕДИНЕНИЙ ОСНОВНЫХ МАТЕРИАЛОВ 3D-ПЕЧАТИ**

**EFFECT OF SOLVENTS ON THE MECHANICAL STRENGTH OF JOINTS
OF THE BASIC MATERIALS OF 3D-PRINTING**

Ю.П. Крылов, Л.А. Башта, В.А. Прохоров

Y.P. Krylov, L.A. Bashta, V.A. Prokhorov

НПО Спецматериалов

В статье представлены результаты исследования клеящих свойств растворителей для соединения деталей, изготовленных методом 3D-печати из термопластов PLA, ABS и PETG. Рассмотрены три растворителя: дихлорметан, ацетон и тетрагидрофуран в сравнении с цианоакрилатным клеем. Проведены испытания на прочность шва при растяжении, а также анализ влияния комбинаций материалов и растворителей на механические характеристики соединений. Установлено, что цианоакрилатный клей обеспечивает наиболее прочное соединение, когда среди растворителей лучшие результаты показал дихлорметан. Тетрагидрофуран продемонстрировал наихудшие показатели. Комбинирование разнородных материалов приводит к снижению прочности шва на 15–50 % по сравнению с мономатериальными соединениями. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации процессов проектирования и производства составных изделий.

Ключевые слова: аддитивное производство, 3D-печать, растворители, клеевые соединения, полимеры, механические испытания, прочность.

The article presents the results of a study of the adhesive properties of solvents for joining parts made by 3D printing from thermoplastics PLA, ABS and PETG. Three solvents, dichloromethane, acetone, and tetrahydrofuran, are considered in comparison with cyanoacrylate glue. The tensile strength of the joint was tested, as well as the analysis of the effect of combinations of materials and solvents on the mechanical characteristics of the joints. It was found that cyanoacrylate glue provides the most durable compound when dichloromethane showed the best results among solvents. Tetrahydrofuran showed the worst performance. The combination of dissimilar materials leads to a decrease in the strength of the seam by 15–50 % compared with monomaterial compounds. The results of the research can be used to optimize the processes of designing and manufacturing composite products.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, solvents, adhesives, polymers, mechanical tests, and strength.

Введение

Аддитивное производство (3D-печать), в число которого входит технология послойного

синтеза (Fused Deposition Modeling, FDM), представляет собой инновационный метод изготовления изделий, принципиально отличающийся от традиционных субтрактивных и формообразую-

щих технологий. В ее основе лежит поэтапное наращивание материала слой за слоем на основе цифровой 3D-модели, что обеспечивает принципиально новые возможности в проектировании и производстве изделий со сложной геометрией. В числе очевидных преимуществ аддитивного производства могут быть отмечены следующие:

- минимизация материальных затрат за счет аддитивного принципа формирования изделий;
- возможность реализации сложных геометрических конфигураций, включая внутренние полости и решетчатые структуры;
- сокращение временных затрат на этапе прототипирования и внедрения новых изделий;
- персонализация продукции без существенного увеличения себестоимости;
- оптимизация массогабаритных характеристик изделий при сохранении функциональных параметров.

Несмотря на значительный потенциал, современные аддитивные технологии характеризуются рядом ограничений:

- высокие затраты на материалы в отличие от стандартных технологий;
- малые объемы производства;
- ограниченный выбор используемых материалов.

Эти факторы существенно сужают область экономически целесообразного применения аддитивных технологий в промышленности.

Именно эти ограничения определяют текущую нишу максимальной эффективности аддитивного производства. Наиболее востребована 3D-печать в мелкосерийном производстве, создании сложных деталей и прототипировании, то есть в сферах, где ценность сложности и кастомизации превосходит затраты. При разработке прототипа важно быстро получить функциональный образец для проверки ключевых параметров. Однако традиционные методы часто требуют много времени на доработку и повторные испытания, что замедляет процесс. 3D-печать ускоряет итерации — изменения вносятся оперативно, а новый вариант прототипа изготавливается в кратчайшие сроки, что значительно сокращает общее время разработки [1, 2].

В таких областях, как робототехника, автомоделирование и протезирование, актуальной является задача интеграции разнородных материалов с целью сочетания их функциональных

свойств. Это включает совмещение механической прочности с гибкостью, термостойкости с низкой плотностью, а также электропроводности с диэлектрическими характеристиками. Для решения таких технологических задач возникает необходимость объединения нескольких отдельных объектов в единую конструкцию [3], при этом материалы соединяемых компонентов могут варьироваться в зависимости от эксплуатационных требований. Подобный подход не только уменьшает материальные затраты и сокращает время производства, но и расширяет функциональные возможности изделий. В частности, он позволяет создавать уплотнительные и демпфирующие элементы [4, 5], а также реализовывать изделия со сложной геометрической конфигурацией, тяжело достижимой при использовании несоставных структур.

Для соединения отдельных элементов в единую структуру возможны несколько вариантов, а именно склеивание и растворение. Можно предположить, что при использовании метода растворения обеспечивается более монолитная и прочная структура соединения тем, что подразумевает частичное поверхностное растворение материала с взаимным проникновением полимерных цепей и их последующей рекристаллизацией, что в то же время требует тщательного подбора растворителей и режимов обработки для разных полимерных материалов [6]. В то время как метод склеивания подразумевает под собой то, что прочность шва будет такой же как у материала склеивания.

В данной статье изложены итоги изучения адгезионных свойств растворителей применительно к основным материалам, используемым в аддитивных технологиях. В рамках исследования:

- определены взаиморастворимые пары полимеров;
- проведены испытания образцов на прочность соединительного шва на разрыв;
- проведен сравнительный анализ прочности клеевых швов в зависимости от растворителя (дихлорметан, ацетон, тетрагидрофуран) или клея.

В работе рассмотрены изделия, изготовленные из термопластов PLA (полилактид), ABS (акрилонитрилбутадиенстирол) и PETG (полиэтилентерефталат-гликоль). Изделия были по-

делены на группы согласно склеиваемым материалам, а также по виду растворителя, используемого для склейки. Предварительно выполнены испытания на химическую совместимость растворителей с исследуемыми полимерами, результаты приведены в таблице. В результате сформировано 10 испытуемых групп. Для каждой группы были произведены образцы типа А1, общий вид которых показаны на рис. 1. Вид отдельного элемента образца указан на рис. 2.

Образцы изготавливались на 3D-принтере BambuLab X1 Carbon, обеспечивающем скорость печати до 500 мм/с, температуру сопла до 320 °С, ширину линии от 0,1 до 0,8 мм.

Исследование готовых изделий на прочность клеевого шва выполнялось согласно разработанной программе и методике испытаний «Клеящие свойства растворителей для материалов аддитивных технологий», созданной на основе ГОСТ 11262–2017 [7], 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. Скорость растяжения была равна 3 мм/мин. Нагрузка и удлинение образца измерялись непрерывно.

В ходе исследования были протестированы клеевые соединения на основе трех полимерных материалов: PLA, ABS и PETG, склеенных с использованием трех растворителей: Т (тетрагидрофуран), АС (ацетон) и D (дихлорметан) и клея — G (Цианакрилатный клей). Основной целью работы было определение прочности клеевого шва при растяжении и анализ влияния комбинаций материалов и растворителей на механические характеристики соединений.

Все исследуемые образцы демонстрировали разрушение в зоне клеевого соединения. У каждого из них отсутствовало плато текучести, то есть происходило хрупкое разрушение образцов. Типичный вид графика зависимости усилия от времени, отражающего данное поведение, приведен на рис. 3.

Установлено, что образцы с комбинированными материалами показали меньшую прочность на 15–50 % по сравнению с мономатериальными аналогами. Данные результаты могут быть обусловлены низкой степенью совместимости материалов, недостаточной диффузионной активностью на границе раздела, а также не-

Таблица

Результаты испытаний растворимости материалов

Материал Растворитель	ПАО «Химпром» дихлорметан, ХЧ	ГК «Ясхим» ацетон технический	ООО «Технопайка» тетрагидрофуран
ESun PLA, белый	+	–	+
ESun ABS, черный	+	+	+
FDPlast PETG, серый	+	–	+
+ — химически совместимы; – — химически несовместимы			

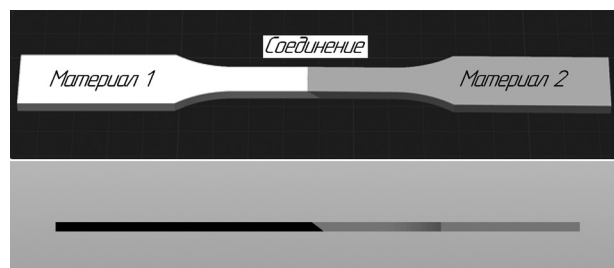


Рис. 1. Пример образца для испытаний

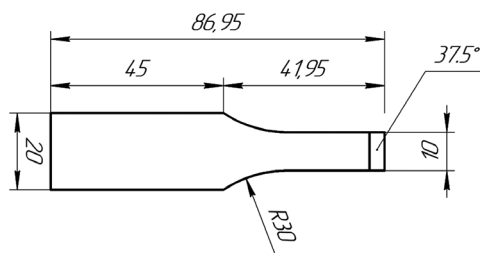


Рис. 2. Вид отдельного элемента испытуемого образца

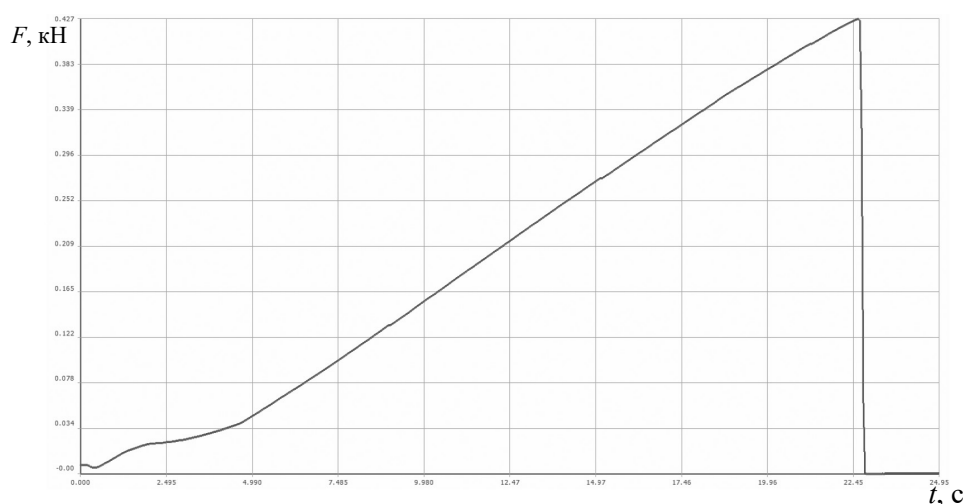


Рис. 3. График зависимости усилия от времени образца ABS-T-ABS

достаточностью объема растворителя в зоне соединения. Результаты исследования прочности на растяжение приведены на рис. 4 и 5. На данных диаграммах не указан PLA-T-PLA из-за того, что образцы ломались при фиксации в испытательной машине, что указывает на чрезмерную хрупкость шва данной испытуемой группы.

Также установлено, что цианоакрилатный клей (G) обеспечил наиболее прочные швы во всех группах, особенно с PLA (29,4 МПа) и PETG (26,43 МПа). Дихлорметан (D) обеспечил наиболее прочные соединения из всех выбранных растворителей. Ацетон (AC) показал хорошие результаты с ABS (19,19 МПа). Тетрагидрофуран (T) продемонстрировал наихудшие показатели прочности клеевого шва:

ABS-T-ABS — 12,99 МПа (на 36 % менее прочный по сравнению с ABS-D-ABS);

PETG-T-PETG — 14,79 МПа (на 20 % менее прочный по сравнению с PETG-D-PETG);

PETG-T-ABS — 11,53 МПа (на 23 % менее прочный по сравнению с PETG-D-ABS);

PLA-T-ABS — 11,21 МПа (на 35 % менее прочный по сравнению с PLA-D-ABS).

Это может быть связано с частичным растворением полимерной матрицы под его воздействием, что приводит к снижению структурной целостности образца, а также с неполным растворением компонентов вследствие интенсивного испарения растворителя, что провоцирует формирование пористой микроструктуры, или недостаточной диффузионности, что приводит к повышению хрупкости адгезионного шва.

При анализе деформационных характеристик было выявлено, что:



Рис. 4. Диаграммы предела прочности опытных образцов

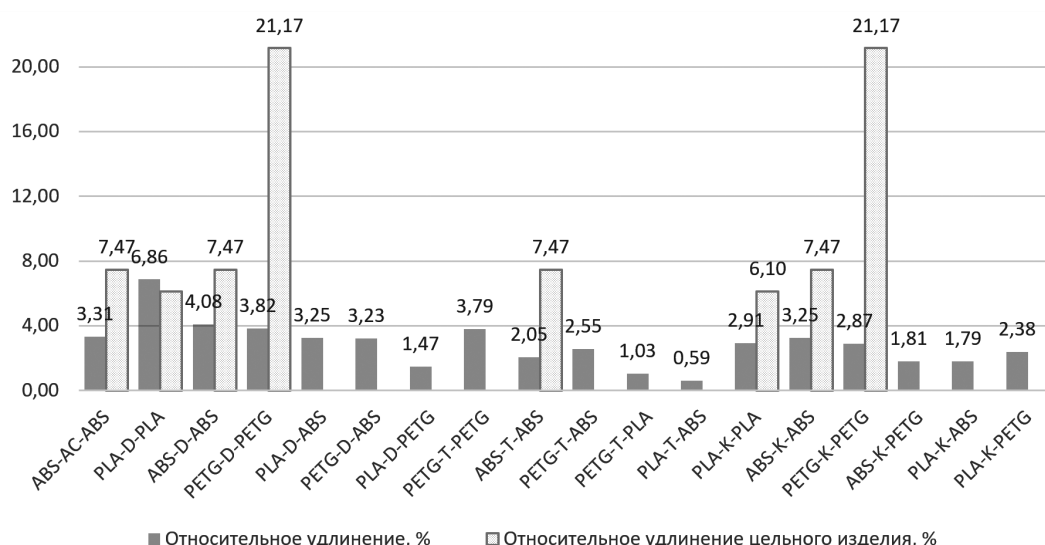


Рис. 5. Диаграммы относительного удлинения опытных образцов при растяжении

– максимальная прочность шва на разрыв оказалась у соединения с использованием цианоакрилатного клея;

– наибольшее удлинение при разрыве отмечено у PLA-D-PLA (6,86 %), что свидетельствует о высокой пластичности соединения;

– комбинированные образцы (PLA-D-PETG, PETG-T-ABS) показали минимальные значения удлинения (0,59–2,55 %), что указывает на хрупкость шва.

Заключение

Результаты испытаний показали, что цианоакрилатный клей обеспечивает наиболее прочное соединение для всех исследованных материалов. Среди растворителей лучшие результаты демонстрирует дихлорметан, тогда как тетрагидрофуран оказался наименее эффективным из-за его разрушающего воздействия на полимеры. Кроме того, комбинирование разнородных материалов (PLA-PETG, PETG-ABS) приводит к значительному снижению прочности по сравнению с соединениями из одного материала.

Эти результаты важны для сложных изделий, где критична долговечность и устойчивость к нагрузкам. При этом следует учитывать влияние возможных погрешностей: отклонения могли возникнуть из-за неидеальных условий склеивания образцов, вариативности свойств материала или человеческого фактора при из-

мерениях. Для повышения точности в дальнейших исследованиях рекомендуется увеличить количество образцов, изменить форму и размеры образца для меньшего влияния разницы в объеме растворителя, провести повторные испытания.

С помощью этих данных можно усовершенствовать производственные процессы, снизить вероятность брака и увеличить надежность готовой продукции. Полученные данные позволят создавать более точные трехмерные и численные модели, что ускорит и повысит точность перехода от прототипа к изделию. Кроме того, это откроет возможность производства конечных продуктов с заданными техническими требованиями к отдельным частям изделия.

Подводя итог, можно сказать, что в ходе данной работы группой сотрудников АО «НПО Спецматериалов» были решены следующие задачи:

– проведено исследование возможности использования растворителей в качестве адгезивного средства для соединения деталей, изготовленных из разнородных материалов, в процессе производства изделий;

– исследованы механические свойства клевого шва различных материалов для 3D-печати, склеенных с помощью различных растворителей, что дает возможность создавать более точные трехмерные и числовые модели, и также быстрее и точнее переходить от прототипа к изделию;

– установлено, что прочность клеевого шва в лучшем случае на 54 % ниже, чем у изделия произведенного целостным;

– установлено, что при изготовлении составных элементов изделия целесообразно использовать однородные материалы, поскольку это обеспечивает повышенную прочность клеевого соединения благодаря усилению диффузионных процессов на границе контакта.

Помимо этого, были также намечены для решения новые исследовательские задачи по данному направлению.

В частности:

– исследование других механических и физических свойств изделий, получаемых при помощи аддитивного производства;

– исследование способов увеличения прочностных характеристик изделий, получаемых при помощи 3D-печати;

– рассмотрение возможности использования гибких (резиновых) материалов для 3D-печати для создания частей БПЛА, например резиновых прокладок или виброгасящих стоек;

– исследование 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. Кулаков К.С., Крылов Ю.П., Тархов Н.Ю. Влияние добавок из стекла и карбона на физико-механические свойства термопластов для 3D-печати // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2025. № 1–2 (199–200). С. 137–143.

3. Прошин А.А., Горячев Н.В., Горячева Е.П., Каракулов Е.С. и др. Области применения 3D-принтеров // Робототехника и системный анализ. Т. 1. 2015. С. 95–105.

4. Клейменов В.В. Технологии и материалы 3D-печати для запасных частей производственного оборудования // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VIII Международной научно-практической конференции, Сара-

тов, 01–30 апреля 2017 года. Саратов: ООО «ЦесАин», 2017. С. 125–128.

5. Торубаров И.С. и др. Развитие технологии 3D-печати с армированием непрерывным волокном // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 8. С. 81–86.

6. Максимкин М.А. Исследование методов обработки поверхностей, изготовленных filamentной 3D-печатью // Альманах современной метрологии. 2019. № 3 (19). С. 72–75.

7. ГОСТ 11262–2017 – Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М.: Стандартиформ, 2018. 20 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. Kulakov K.S., Krylov Yu.P. and Tarkhov N. Yu. The effect of glass and carbon additives on the physical and mechanical properties of thermoplastics for 3D printing // Issues of Defense Technology. Series 16. Technical Means of Countering Terrorism. 2025. No 1–2 (199–200). Pp. 137–143.

3. Proshin A.A., Goriachev N.V., Goriacheva E.P., Karakulov E.S. Application areas of 3D printers // Robotics and Systems Analysis. Vol. 1. 2015. Pp. 95–105.

4. Kleymenov V.V. Technologies and materials of 3D printing for spare parts of production equipment // Actual problems of energy of the agro-industrial complex: materials of the VIII international scientific and practical conference, Saratov, April 01–30, 2017. Saratov: LLC «Tsesain», 2017. Pp. 125–128.

5. Torubarov I.S. et al. Development of 3D printing technology with continuous fiber reinforcement // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2021. No 8. Pp. 81–86.

6. Maksimkin M.A. Research of methods of processing surfaces made by filament 3D-printing // Almanakh sovremennoi metrologii. 2019. No 3 (19). Pp. 72–75.

7. GOST 11262–2017 – Plastics. Tensile testing method. Moskva: Standartinform, 2018. 20 p.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, РАСЧЕТЫ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Ефанов А.С., Иванов С.А., Вершенник Е.В., Стародубцев Ю.И. Методика повышения достоверности оценки параметров электромагнитной обстановки в районе функционирования элементов сети абонентского радиодоступа3

Филиппов Д.Ф. Методы расчета времени реакции артиллерийского выстрела в таре на внешние несанкционированные действия быстрым нагревом 11

Терентьев А.Б., Борисов Н.Н., Ошкин А.А., Филиппов Д.Ф. Модель прогнозирования аварийных ситуаций при хранении артиллерийских боеприпасов в различной таре при внешнем тепловом воздействии.....20

Курков С.Н., Курков Д.С., Моргунов Д.В. Методика оценки эффективности системы поставки материальных средств воинским формированиям в район ведения боевых действий.....28

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ТЕРРОРИЗМУ

Большаков В.Н., Косяков С.И. Деформируемость тросового противотаранного барьера при наезде автомобиля: часть 1. Постановка задачи.....36

Прохоров В.А., Васильева С.Н., Баишта Л.А., Крылов Ю.П. Анализ современных методов обнаружения беспилотных летательных аппаратов.....43

Гусев Н.Н., Мачнев С.А., Эльцфон Д.А. К вопросу о целесообразности использования систем мониторинга для контроля технического состояния строительных конструкций подземных специальных фортификационных сооружений53

Ведерников Ю.В., Дубин М.М., Шкарин А.В., Вайнт Н. Разработка предложений по безопасности водного транспорта на основе рейтингового анализа (на примере акватории Невской губы).....63

Агаев Ф.Г., Гулиев Ф.Ф., Абдуррахманова И.Г. Вопросы оптимизации систем оповещения о лазерной опасности.....72

Шарипов Г.А. Использование алгоритма Кана в задаче применения сил, привлекаемых для ликвидации чрезвычайных ситуаций.....77

ВООРУЖЕНИЕ, ВОЕННАЯ И СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Парфенов М.С., Фукалов В.А., Ткачев Д.Ф. Совершенствование управления множественным доступом к широкополосной сети спутниковой связи на основе итеративной оценки вероятности вещания абонентов87

Толов А.В., Цимберов Д.М., Толов В.В. Анализ проблемных вопросов в области технического обслуживания боевого ручного стрелкового оружия в части применения оружейных масел94

МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНОЛОГИИ И ИССЛЕДОВАНИЯ

Пушкарёв А.М., Абрамычев И.С. К вопросу оценки термоэрозионного износа стволов малокалиберных автоматических пушек107

Цыганков М.М., Шидловский Т.Д., Бойко Ю.М., Мясникова Л.П., Дроботько В.Ф., Терехов С.А., Борзенко А.П., Макмак И.М., Новак О.С. Твердофазная прокатка реакторного порошка сверхвысокомолекулярного полиэтилена с последующим ориентационным упрочнением112

Ершов С.В. Имитационное моделирование дизельного двигателя 12ЧН 15/18, оснащенного гидроприводом агрегата газотурбинного наддува121

Комаров К.М., Дикунов С.А. Перспективная система принятия решений для ускорения восстановления вооружения и военной техники в зоне проведения специальной военной операции130

Бойко А.П. Модель оптимального распределения световых путей в оптических транспортных сетях139

СООБЩЕНИЯ

Пилюгина В.А., Прищенко А.В., Петрова А.В. Проблемы оценки результативности процессов системы менеджмента качества при производстве изделий специального назначения152

Кауфман М.А., Медвецкий С.В. История развития дульных газодинамических устройств ствольного оружия и методов их проектирования163

Крылов Ю.П., Башта Л.А., Прохоров В.А. Влияние растворителей на механическую прочность соединений основных материалов 3D-печати170

СПИСОК АВТОРОВ СТАТЕЙ

Абдуррахманова Ирада Гамид гызы, ведущий научный сотрудник, НИИ Аэрокосмической информатики космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства (г. Баку). E-mail: irada.abdurrahmanova@mail.ru

Абрамычев Иван Сергеевич, адъютант, Пермский военный институт войск национальной гвардии РФ. E-mail: abramychev.is@yandex.ru

Агаев Фахраддин Гюльали оглы, директор Института космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства (г. Баку). E-mail: direktor.tekti@mail.ru

Башта Ларион Андреевич, специалист, НИИ СМ АО «НПО Специальных материалов». E-mail: bashta@npo-sm.ru

Безкоровайный Алексей Андреевич, офицер дежурной смены отдела обработки информации 7 центра защиты информации 88 Главного центра Минобороны России. Тел.: +7 (937) 557-1018.

Бойко Алексей Павлович, канд. техн. наук, доцент кафедры, Военная академия связи им. С.М. Буденного. E-mail: varenyxa89@gmail.com

Бойко Юрий Михайлович, ведущий научный сотрудник лаборатории Физики прочности, Физико-Технический Институт им. А.Ф. Иоффе. E-mail: yuri.boiko@mail.ioffe.ru

Большаков Василий Николаевич, начальник группы, 12 ГУ Минобороны России. E-mail: bovaniko@yandex.ru

Борзенко Александр Петрович, младший научный сотрудник отдела фазовых превращений ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина». E-mail: marina.1010@mail.ru

Борисов Николай Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры, Филиал ВА МТО им. А.В. Хрулева в г. Пенза. E-mail: nikolaew14@mail.ru

Вайнт Никита, лаборант, Бизнес-инкубатор «Бюро интеллектуального сервиса». E-mail: nikitavaint@yandex.kz

Васильева Светлана Николаевна, научный сотрудник, НИИ СМ АО «НПО Специальных материалов». E-mail: VasilyevaSn@npo-sm.ru

Ведерников Юрий Вадимович, профессор, преподаватель, Центр подготовки специалистов топ-уровня в сфере информационных технологий. E-mail: vedernikov.yura@yandex.ru

Вершенник Елена Валерьевна, канд. техн. наук, Военная академия связи им. С.М. Буденного. E-mail: t_o_x_@list.ru

Гулиев Фалах Фахраддин оглы, канд. техн. наук, докторант Национального аэрокосмического агентства (г. Баку). E-mail: FalahGuliyev@mail.ru

Гусев Николай Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. E-mail: goussev_nn@mail.ru

Дикунцов Сергей Александрович, канд. соц. наук, доцент кафедры, Филиал ВА МТО им. А.В. Хрулева в г. Вольск. E-mail: komarov.k89@bk.ru

Дроботко Валерий Федорович, канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий отделом фазовых превращений ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина». E-mail: valeriy.drobotko@mail.ru

Дубин Марат Мухаметханович, доцент, преподаватель, Центр подготовки специалистов топ-уровня в сфере информационных технологий. E-mail: marat965@yandex.ru

Ершов Сергей Викторович, адъютант кафедры, Филиал ВА МТО им. А.В. Хрулева в г. Омск. E-mail: chvay.ru

Ефанов Антон Сергеевич, Военная академия связи им. С.М. Буденного. E-mail: t_o_x_@list.ru

Иванов Сергей Александрович, д-р техн. наук, Военная академия связи им. С.М. Буденного. E-mail: t_o_x_@list.ru

Кауфман Михаил Александрович, аспирант кафедры, МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mihael.kaufmann@gmail.com

Комаров Константин Михайлович, канд. техн. наук, преподаватель кафедры, Филиал ВА МТО им. А.В. Хрулева в г. Вольск. E-mail: komarov.k89@bk.ru

Косяков Сергей Иванович, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, 12 ЦНИИ Минобороны России. E-mail: ksi1972.02@mail.ru

Крылов Юрий Павлович, старший специалист, НИИ СМ АО «НПО Специальных материалов». E-mail: yuri.krylov@npo-sm.ru

Курков Дмитрий Сергеевич, д-р техн. наук, профессор кафедры, Пензенский государственный университет. E-mail: hammer22@bk.ru

Курков Сергей Николаевич, д-р техн. наук, профессор кафедры, Филиал ВА МТО им. А.В. Хрулева в г. Пенза. E-mail: doc.kurkov@mail.ru

Макмак Иван Михайлович, канд. физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник отдела фазовых превращений ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина». E-mail: ally.makmak66@mail.ru

Мачнев Сергей Александрович, канд. техн. наук, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. E-mail: machnevs@rambler.ru

Медвецкий Сергей Владимирович, д-р техн. наук, профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: medvetkiy@bmstu.ru

Моргунов Дмитрий Валерьевич, адъютант, Филиал ВА МТО им. А.В. Хрулева в г. Вольск. E-mail: morgani52@mail.ru

Мясникова Любовь Петровна, ведущий научный сотрудник лаборатории Физики прочности, Физико-Технический Институт им. А.Ф. Иоффе. E-mail: Liuba.Myasnikova@mail.ioffe.ru

Новак Ольга Сергеевна, заместитель директора ЗСМ по развитию производства АО «НПО Спецматериалов». E-mail: o.novak@npo-sm.ru

Ошкин Александр Александрович, докторант кафедры, Филиал ВА МТО им. А.В. Хрулева в г. Пенза. Тел.: +7 (962) 473-2470.

Парфенов Михаил Сергеевич, адъютант, Военная академия связи им. С.М. Буденного. E-mail: mikhael.parfenov.88.88@bk.ru

Петрова Наталия Евгеньевна, заместитель начальника службы стандартизации и качества АО «НПО Специальных материалов». E-mail: PetrovaNE@npo-sm.ru

Пилюгина Виктория Александровна, Инженер службы стандартизации и качества АО «НПО Специальных материалов». E-mail: vikapediya@gmail.com

Прищенко Алина Владимировна, заместитель директора по качеству ЗСМ АО «НПО Специальных материалов». E-mail: a.prishchenko@npo-sm.ru

Прохоров Виталий Андреевич, инженер НИИ СМ АО «НПО Специальных материалов». E-mail: prohorov@npo-sm.ru

Пушкарёв Александр Михайлович, канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры, Пермский военный институт войск Нацгвардии РФ. E-mail: alex.pushkarev2018@yandex.ru

Стародубцев Юрий Иванович, д-р воен. наук, Военная академия связи им. С.М. Буденного. E-mail: t_o_x_@list.ru

Терентьев Андрей Борисович, д-р техн. наук, профессор кафедры, Филиал ВА МТО им. А.В. Хрулева в г. Пенза. E-mail: terab55@list.ru

Терехов Сергей Александрович, младший научный сотрудник отдела фазовых превращений ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина». E-mail: terehov030181@xmail.ru

Толов Антон Владимирович, офицер отделения научных исследований центра научно-технических исследований Главного центра научных исследований Федеральной службы войск национальной гвардии РФ. E-mail: anton.tolov@mail.ru

Толов Вячеслав Владимирович, слушатель ВА МТО им. А.В. Хрулева. E-mail: mister.tolov@gmail.com

Филиппов Дмитрий Федорович, преподаватель кафедры, Филиал ВА МТО им. А.В. Хрулева в г. Пенза. E-mail: filippov.dima@mail.ru

Фукалов Владислав Александрович, старший оператор роты (научной), Военная академия связи им. С.М. Буденного. E-mail: vladfukalov@ya.ru

Цимберов Дмитрий Михайлович, доцент кафедры, ФГАОУВО «Московский политехнический университет». E-mail: katana647@yandex.ru

Цыганков Матвей Максимович, инженер лаборатории Физики прочности, Физико-Технический Институт им. А.Ф. Иоффе. E-mail: m.czygankov@bk.ru

Шарипов Габит Аубакирович, канд. техн. наук, доцент, адъютант, НИИ ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России». E-mail: agz.sharipov@mail.ru

Шидловский Тимофей Денисович, инженер лаборатории Физики прочности, Физико-Технический Институт им. А.Ф. Иоффе. E-mail: timofeysh15@gmail.com

Шкарин Андрей Владимирович, техник, ФГБВОУВО «СПбГМТУ», КБ «Проектирование надводных и подводных аппаратов». E-mail: andrejhh12@gmail.com

Эльцофон Денис Александрович, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. E-mail: deneltsofon@yandex.ru

LIST OF AUTHORS OF ARTICLES

Abdurakhmanova Irada Gamid gyzy, Leading Researcher in Nacional'noe ae'rokosmicheskoe agentstvo (Baku). E-mail: irada.abduraxmanova@mail.ru

Abramychev Ivan Sergeevich, Associate Professor in Permskij voenny'j institut vojsk nacional'noj gvardii RF. E-mail: abramychev.is@yandex.ru

Agaev Fakhraddin Giulali ogly, Director in Nacional'noe ae'rokosmicheskoe agentstvo (Baku). E-mail: direktor.tekti@mail.ru

Bashta Larion Andreevich, specialist in NII SM, AO «NPO Speczmaterialov». E-mail: bashta@npo-sm.ru

Bezkorovainyi Aleksei Andreevich, officer on duty shift in Glavnyi centr Minoborony' Rossii. Ph.: +7 (937) 557-1018.

Boiko Aleksei Pavlovich, Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department, in Voennaya akademiya svyazi im. S.M. Budennogo. E-mail: varenysa89@gmail.com

Boiko Iurii Mikhailovich, leading researcher in Fiziko-Tekhnicheskij Institut im. A.F. Ioffe. E-mail: yuri.boiko@mail.ioffe.ru

Bolshakov Vasilii Nikolaevich, head of the group in 12 GU Minoborony' Rossii. E-mail: bovaniko@yandex.ru

Borisov Nikolai Nikolaevich, Candidate of Sciences, associate professor of the Department in Filial Voennoj akademii material'no tekhnicheskogo obespecheniya im. A.V. Xruleva in Penza. E-mail: nikolaew14@mail.ru

Borzenko Aleksandr Petrovich, Junior researcher in FGBNU «Donezskij fiziko-tekhnicheskij institut im. A.A. Galkina». E-mail: marina.1010@mail.ru

Dikunov Sergei Aleksandrovich, Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department, in Filial Voennoj akademii material'no tekhnicheskogo obespecheniya im. A.V. Xruleva in Vol'sk. E-mail: komarov.k89@bk.ru

Drobotko Valerii Fedorovich, Candidate of Sciences, docent, Head of the Department in Donezskij fiziko-tekhnicheskij institut im. A.A. Galkina. E-mail: valeriy.drobotko@mail.ru

Dubin Marat Mukhametkhanovich, docent, teacher in Centr podgotovki specialistov top-urovnya v sfere informacionny'x tehnologij. E-mail: marat965@yandex.ru

Efanov Anton Sergeevich, Voennaya akademiya svyazi im. S.M. Budennogo. E-mail: t_o_x_@list.ru

Eltsofon Denis Aleksandrovich, in Voennokosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhajskogo. E-mail: deneltsofon@yandex.ru

Ershov Sergei Viktorovich, associate professor of the Department, in Filial Voennoj akademii material'no tekhnicheskogo obespecheniya im. A.V. Xruleva in Omsk. E-mail: chvay.ru

Filippov Dmitrii Fedorovich, lecturer of the department in Filial Voennoj akademii material'no tekhnicheskogo obespecheniya im. A.V. Xruleva in Penza. E-mail: filippov.dima@mail.ru

Fukalov Vladislav Aleksandrovich, senior operator in Voennaya akademiya svyazi im. S.M. Budennogo. E-mail: vladfukalov@ya.ru

Guliev Falakh Fakhraddin ogly, Candidate of Sciences, in Nacional'noe ae'rokosmicheskoe agentstvo (Baku). E-mail: FalahGuliyev@mail.ru

Gusev Nikolai Nikolaevich, Doctor of Sciences, Professor, in Voennokosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhajskogo. E-mail: goussev_nn@mail.ru

Ivanov Sergei Aleksandrovich, Doctor of Sciences, Voennaya akademiya svyazi im. S.M. Budennogo. E-mail: t_o_x_@list.ru

Kaufman Mikhail Aleksandrovich, postgraduate student of the department in MGTU im. N.E' Bauman. E-mail: mihail.kaufmann@gmail.com

Komarov Konstantin Mikhailovich, Candidate of Sciences, lecturer of the Department, in Filial Voennoj akademii material'no tekhnicheskogo obespecheniya im. A.V. Xruleva in Vol'sk. E-mail: komarov.k89@bk.ru

Kosiakov Sergei Ivanovich, Candidate of Sciences, docent, leading researcher in 12 CzNII Minoborony' Rossii. E-mail: ksi1972.02@mail.ru

Krylov Iurii Pavlovich, senior specialist in NII SM, AO «NPO Speczmaterialov». E-mail: yuri.krylov@npo-sm.ru

Kurkov Dmitrii Sergeevich, Doctor of Sciences, Professor of the Department in Penzenskij gosudarstvenny'j universitet. E-mail: hammer22@bk.ru

Kurkov Sergei Nikolaevich, Doctor of Sciences, professor of the Department in Filial Voennoj akademii material'no tekhnicheskogo obespecheniya im. A.V. Xruleva in Penza. E-mail: doc.kurkov@mail.ru

Machnev Sergei Aleksandrovich, Candidate of Sciences, in Voenno-kosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhajskogo. E-mail: machnevs@rambler.ru

Makmak Ivan Mikhailovich, Candidate of Sciences, docent, Senior Researcher in FGBNU «Doneczkij fiziko-tekhnicheskij institut im. A.A. Galkina». E-mail: ally.makmak66@mail.ru

Medvetskii Sergei Vladimirovich, Doctor of Sciences, Professor, in MGTU im. N.E. Bauman. E-mail: medvetskiy@bmstu.ru

Miasnikova Liubov Petrovna, leading Researcher in Fiziko-Tekhnicheskij Institut im. A.F. Ioffe. E-mail: Liuba.Miasnikova@mail.ioffe.ru

Morgunov Dmitrii Valerevich, associate professor in Filial Voennoj akademii material'no tekhnicheskogo obespecheniya im. A.V. Xruleva in Vol'sk. E-mail: morgun152@mail.ru

Novak Olga Sergeevna, Deputy Director in «NPO Speczmaterialov». E-mail: o.novak@npo-sm.ru

Oshkin Aleksandr Aleksandrovich, doctoral student of the Department in Filial Voennoj akademii material'no tekhnicheskogo obespecheniya im. A.V. Xruleva in Penza. Ph.: +7 (962) 473-2470.

Parfenov Mikhail Sergeevich, Associate professor in Voennaya akademiya svyazi im. S.M. Budennogo. E-mail: mikhael.parfenov.88.88@bk.ru

Petrova Nataliia Evgenevna, Deputy Chief in «NPO Special'ny'x materialov». E-mail: PetrovaNE@npo-sm.ru

Piliugina Viktoriia Aleksandrovna, Engineer in «NPO Special'ny'x materialov». E-mail: vikapediya@gmail.com

Prishchenko Alina Vladimirovna, Deputy Director in ZSM, «NPO Special'ny'x materialov». E-mail: a.prishchenko@npo-sm.ru

Prokhorov Vitalii Andreevich, engineer in NII SM, «NPO Speczmaterialov». E-mail: prohorov@npo-sm.ru

Pushkarev Aleksandr Mikhailovich, Candidate of Sciences, Professor, Professor of the Department in Permskij voennyj institut vojsk nacional'noj gvardii RF. E-mail: alex.pushkarev2018@yandex.ru

Sharipov Gabit Aubakirovich, Candidate of

Sciences, docent, Associate Professor in FGBVOU VO «Akademiya grazhdanskoj zashhity' MChS Rossii». E-mail: agz.sharipov@mail.ru

Shidlovskii Timofei Denisovich, engineer in Fiziko-Tekhnicheskij Institut im. A.F. Ioffe. E-mail: timofeysh15@gmail.com

Shkarin Andrei Vladimirovich, technician in KB Proektirovanie nadvodny'x i podvodny'x apparatov. E-mail: andrejhh12@gmail.com

Starodubtsev Iurii Ivanovich, Doctor of Sciences, Voennaya akademiya svyazi im. S.M. Budennogo. E-mail: t_o_x_@list.ru

Terekhov Sergei Aleksandrovich, Junior Researcher in FGBNU «Doneczkij fiziko-tekhnicheskij institut im. A.A. Galkina». E-mail: terekhov030181@xmail.ru

Terentev Andrei Borisovich, Doctor of Sciences, professor of the department in Filial Voennoj akademii material'no tekhnicheskogo obespecheniya im. A.V. Xruleva in Penza. E-mail: terab55@list.ru

Tolov Anton Vladimirovich, officer in Glavnyi centr nauchny'x issledovanij Federal'noj sluzhby' vojsk nacional'noj gvardii RF. E-mail: anton.tolov@mail.ru

Tolov Viacheslav Vladimirovich, student in Voennaya akademiya material'no-tekhnicheskogo obespecheniya im. A.V. Xruleva. E-mail: mister.tolov@gmail.com

Tsimberov Dmitrii Mikhailovich, Associate Professor of the Department in Moskovskij politexnicheskij universitet. E-mail: katana647@yandex.ru

Tsygankov Matvei Maksimovich, engineer in Fiziko-Tekhnicheskij Institut im. A.F. Ioffe. E-mail: m.czygankov@bk.ru

Vaint Nikita, laboratory assistant in Biznes-inkubator «Byuro intellektual'nogo servisa». E-mail: nikitavaint@yandex.kz

Vasileva Svetlana Nikolaevna, researcher in NII SM, «NPO Speczmaterialov». E-mail: VasilevaSn@npo-sm.ru

Vedernikov Iurii Vadimovich, Professor, teacher in Centr podgotovki specialistov top-urovnya v sfere informacionny'x tehnologij. E-mail: vedernikov.yura@yandex.ru

Vershennik Elena Valerevna, Candidate of Sciences, Voennaya akademiya svyazi im. S.M. Budennogo. E-mail: t_o_x_@list.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, расчет, 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 подчёркивания. 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 полутонных (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 подрисуночной 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@np0-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 2026 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 40702810132000018688	БИК 044030786	К/счет 301018106000000000786
Филиал «Санкт-Петербургский» АО «Альфа-Банк»		
ИНН 7806125671	ОКПО 31041642	КПП 780201001

СЧЕТ № *

Дата: «_____» _____ 2026 г.

Предмет счета	Кол-во комплектов	Цена одного комплекта (руб.)	Сумма (руб.)
Подписка на журнал «ВОТ. Серия 16» На 2026 год – 6 сдвоенных номеров (январь–декабрь)		6818-18	
НДС 10%		681,82	
Итого с учетом НДС		7500,00	

Всего к оплате (в т.ч. НДС): семь тысяч пятьсот рублей 00 копеек

****Счет на подписку будет выставлен после подачи заявки на эл. почту:
commerce@npo-sm.ru***

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

Редакция вправе сокращать и литературно обрабатывать принятые к публикации тексты.

Редакция может публиковать материалы, не разделяя точку зрения авторов.

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.

Присылая материалы в редакцию, вы даете согласие на обработку персональных данных.

Если в статье есть соавторы, вы подтверждаете, что предоставляете их персональные данные с их согласия. С полной «Политикой обработки персональных данных» можно ознакомиться на сайте:

<https://vot16.ru/>

Запросы по материалам выпуска направлять в редакцию журнала по адресу:

АО «НПО Спецматериалов», 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

Адрес сайта: <http://www.vot16.ru>

Вопросы оборонной техники. Серия 16.

Технические средства противодействия терроризму. 2025. Вып. 11–12 (209–210)

Компьютерная верстка — М.А. Лаурман

Корректор — А.С. Алешин

Подписано в печать 11.12.2025

Дата выхода издания 26.12.2025

Формат 60х90 1/8. Печать цифровая.

Усл. печ. л.

Тираж 600 экз. Заказ №

Отпечатано в типографии «АСТЕР Петербург».

ООО «Первый издательско-полиграфический холдинг»,

Санкт-Петербург, Б. Сампсониевский пр., 60, лит. «У».

Тел.: (812) 603 25 25.

Цена свободная.