

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 (197–198)**



**Москва • 2024**

Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. — М.: ВНИИ «Центр». — СПб.: АО «НПО Спецматериалов». — СПб.: Любавич. 2024. Вып. 11–12 (197–198).

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

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

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

Сайт [vak.ed.gov.ru](http://vak.ed.gov.ru) раздел — «Нормативно-справочная информация»,  
подраздел — «Перечень рецензируемых научных изданий»

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

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

**Редакционный совет:**

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

**Editorial board:**

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

**Редакционная коллегия:**

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

**Editorial assembly:**

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

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

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

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

© ВНИИ «Центр», 2024  
© АО «НПО Спецматериалов», 2024

УДК 334.021

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_3

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМА ВНУТРЕННИХ РЕСУРСОВ  
ОРГАНИЗАЦИИ ТРЕБУЕМЫХ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫПУСКА  
ТОПОГРАФО-ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ И КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ  
В УСЛОВИЯХ РИСКА**

**METHODOLOGY FOR DETERMINING THE VOLUME  
OF INTERNAL RESOURCES OF AN ORGANIZATION  
REQUIRED TO ENSURE THE PRODUCTION OF TOPOGRAPHIC, GEODETIC  
AND CARTOGRAPHIC PRODUCTS IN CONDITIONS OF RISK**

*Д-р экон. наук Д.М. Петров<sup>1</sup>, д-р техн. наук А.Н. Бирюков<sup>2</sup>, канд. техн. наук А.В. Гаврилов<sup>1</sup>,  
канд. воен. наук С.С. Петлик<sup>1</sup>*

*D.Sc. D.M. Petrov, D.Sc. A.N. Biryukov, Ph.D. A.V. Gavrilov, Ph.D. S.S. Petlik*

*<sup>1</sup>Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,*

*<sup>2</sup>Военный институт (инженерно-технический)*

*Военной академии материально-технического обеспечения им. А.В. Хрулева*

Рассматривается выбор стратегии разрешения проблемных ситуаций, возникающих при создании топографо-геодезической и картографической продукции в ходе выполнения государственного оборонного заказа предприятиями отрасли геодезии и картографии в условиях наличия различных факторов риска. Требуемым объемом дополнительных средств является резерв, необходимый для выполнения задания по созданию топографо-геодезической и картографической продукции оборонного значения в рамках государственного оборонного заказа, формируемый на основе планового отвлечения средств из производственного потребления (внешний резерв) и рационального использования внутренних ресурсов на протяжении жизненного цикла производства топографо-геодезической и картографической продукции оборонного значения.

**Ключевые слова:** управление, риски, предприятие, топографо-геодезическая и картографическая продукция, производство.

The article considers the choice of a strategy for resolving problematic situations that arise when creating topographic and geodetic and cartographic products during the implementation of the state defense order by enterprises in the field of geodesy and cartography in the presence of various risk factors. The required amount of additional funds is the reserve required to complete the task of creating topographic-geodetic and cartographic products of defense significance within the framework of the state defense order, formed on the basis of planned diversion of funds from production consumption (external reserve) and rational use of internal resources throughout the life cycle of production of topographic-geodetic and cartographic products of defense significance.

**Keywords:** risks, factors, enterprise, geodesy, cartography, production.

## Введение

Топографо-геодезическая и картографическая продукция (ТГиК), создаваемая в интересах обеспечения обороны государства, поставляется в рамках государственного оборонного заказа (ГОЗ). Основным поставщиком данной продукции являются предприятия отрасли геодезии и картографии [3].

При выполнении программ разработки и производства ТГиК продукции предприятиями отрасли геодезии и картографии (ОГиК) в ходе исполнения ГОЗ, в результате наличия различных факторов риска, возможно возникновение различных отклонений. Как правило, это три вида отклонений технико-экономических показателей отдельных этапов жизненного цикла (ЖЦ) образцов ТГиК продукции от плановых, соответствующих государственному контракту. К ним можно отнести временные, стоимостные, количественно-качественные [1, 2].

Основной особенностью изготовления ТГиК продукции по ГОЗ является сложность определения ЖЦ ее создания, вследствие неопределенности состояния исходных данных необходимых для создания ТГиК продукции.

## Основная часть

Данные виды отклонений являются проблемными ситуациями. Для принятия решения по выбору стратегии их разрешения предварительно необходимо определить потребный объем дополнительных средств, который следует использовать с целью устранения возникших отклонений и разрешения проблемной ситуа-

ции. Заметим, что при отклонении стоимости выполняемой работы от плановых показателей, запрашиваемый объем дополнительных средств известен. В данном случае Заказчику целесообразно осуществлять проверку возникающих отклонений: является ли их появление результатом объективных (неточность первоначальных расчетов, изменение общеэкономических условий и т.д.) или субъективных причин (в процессе выполнения работы средства использовались не по назначению, фактические затраты завышены, необоснованно отнесены на себестоимость продукции различного вида расходы и т.д.). С этой целью Заказчик может провести проверку финансово-экономической деятельности предприятия, а по ее результатам принять соответствующее решение.

Поясним идею выделения дополнительных средств на основе схематического представления векторов заказа, определенного ГОЗ, и фактического хода его реализации в трехмерном пространстве (рис. 1): результат  $P$  как совокупность тактико-технических и количественных характеристик единицы продукции, стоимость  $C$ , время  $T$ .

Положение заданного планом вектора  $P_{ГОЗ}$  определяет не только результат и стоимость, но и требуемую «фондоотдачу», то есть получение результата с единицы авансированных средств  $C$ , определяемую значением тангенса угла  $\varphi$ . В процессе выполнения задания плановое значение может не подтвердиться, и тогда за установленную величину ресурсов будет получен меньший (на величину  $dP$ ) результат, либо достижение заданного результата потребует больших ресурсов на величину  $dC$ . Аналогичные рассуждения

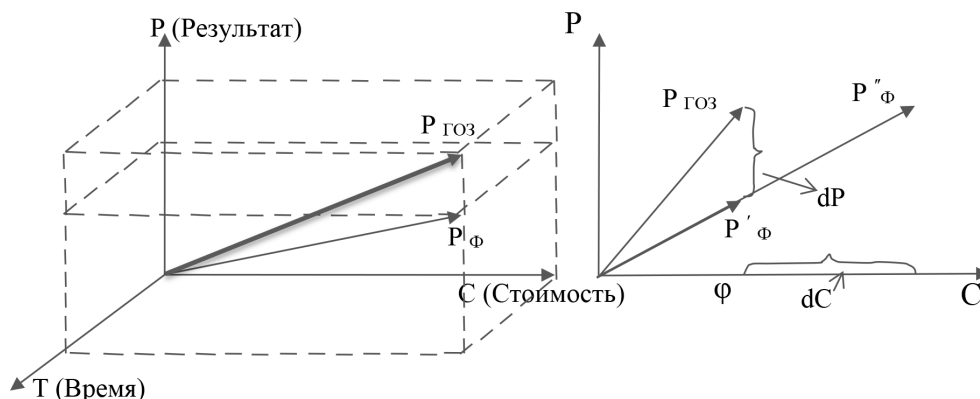


Рис. 1. Векторное представление системы исполнения ГОЗ по созданию ТГиК продукции предприятия ОГиК

также будут справедливы, если рассматривать проекцию векторов на плоскость в координатах стоимость  $C$  — время  $T$ , результат  $P$  — время  $T$ . Таким образом, в процессе реализации плана выпуска ТГиК продукции при возникновении отклонений от плана необходимо выделение дополнительных ресурсов для их устранения.

### **Структура механизма разрешения ситуационных рисков**

В условиях утвержденного бюджета единственным источником средств для разрешения проблемных ситуаций является резерв выполнения плана, формируемый на основе планового отвлечения средств из производственного потребления (внешний резерв) и на основе внутренних ресурсов жизненного цикла образца ТГиК продукции, включенных в план (внутренний резерв) [1, 2]. Наличие указанных резервов, зависит от порядка их образования и от порядка их применения. Применение внешнего резерва зависит от определения необходимого дополнительного объема средств на устранение возникших отклонений без изменения объема финансирования по остальным работам плана, а применение внутренних резервов — это обоснованный маневр средств для решения других задач. Все это определяет порядок проведения уточненного объема работ по частным задачам и планового задания в целом.

При разрешении проблемной ситуации с использованием внутреннего резерва определяются ЖЦ ТГиК продукции, обладающие внутренним резервом, по которым производится корректировка выделяемых финансовых средств, временных, вероятностных показателей, объемов выполняемых работ, рангов важности и т.д. Для этого используются следующие схемы корректировки [4, 5]:

- с учетом приоритета работы;
- с учетом принадлежности к группам задания для выполнения конкретной работы;
- с учетом пропорциональности уменьшения финансовых средств по всем работам, имеющим внутренние ресурсы и др.

Множество допустимых вариантов использования внутреннего резерва составляют варианты перераспределения средств между работами плана, удовлетворяющие ограничениям на время вы-

полнения всей совокупности работ плана, уровни решения задач и др. Рациональным можно считать вариант перераспределения средств, обеспечивающий предотвращение ущерба или его минимизацию, в результате учета факторов риска возникающих в процессе выпуска ТГиК продукции. При недостаточном количестве внутренних резервов для решения поставленной задачи, с заранее определенными целями и задачами, их решение может быть представлено как:

- комплексирование внутренних и внешних резервов;
- снижение финансирования по работам (контрактам) с сохранением работ, определенных планом;
- снижение финансирования с учетом расстановки весов для выполняемых работ (контрактов);
- снижение финансирования по проектам (районам работ), объединенных целевым приказом выполнения общей задачи (охватом территории);
- перераспределение временных интервалов выполнения работ.

Приведенные положения позволяют сделать вывод о том, что в состав научно-методического аппарата разрешения проблемных ситуаций, в процессе реализации целевых программ и планов выпуска ТГиК продукции должен входить методический аппарат определения требуемого объема резерва ресурсов, обеспечивающих компенсацию факторов неопределенности оценки внутренних резервов плана определения требуемого объема дополнительных средств, обеспечивающих устранение временных и количественно-качественных отклонений рационального перераспределения средств между работами плана, на основе внутреннего резерва.

### **Оценка потребного объема резервов для компенсации факторов риска**

Для определения требуемого объема резерва ресурсов, обеспечивающих компенсацию факторов неопределенности и разрешения возможных проблемных ситуаций, используем зависимость вероятности выполнения плана от объема выделенных финансовых ресурсов.

Данную вероятность для всего предлагаемого состава работ и с учетом погрешности

определения затрат  $\delta C_\Sigma$  и погрешностей принятых допущений  $\delta O_T$ , таких как снижение финансирования, можно определить исходя из закона распределения случайной величины  $\Delta = C_\Sigma - O_T$ . Поскольку случайные величины требуемых на выполнение всех планируемых проектов  $C_\Sigma$  и выделяемых в плановый период  $T$  объемов  $O_T$  ассигнований являются независимыми и распределены по нормальному закону, то их композиция будет также распределена нормально  $N$ , то есть:

$$\Delta = MC_\Sigma - MO_T;$$

$$\delta C_\Sigma = \sqrt{\delta^2 C_\Sigma + \delta^2 O_T},$$

а вероятность интересующего события можно найти из выражения:

$$P(\Delta \leq 0) = 0,5 + \Phi \left\{ \frac{\Delta - MC_\Sigma - MO_T}{\sqrt{\delta^2 C_\Sigma + \delta^2 O_T}} \right\}, \quad (1)$$

где  $MC_\Sigma$ ,  $MO_T$  — математическое ожидание ограничений и требуемых ассигнований на планируемый состав работ в рассматриваемый плановый период;

$\Phi(u)$  — табличный интеграл.

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Нетрудно видеть, что если расчет  $MC_\Sigma$  произведен строго на величину лимитов финансовых средств, то  $P(\Delta \leq 0) = 0,5$ , в случае наличия маневренного фонда  $\Delta_p = MO_T - MC_\Sigma > 0$  вероятность выполнения поставленных задач повышается и зависит от соотношения величин маневренного фонда  $\Delta_p$  и погрешностей прогноза для различных периодов  $\delta O_T$  и  $\delta C_\Sigma$ . Задаваясь уровнями вероятности  $P(\Delta \leq 0)$  для различных периодов планового задания, можно рассчитать

резерв, который необходимо планировать для компенсации ошибок прогноза [9, 10].

Переходя к относительным величинам:

$$\eta = \frac{\Delta_p}{MO_T}; \quad S_{C_\Sigma} = \frac{\delta C_\Sigma}{MC_\Sigma}; \quad (2)$$

$$S_{C_\Sigma} = \sqrt{\alpha(P)}; \quad S_{O_T} = \frac{\delta O_T}{MO_T}.$$

Из (2) можно записать

$$S_{O_T}^2 + (1 - \eta)^2 S_{C_\Sigma}^2 = \alpha(P) \eta; \quad (3)$$

$$\alpha(P) = \frac{1}{u^2(P)}, \quad (4)$$

где:  $u$  — параметр функции Лапласа  $\Phi(u)$ .

Значения  $\alpha(P)$  для различных требуемых уровней вероятности  $P(\Delta \leq 0)$  приведены в табл.

Условие, при котором квадратное уравнение (3) имеет решение

$$S_{C_\Sigma} < \sqrt{\alpha(P)}. \quad (5)$$

Результаты решения формулы (3) при условии (4) приведены на рис. 2. При этом рассматривались только положительные решения выражения (3), при которых  $S_{O_T} \geq C_\Sigma$ .

Анализ выражения (5) показывает, что снижение неопределенности технических и экономических показателей отдельных мероприятий и планов в целом является созданием маневренного фонда  $\eta$  плана, величина которого зависит от относительных погрешностей прогноза требуемых финансов и выделяемых финансов  $S_{C_\Sigma}, S_{O_T}$  при этом, в качестве ошибки в оценке выделяемых финансов, может рассматриваться ошибка в распределении средств на эти цели, а также отклонения от требуемой величины вероятности реализации плана в пределах выделенных финансов, то есть:  $P(\Delta > 0) = P_T$ , таблица.

Таблица

| Значения $\alpha(P)$ для различных требуемых уровней вероятности $P(\Delta \leq 0)$ |     |      |      |      |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|------|------|------|------|
| $P$                                                                                 | 0,7 | 0,8  | 0,9  | 0,95 | 0,98 |
| $\alpha(P)$                                                                         | 3,6 | 1,41 | 0,61 | 0,37 | 0,24 |

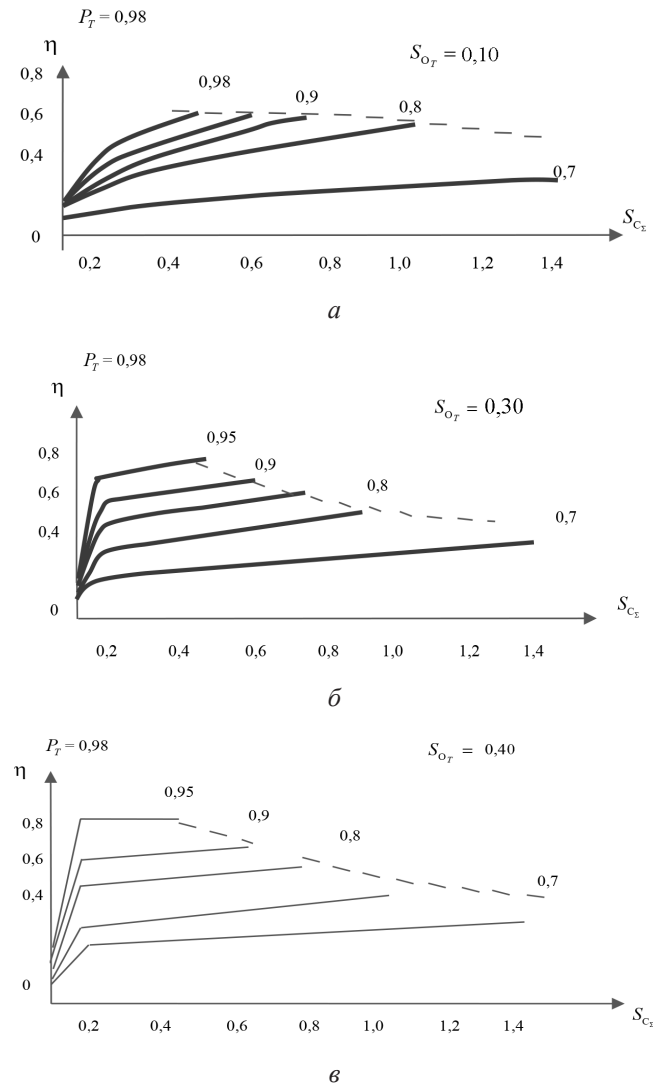


Рис. 2. Зависимость относительной величины резерва  $\eta$  ассигнований от ошибок прогноза  $S_{C_x}, S_{O_T}$

На рис. 2 нетрудно увидеть, что при требуемой величине вероятности успешной реализации плана  $P = 0,9$  и допустимом резерве финансовых ресурсов для компенсации неопределенностей в определении технико-экономических показателей 10 % точность определения требуемых и выделяемых ассигнований не должна превышать 10 % от объема. Величина предельного отклонения параметров, вызванная, например, недостоверностью прогноза темпов инфляции, а также тарифов и цен на энергоносители, комплектующие и т.п. может составлять до 40 % по различным направлениям создания ТГК продукции. Что касается ошибок в исполнении бюджетных назначений, то с учетом отвлечения

средств на урегулирование санкционированных и несанкционированных долгов, они в среднем составляют 30–70 % [6, 7, 8].

### Заключение

Очевидно, что простое увеличение  $P_T$  для компенсации неопределенности не полностью раскрывает проблемную ситуацию, так как резервные средства в обороте не участвуют. Данное положение определяет необходимость:

- изыскания возможностей повышения точности прогнозов;
- определения дополнительных источников формирования резерва ресурсов, в качестве кото-

рых могут являться внутренние ресурсы ЖЦ ТГиК продукции, включенной в план выполнения ГОЗ.

В свою очередь данная задача должна рассматриваться в плоскости совместного учета геополитических, политико-правовых, социальных и экономических условий деятельности предприятий ОГиК, предполагающего определенную динамику их изменения в прогнозируемом периоде времени.

#### Список источников

1. Багрецов С.А., Петров Д.М., Плотников В.А. Теоретико-методологические аспекты комплексной оценки эффективности экономической безопасности предприятий в современных условиях: монография. СПб.: ООО «Р-КОПИ», 2016. 538 с.
2. Багрецов С.А., Петров Д.М., Гаврилов А.В., Куличков В.К. Трансформация рисков при реализации программы диверсификации предприятий оборонно-промышленного комплекса // Стратегическая стабильность. 2019. № 1. С. 32–35.
3. Васильев И.В., Коробов А.В., Побединский Г.Г. Стратегические направления развития топографо-геодезического и картографического обеспечения Российской Федерации // Вестник Сибирского гос. ун-та геосистем и технологий. 2015. № 2. С. 5–23.
4. Власов А.Н. Риск-менеджмент: система управления потенциальными потерями // Бизнес. 2013. № 5. С. 25–32.
5. Максимов В.И., Корноушенко Е.К., Качаев С.В. Когнитивные технологии для поддержки принятия управленческих решений // Информационное общество. 1999. № 2. С. 50–54.
6. Ласкина Л.Ю., Силакова Л.В. Оценка и управление рисками в инновационной деятельности. СПб: Университет ИТМО, 2019. 67 с.
7. Риск-менеджмент инвестиционного проекта: учеб. для студентов вузов, обучающихся по экономическим специальностям; под ред. М.В. Грачевой, А.Б. Сакерина. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2009. 544 с.
8. Черешкин Д.С. Управление рисками и безопасностью. М.: Издательская группа URSS, 2010. 200 с.

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

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

#### References

1. Bagretsov S.A., Petrov D.M., Plotnikov V.A. Theoretical and methodological aspects of a comprehensive assessment of the effectiveness of economic security of enterprises in modern conditions: monograph. SPb.: Publishing house «R-KOPI», 2016. 538 p.
2. Bagretsov S.A., Petrov D.M., Gavrilov A.V., Kulichkov V.K. transformation of risks in the implementation of the program of diversification of enterprises of the military-industrial complex // Strategic stability. 2019. No 1. Pp. 32–35.
3. Vasiliev I.V., Korobov A.V., Pobedinsky G.G. Strategic directions of development of topographic-geodesic and cartographic support of the Russian Federation // Bulletin of the Siberian State University of Geosystems and Technologies. 2015. No 2. Pp. 5–23.
4. Vlasov A.N. Risk management: potential loss management system // Business, 2013. No 5. Pp. 25–32.
5. Maksimov V.I., Kornoushenko E.K., Kachev S.V. Cognitive technologies to support managerial decision-making // Information Society. 1999. № 2. Pp. 50–54.
6. Laskina L.Y., Silakova L.V. Evaluation and risk management in innovation activity. SPb: ITMO University, 2019. 67 p.
7. Risk management of an investment project: a textbook for University students studying in economic specialties / ed. by M.V. Gracheva, A.B. Sakerina. Moscow: UNITY-DANA, 2009. 544 p.
8. Chereshekin D.S. risk and security Management. Moscow: URSS Publishing group, 2010. 200 p.
9. Linear algebra: theory and applied aspects: studies. manual / G.S. Shevtsov. 3rd ed. ispr. and additional. M.: Master: INFRA-M., 2003. 576 p.
10. Saati T. Decision-making. Method of hierarchy analysis. M.: Radio and communication, 1993. 278 p.

УДК 004.056.5, 629.5.067

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_9

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАБОТЫ СОТРУДНИКА ДЕПАРТАМЕНТА  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ  
ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

**ASSESSMENT OF THE QUALITY OF WORK OF AN EMPLOYEE OF THE  
INFORMATION TECHNOLOGY DEPARTMENT OF AN INDUSTRIAL  
ENTERPRISE IN ENSURING INFORMATION SECURITY**

*С.И. Фокина, А.В. Выволокина*

*S.I. Fokina, A.V. Vyvolokina*

*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет*

В статье предложен набор показателей, применимый для моделирования и оценки качества работы сотрудников отделов информационных технологий судостроительных предприятий, а также для оценки качества процесса организации администрирования и работы. Обозначены основные параметры качества работы сотрудника информационной безопасности предприятия. Выявлена необходимость поиска решений, способных дать количественную оценку важным качествам специалиста информационных технологий (ИТ). Приведены формульные зависимости для расчета стохастических показателей, позволяющих получить объективные оценки субъективного влияния человеческого фактора на безопасное функционирование информационных систем промышленных предприятий. Модель может быть использована для поддержки принятия решений по совершенствованию системы и организации и планирования противодействию угрозам информационной безопасности (ИБ).

**Ключевые слова:** показатели качества, информационная безопасность, информационная система, ИТ-специалист, противодействие угрозам.

The article proposes a set of indicators applicable for modeling and assessing the work quality of employees in information technology departments of shipbuilding enterprises, as well as for evaluating the quality of administration and work organization processes. Key parameters of the quality of work of an information security employee at an enterprise are identified. The need for finding solutions capable of quantitatively assessing the critical qualities of an information technology specialist is highlighted. Formulaic dependencies are provided for calculating stochastic indicators, which allow for objective evaluations of the subjective influence of the human factor on the secure functioning of industrial enterprises' information systems. The model can be used to support decision-making aimed at improving system organization and planning measures to counteract information security threats.

**Keywords:** quality indicators, information security, information system, IT-specialist, countering threats.

## Вводная часть

Процессы информатизации, связанные с управлением жизненным циклом изделий и проектов, демонстрируют экспоненциальный рост. Значительно увеличиваются показатели компьютерной преступности в организации промышленного шпионажа, мошенничестве в банковско-финансовой сфере и в области нарушения конституционных прав и свобод человека и гражданина. Происходит взлом частной информации (несанкционированное проникновение), растут масштабы и количество скоординированных компьютерных атак на финансово-экономические и военно-стратегические объекты.

Работа по защите объектов в целях противодействия угрозам информационной безопасности требует от соответствующих специалистов непрерывного исследования больших объемов данных, что подразумевает набор компетенций, необходимых для этого. Многие современные сотрудники ИТ-служб проводят рабочее и вне-рабочее время, совершенствуя защиту и управление большими данными. Организация значительного количества цифровых данных, полученных при выполнении некоторых работ, таких как протоколы собраний, обучающие видео, фотографии, отчеты и инструкции, также может оказывать влияние на качество работы ИТ-специалиста.

Несмотря на внедрение систем поддержки принятия решений на основе искусственного интеллекта в целях повышения оперативности и обоснованности реагирования на угрозы, решающее слово остается за человеком.

В ходе анализа когнитивных задач специалистов по информационной безопасности установлено, что при решении своих функциональных задач этим специалистам приходится осуществлять мониторинг данных, переходя от общих сигналов и предупреждений к конкретным деталям инцидентов, чтобы принимать решения о том, что следует рассматривать как опасность, а что нет, и какие действия могут иметь различный уровень опасности в каждой конкретной ситуации [1]. Уровень подготовки специалиста по безопасному управлению информационной инфраструктурой оценивается по тому, как быстро он обнаружил вторжения, оповестил уполномоченных коллег о вторжении, а также выбрал и

осуществил необходимые меры противодействия [2].

## Основная часть

Предположим, что функционирование любого объекта можно представить набором параметров, значения которых могут изменяться в заданных диапазонах своих значений (то есть информационной «надежности»). Каждый из таких параметров рассматривается с позиций сопротивляемости возможным отказам под действием внешних воздействий, которые в свою очередь определяют ограничения на изменения значений анализируемых параметров. В этом случае, сочетая параметры воздействий и сопротивляемости, на основе физических законов природы можно построить модель безопасного функционирования информационных систем (ИС) с учетом изменения во времени предельных значений рассматриваемых параметров, которая в отличие от математических моделей теории надежности становится пригодной для прогнозирования безопасной работы ИС в зависимости от качества специалиста. В такой модели сам перечень этих параметров будет характеризовать функциональность объекта.

Анализ подходов к оценке качества подготовки специалиста ИТ [3, 4] показал, что спектр показателей достаточно широк, поэтому обычно рассматриваются только наиболее важные из них, определенные профессиональным стандартом: оперативность, устойчивость, непрерывность и скрытность (добавим к ним современное требование — качество защиты).

Как видно в таблице, ряд показателей носит случайный характер и в качестве их оценки используются вероятности. Приведем некоторые решения, способные дать количественную оценку важным качествам специалиста ИТ [5, 6].

1. Вероятность своевременного обеспечения работы ИС предприятия для информации  $i$ -го приоритета в заданное время  $T_{zi}$  можно рассчитать, если представить систему связи как систему массового обслуживания, в которой заявками на обслуживание будут запросы от абонентов на устранение угроз ИБ:

$$P_{si}(T_{zi}) = \int_0^{\theta_i} \exp(-\tau) \tau^{\gamma_i} d\tau / \Gamma(\gamma_i),$$

Таблица

Основные параметры качества работы сотрудника информационной безопасности предприятия

| Требования к сотруднику ИБ | Параметры системы ИС, влияющие на выполнение функционала                                                             | Оцениваемые показатели качества                                                                                                                                                                              |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Качество                   | – обеспечение качественной защиты ИС сотрудником ИТ                                                                  | – вероятность своевременного обеспечения работы ИС предприятия                                                                                                                                               |
| Оперативность              | – среднее время на купирование угрозы ИТ;<br>– оперативность информационного обмена (документальной информацией)     | – время устранения инцидента;<br>– пропускная способность сотрудника ИТ                                                                                                                                      |
| Непрерывность              | – количество отказов системы за единицу времени;<br>– среднее время восстановления работоспособности                 | – коэффициент готовности сотрудника ИТ;<br>– среднее время восстановления системы                                                                                                                            |
| Скрытность                 | – обеспечение передачи информации требуемого уровня конфиденциальности;<br>– сокрытие от злоумышленника структуры ИС | – высший приоритет купируемой угрозы;<br>– вероятность сохранения защищенности информации в течение периода ее объективной актуальности                                                                      |
| Устойчивость               | – среднее время восстановления ИС при повреждении от внешних воздействий;<br>– надежность системы                    | – нормативное время на восстановление повреждений;<br>– нормативное время передачи управления на не атакованный узел управления ИС;<br>– вероятность обеспечения работоспособного состояния в заданное время |

где  $\Gamma(\gamma) = \int_0^{\theta_i} \exp(-\tau) \tau^{\gamma_i} d\tau$  — табулируемая неполная гамма-функция;

$$\gamma_i = \frac{T_{pi}}{\sqrt{T_i - T_{pi}^2}}; \quad \theta_i = T_{zi} \cdot \frac{\gamma_i^2}{T_{pi}},$$

где  $\gamma_i$ ,  $\theta_i$  — рассчитываемые параметры неполной гамма-функции;

$T_{pi}$  и  $T_i$  — рассчитываемые соответственно среднее время и момент времени реакции специалиста ИБ при обработке запросов  $i$ -го типа в системе (полного времени пребывания на обработке с учетом ожидания в очереди).

Исходными данными для оценки показателей являются:  $I$  — общее количество возможных приоритетов запросов на предотвращение угроз и  $\lambda_i$  — интенсивность потока запросов  $i$ -го приоритета ( $i = \overline{1, I}$ ).

2. Вероятность сохранения информации в течение периода ее объективной актуальности можно рассчитать, используя формулу:

$$P_c = 1 - \prod_{m=1}^k P_{pr\_m},$$

где  $k$  — количество уровней защиты информации, которые требуется преодолеть злоумышленнику для доступа к ней, либо к ресурсам ИС;

$P_{pr\_m}$  — вероятность преодоления злоумышленником  $m$ -го уровня защиты информации. При этом для экспоненциальной аппроксимации распределений исходных характеристик при их независимости  $P_{pr\_m}$  вычисляется по формуле:

$$P_{pr\_m} = \frac{f_m}{f_m + u_m},$$

где  $f_m$  — среднее время между проверками параметров защиты  $m$ -го уровня;

$u_m$  — среднее время, затрачиваемое на преодоление  $m$ -го уровня защиты.

3. Вероятность обеспечения работоспособного состояния формально можно представить как

$$P_{rs} = F(t_i < T).$$

В значительной мере конкретное значение  $t_i$  зависит от подготовленности оператора — сотрудника ИТ. Для случая максимума

неопределенности [7, 8], когда время восстановления работоспособности носит равномерный характер на интервале от минимального до предельного, формула выглядит так:

$$P_{rs} = \frac{(t_{\max} - t_{\min}) \times \text{random}}{T}.$$

Остальные предложенные показатели качества функционирования ИС являются ее техническими и эксплуатационными характеристиками и могут быть получены из их технической документации или из нормативных документов по организации информационного взаимодействия на предприятии.

Помимо технических характеристик при оценке сотрудника необходимо учитывать и финансовые затраты на его обучение и содержание. Здесь представляется целесообразным использовать два показателя качества: показатель стоимости задействованных средств и показатель затрат на услуги [9].

### Заключение

Предложенная модель позволяет учесть факторы, влияющие на качество сотрудника информационной безопасности предприятия, и на этой основе рассчитывать коэффициент вероятности, характеризующий качество всей информационной системы. Исходными данными для модели являются статистические данные о предыдущем этапе эксплуатации и опыте сотрудника [10].

Модель также может быть использована для поддержки принятия решений по совершенствованию системы, организации и планирования противодействию угрозам информационной безопасности и возможностям информационной системы в целом.

### Список источников

1. Авдеев М.М., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. и др. Информационно-статистические методы в управлении микроэкономическими системами. Санкт-Петербург, Тула: Международная академия информатизации, 2001. 139 с.
2. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Мартыщенко Л.А., Шатохин Д.В. Методы оперативно-

го статистического анализа результатов выборочного контроля качества промышленной продукции. Санкт-Петербург, Тула: Международная академия информатизации. 2001. 72 с.

3. Анисимов В.Г., Ведерников Ю.В., Гарькушев А.Ю., Сазыкин А.М. Научно-методическое сопровождение интеграции высокотехнологичных инноваций в процессы разработки высокоточного оружия // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 3–4. С. 66–75.

4. Анисимов В.Г., Гарькушев А.Ю., Сазыкин А.М. Оптимизация внедрения новых технологий в перспективные образцы артиллерийского вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2012. № 4 (74). С. 39–44.

5. Гарькушев А.Ю., Сазыкин А.М. и др. Основы построения моделей интеллектуализации в системах безопасности // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 9–10. С. 22–27.

6. Пряхин Е.И., Ларионова Е.В., Сазыкин А.М., Гарькушев А.Ю. Защита продукции оборонного назначения от контрафакта // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2014. № 1 (81). С. 113–118.

7. Сильников М.В., Ямпольский С.М., Шаламов А.С. и др. Концептуальные основы информационно-аналитического обеспечения органов управления военной организацией государства // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2016. № 4 (94). С. 9–15.

8. Карпова И.Л., Курилов А.В., Супрун А.Ф., Иванова Л.А. Учет влияния человеческого фактора в моделях кибербезопасности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2023. № 2 (54). С. 27–36.

9. Ведерников Ю.В., Гарькушев А.Ю., Карпова И.Л., Супрун А.Ф. Формализация задачи выбора варианта структурного построения информационного комплекса управления многоуровневой иерархической системой по критерию информационной безопасности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2018. № 3. С. 78–82.

10. Гарькушев А.Ю., Липис А.В., Супрун А.Ф., Иванова Л.А. Формирование культуры цифровой безопасности студентов высших учебных заведений судостроительного профиля // Про-

блемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2023. № 1 (53). С. 54–61.

### References

1. Avdeev M.M., Anisimov V.G., Anisimov E.G. et al. Informacionno-statisticheskie metody v upravlenii mikroekonomicheskimi sistemami [Information and statistical methods in the management of microeconomic systems] / Mezhdunarodnaya akademiya informatizacii. Sankt-Petersburg, Tula. 2001. 139 p.

2. Anisimov V.G., Anisimov E.G., Martyshenko L.A., Shatoxin D.V. Metody operativnogo statisticheskogo analiza rezul'tatov vyborochnogo kontrolya kachestva promyshlennoj produkcii / Mezhdunarodnaya akademiya informatizacii. Sankt Peterburg, Tula. 2001. 72 p.

3. Anisimov V.G., Vedernikov Yu.V., Gar'kushev A.Yu., Sazy'kin A.M. Nauchno metodicheskoe soprovozhdenie integracii vy'sokotekhnologichny'x innovacij v processy razrabotki vy'sokotochnogo oruzhiya // Voprosy oboronnoj tekhniki. Seriya 16. Texnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu. 2014. № 3–4. Pp. 66–75.

4. Anisimov V.G., Gar'kushev A.Yu., Sazy'kin A.M. Optimizaciya vnedreniya novy'x tekhnologij v perspektivny'e obrazcy artillerijskogo vooruzheniya // Izvestiya Rossijskoj akademii raketny'x i artillerijskix nauk. 2012. № 4 (74). Pp. 39–44.

5. Gar'kushev A.Yu., Sazy'kin A.M. i dr. Osnovy postroeniya modelej intellektualizacii v sistemax

bezopasnosti // Voprosy oboronnoj tekhniki. Seriya 16. Texnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu. 2014. № 9–10. Pp. 22–27.

6. Pryaxin E.I., Larionova E.V., Sazy'kin A.M., Gar'kushev A.Yu. Zashhita produkcii oboronno naznacheniya ot kontrafakta // Izvestiya Rossijskoj akademii raketny'x i artillerijskix nauk. 2014. № 1 (81). Pp. 113–118.

7. Sil'nikov M.V., Yampol'skij S.M., Shalamov A.S. et al. Konceptual'ny'e osnovy informacionno-analiticheskogo obespecheniya organov upravleniya voennoj organizaciej gosudarstva // Izvestiya Rossijskoj akademii raketny'x i artillerijskix nauk. 2016. № 4 (94). Pp. 9–15.

8. Karpova I.L., Kurilov A.V., Suprun A.F., Ivanova L.A. Uchyot vliyaniya chelovecheskogo faktora v modelyax kiberbezopasnosti // Problemy informacionnoj bezopasnosti. Komp'yuterny'e sistemy. 2023. № 2 (54). Pp. 27–36.

9. Vedernikov Yu.V., Gar'kushev A.Yu., Karpova I.L., Suprun A.F. Formalizaciya zadachi vy'bora varianta strukturnogo postroeniya informacionnogo kompleksa upravleniya mnogourovnevoj ierarhicheskoj sistemoy po kriteriyu informacionnoj bezopasnosti // Problemy informacionnoj bezopasnosti. Komp'yuterny'e sistemy. 2018. № 3. Pp. 78–82.

10. Gar'kushev A.Yu., Lipis A.V., Suprun A.F., Ivanova L.A. Formirovanie kul'tury cifrovoj bezopasnosti studentov vy'sshix uchebny'x zavedenij sudostroitel'nogo profilya // Problemy informacionnoj bezopasnosti. Komp'yuterny'e sistemy. 2023. № 1 (53). Pp. 54–61.

УДК 623.09

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_14

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СРЕДНЕ-ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА  
ВАРИАНТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ  
МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА  
В НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВАХ**

**APPLICATION OF THE METHOD OF MEAN-DISPERSION ANALYSIS  
OF OPTIONS FOR UPGRADING A SPACE MONITORING RADAR STATION  
IN FUZZY SETS**

*Д-р техн. наук А.В. Тимошенко<sup>1</sup>, А.С. Захаров<sup>2</sup>, канд. техн. наук Н.А. Ходатаев<sup>2</sup>, И.А. Байкалов<sup>3</sup>*

*D.Sc. A.V. Timoshenko, A.S. Zakharov, Ph.D. N.A. Khodataev, I.A. Baykalov*

*<sup>1</sup>Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,  
<sup>2</sup>НПО дальней радиолокации, <sup>3</sup>Высшая школа системного инжиниринга МФТИ*

Современные требования к существующим радиолокационным станциям мониторинга космического пространства (РЛС МКП) в части реализации режима высокоточного сопровождения малозаметных техногенных космических объектов обуславливают необходимость проведения крайне сложных и дорогостоящих работ по модернизации. В статье представлена гипотеза о возможности снижения рисков неоптимального выбора технических решений при модернизации РЛС МКП барьерного обзора для реализации режимов с повышенной разрешающей способностью при безусловном выполнении штатных задач. В основе гипотезы лежит выбор новых технических решений из множества возможных вариантов, который осуществляется по результатам средне-дисперсионного анализа. При этом вся совокупность возможных вариантов модернизации формируется путем преобразования параметров стоимости и времени модернизации в нечеткие множества с последующей оценкой функционала риска неоптимального выбора.

**Ключевые слова:** проектирование, системный инжиниринг, мониторинг космического пространства, нечеткая логика.

Modern requirements for existing space monitoring radars (SM radars) in terms of implementing a high-precision tracking mode for low-visibility man-made space objects necessitate extremely complex and expensive modernization work. The article presents a hypothesis about the possibility of reducing the risks of suboptimal choice of technical solutions during the modernization of the barrier survey radar for the implementation of modes with increased resolution while unconditionally performing routine tasks. The hypothesis is based on the choice of new technical solutions from a variety of possible options, which is carried out according to the results of the mean-variance analysis. At the same time, the entire set of possible modernization options is formed by converting the cost and time parameters of modernization into fuzzy sets, followed by an assessment of the risk functional of a suboptimal choice.

**Keywords:** design, system engineering, space monitoring, fuzzy logic.

## Введение

С ростом скорости и маневренности космических объектов (КО), а также с увеличением вероятности столкновений космических объектов существенно возрастает необходимость своевременного и эффективного совершенствования функциональных характеристик радиолокационных систем мониторинга космического пространства (РЛС МКП) [1], в том числе из-за появления малозаметных (размером от 7 см на высоте 1700 км) и маневрирующих техногенных космических объектов (ТКО), представляющих опасность для космических аппаратов различного назначения. При этом сложность обнаружения и сопровождения таких объектов существенно возрастает из-за необходимости одновременного сопровождения не менее 100 ТКО.

Указанное обстоятельство требует проведения комплекса работ по модернизации РЛС МКП с целью повышения таких функциональных характеристик, как поиск, обнаружение, сопровождение и выдача высокоточной информации о ТКО в единый каталог космических объектов [2, 3], что достигается за счет расширения диаграммы направленности (ДН) на излучение в режиме барьерного обзора, разработки новых аппаратно-программных решений для зондирования группы ТКО одним импульсом с расширенной ДН на излучение, а также формирования субимпульсов на разных угловых направлениях, в том числе с дискретно кодированными по частоте (ДКЧ) сигналами, которые синтезируются в блоке формирования зондирующих сигналов (БФЗС).

При этом сложность выполнения указанных работ в интересах повышения точностных характеристик сопровождения малоразмерных и маневрирующих ТКО возрастает из-за необходимости постоянной оценки риска невыполнения требований как в штатном (барьерном) режиме, так и в новом режиме высокоточных измерений координат космического объекта по следующим критериям: реализуемость — стоимость — время разработки новых компонент РЛС МКП.

Применение методов системного инжиниринга, которые заключаются в комплексном анализе связей между компонентами и подсистемами

для обеспечения общей функциональности и производительности [4–6], позволяет как корректно формализовать собственно процесс выбора лучшего варианта модернизации, так и оперативно управлять процессом модернизации от этапа концептуального проектирования до проведения испытаний.

Существующие методы [7–9] разработки РЛС МКП, как правило, основаны на использовании универсального показателя эффективности создания РЛС — в общем случае применяются показатель риска, под которым понимается вероятностная мера отклонения характеристик создаваемой РЛС от требуемых заказчиком значений, учитывающая как текущие характеристики производственного процесса создания РЛС, прежде всего его технологическую готовность, так и финансовые и временные ограничения при создании РЛС [7–10]. Однако такой подход не учитывает множества равнозначных вариантов модернизации. Для минимизации риска необходимо проанализировать всевозможные варианты для выбора лучшего набора компонент, из которых необходимо выбрать наилучший.

Потенциально высокой эффективностью обладает метод средне-дисперсионного анализа, заключающийся в расчете меры взаимосвязи дисперсий разных величин и дальнейшей минимизации данной меры. Средне-дисперсионный анализ применяется для величин одной размерности, в нашем же случае необходимо учитывать срок и время модернизации, а также требуемое повышение характеристик после модернизации.

Таким образом, необходимо разработать метод, который бы позволил формализовать процесс выбора оптимального варианта модернизации РЛС МКП из множества вариантов при ограничениях на стоимость, время модернизации и технические характеристики. Оптимизационная задача выглядит следующим образом:

$$M: \lim_{\substack{T \rightarrow T_{\text{опт}} \\ C \rightarrow C_{\text{опт}} \\ TX \rightarrow TX_{\text{опт}}}} (R_{\text{var}} - R_{\text{var}}^*) = 0;$$

$$\{TX\}_{\text{опт}} = \operatorname{argmax} K(C, T, TX);$$

$$\{C, T\}_{\text{опт}} = \operatorname{argmin} \mathbf{K}(C, T, \text{TX}),$$

где  $M$  — методика выбора оптимального облика модернизации;

$R_{\text{var}}$  — риск варианта, соответствующего оптимальным характеристикам;

$R_{\text{var}}^*$  — риск выбранного варианта;

$T_{\text{опт}}$  — оптимальное время модернизации;

$C_{\text{опт}}$  — оптимальная стоимость модернизации;

$\text{TX}_{\text{опт}}$  — оптимальные технические характеристики модернизации;

$\mathbf{K}$  — вектор параметров РЛС.

В такой задаче применение математического аппарата нечетких множеств позволит сравнить множество вариантов и при этом получить однозначный ответ какой из них наиболее оптимальный.

#### Формализация метода оптимального выбора технических решений на основе применения средне-дисперсионного анализа и теории нечетких множеств

Ранее конструкторы РЛС МКП представляли множество вариантов модернизации, которые потом сравнивали по частным критериям и упускали из вида наиболее оптимальный. Предлагается всевозможные варианты модернизации РЛС МКП расположить в пространстве, значения времени, стоимости модернизации и функциональных характеристик задать не в абсолютных величинах, а ввести меру соответствия. Мету соответствия можно ввести с помощью аппарата нечеткой логики, в которой можно показать, насколько данный вариант оптимален по стоимости, времени модернизации и функциональным характеристикам.

В рамках теории нечеткой логики для принадлежности величины  $u$  к множеству  $A$  используются функции принадлежности величины  $u$  [1], которая будет являться технической характеристикой, стоимостью и временем модернизации. Линейными функциями принадлежности величины  $u$  к множеству  $A$ , для нашего случая, под которым будем понимать множество благоприятных и реализуемых вариантов, функции определяются мерой  $\mu_A$ :

$$\mu_A = \begin{cases} 0, & \text{при } u < a_l; \\ \frac{u - a_l}{a' - a_l}, & \text{при } a_l \leq u \leq a'; \\ 1 & \text{при } u = a'; \\ \frac{a_r - u}{a_r - a'}, & \text{при } a' \leq u \leq a_r; \\ 0 & \text{при } u > a_r. \end{cases}$$

В нашем случае  $a_l^L$  и  $a_r^r$  являются заданными заранее благоприятными уровнями для стоимости, времени модернизации и функциональными характеристиками. Геометрически нечеткое множество стоимости, времени реализации и технической характеристики представляется как многомерная пирамида, где точка вершины является идеальным вариантом, обычно не достижимым в жизни, в таком случае равенство  $\mu_A = 1$  будет означать идеальное совпадение величины требуемому уровню  $C_{\text{зад}}, T_{\text{зад}}, \text{TX}_{\text{зад}}$  по функциональной характеристике  $\text{TX}$ , стоимости  $C$  или срокам модернизации  $T$ . Таким образом, такая формализация позволяет учесть различные технические решения для рассмотрения различных вариантов, которые возможны на этапе согласования с заказчиком стоимости или времени модернизации, оценка которых будет осуществляться с помощью нечетких чисел  $\mu_{A_i}$ . Теперь формализуем решающее правило на основе средне-дисперсионного анализа в пространстве нечетких вариантов модернизации.

Для классического средне-дисперсионного анализа рассчитываются изменения дисперсии и ковариации связанных величин во времени, из которых находятся логарифмическое отношение ее значение на  $i$ -расчете к  $i-1$ -расчету

$$\delta_i A = \ln \left( \frac{A_i}{A_{i-1}} \right).$$

В каждый момент времени рассчитывается среднее значение  $E$  и среднеквадратичное отклонение  $\sigma$ . Риск обосновывается тем, что значительное изменение одной из величин приведет за собой изменение связанных с ней характеристик, что приводит к интегральному изменению характеристик по цепочке. В математическом плане задача многопараметрической

кой оптимизации функциональных характеристик ТХ, времени  $T$  и стоимости модернизации  $C$  выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \theta_i \theta_j \text{Cov}_{i,j} \rightarrow \min; \\ \sum_{i=1}^{\infty} E(r_i) \theta_i = E(r); \\ \sum_{i=1}^{\infty} \theta_i = 1; \quad C \rightarrow \min; T \rightarrow \min, \end{cases}$$

где  $\theta_i$  — доля  $i$ -й величины;

$\text{Cov}_{i,j}$  — ковариация значений  $i$ -й и  $j$ -й величины;

$E(r)$  — математическое ожидание.

Ковариация — базовая мера линейной связи двух величин, которая задается формулой:

$$\text{Cov}(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}),$$

где  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  — средние значения величин  $x$  и  $y$ . Риск задается следующей формулой:

$$\sigma_p = \sqrt{\theta_i \theta_j \text{Cov}_{i,j}}.$$

Если раскрыть формулу ковариации и принять все величины с равными весами, то можно рассчитать риск по формуле:

$$\sigma_p = \sqrt{\sum_i \sigma_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} \sigma_i \sigma_j},$$

где  $\sigma_i$  — среднеквадратичное отклонение  $i$ -й функциональной характеристики под воздействием внешних факторов;

$C_{ij}$  — коэффициент корреляции между характеристиками при проектировании.

Однако средне-дисперсионный анализ величин, изменяющихся во времени, не подходит для многопараметрической оптимизации при модернизации, поскольку может дать в ответе равнозначные варианты. Применение нечетких множеств поможет избежать многозначности такого из-за величины  $\mu_A$ , физический смысл которой является мерой соответствия идеальному варианту модернизации из множества вариантов. Риск будет являться комбинацией мер  $\mu_i$  для разных величин для каждого варианта, показываю-

щей расстояние до вершины пирамиды в пространстве нечетких величин.

Для каждого варианта задаем дисперсию расхождения из нечеткого множества, равную:

$$\begin{aligned} \sqrt{\sum_i \sigma_i^2} &= \\ &= \sqrt{(\mu_C C_K - 1)^2 + (\mu_{TX} TX_K - 1)^2 + (\mu_T T_K - 1)^2} = \\ &= \sqrt{\sum_i (\mu_i - 1)^2}, \end{aligned}$$

где  $i$  — обозначает принадлежность к множеству стоимости, времени или характеристики.

Коэффициент корреляции в нечетком множестве зададим как

$$C_{AB} = \frac{\left(1 - \frac{A}{A_{\text{зад}}}\right) \left(1 - \frac{B}{B_{\text{зад}}}\right)}{\sqrt{\mu_A^2 + \mu_B^2}}.$$

Тогда можно задать функционал риска в пространстве нечеткого множества, минимальное значение которого будет означать максимальную близость к идеальному варианту модернизации с заданными характеристиками:

$$\begin{aligned} \sigma_R &= \\ &= \sqrt{\sum_i (\mu_i - 1)^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} (1 - \mu_i)(1 - \mu_j)} \rightarrow \min. \end{aligned}$$

Технический вариант, наиболее близкий к локальному минимуму, и будет являться оптимальным. Схема методики изображена на рис.

Данная методика работает с риском не как с вероятностной оценкой, а переводит его в плоскость нечетких множеств, что позволяет оценивать неограниченное число вариантов модернизации. Данный эффект обеспечивается новым функционалом риска выбора неоптимального облика на основе средне-дисперсионного анализа и мерой соответствия данного варианта к идеальному на основе подходов нечеткой логики. Достоинством такого подхода является оперативность расчетов и возможность работы с неограниченным числом характеристик и вариантов.



Рис. Структурно-логическая схема методики выбора оптимального варианта модернизации РЛС МКП для достижения требуемых характеристик при ограничениях по стоимости и времени модернизации

### Выводы

В статье представлен вариант решения задачи выбора новых технических решений при модернизации РЛС МКП для режимов с повышенной разрешающей способностью при выполнении требований к функциональным характеристикам в режиме барьерного обзора.

В качестве гипотезы предложен научно-методический аппарат снижения рисков неоптимального выбора технических решений при модернизации, основанный на представлении множества вариантов как нечеткого множества с последующей минимизацией риска по результатам средне-дисперсионного анализа. Основным достоинством предложенной оптимизации является возможность оценить неограниченное количество вариантов модернизации РЛС МКП и риски неоптимального выбора для каждого технического решения.

В качестве дальнейших исследований предлагается провести вычислительный эксперимент

и проверить эффективность представленного метода по реальным данным о модернизации радиолокационной станции.

### Список источников

1. Тимошенко А.В., Перлов А.Ю., Зверев Г.П. и др. Применение теории нечетких множеств при решении задач управления временным ресурсом радиолокационной станции мониторинга космического пространства // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24. № 3. С. 513–519.
2. Шевцов В.А., Тимошенко А.В., Разиньков С.Н. Оценка состояния безопасности полета воздушного судна на основе анализа рисков авиационных инцидентов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2024. № 1. С. 39–44.
3. Порсев В.И., Гелесев А.И., Красько А.Г. Угловое сверхразрешение сигналов с использова-

нием «виртуальных» антенных решеток // Вестник Концерна ВКО «Алмаз–Антей». 2019. № 4. С. 24–34.

4. Боев С.Ф., Рахманов А.А. Метод повышения эффективности внедрения новых технологий при создании РЛС нового поколения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1(162). С. 73–81.

5. Леонов А.И., Васенев В.Н., Гайдук Ю.И. и др. Моделирование в радиолокации. М.: Сов. Радио, 1979. 264 с.

6. Неведов С.И., Неведова Ю.С., Слукин Г.П. и др. Разработка программного обеспечения имитационного моделирования эффективности применения технических решений РЛС // Наука и образование. 2012. № 3. С. 1–8.

7. Рахманов А.А., Логовский А.С., Мальцев Г.Н., Тимошенко А.В. Техничко-экономический показатель эффективности создания радиолокационных систем дальнего обнаружения // Вооружение и экономика. 2020. № 2 (52). С. 9–23.

8. Управление созданием и эксплуатацией радиолокационных систем дальнего обнаружения; под ред. С.Ф. Боева. М.: Научная книга, 2019. 424 с.

9. Матсеевич С.В., Владко У.А., Зюзина А.Д., Мочалов М.Н. и др. Применение показателя когнитивной нагрузки графического элемента для обоснования требований к системе визуализации РЛС дальнего обнаружения // Научная визуализация. 2024. Т. 16. № 3. С. 87–96.

10. Бушмин В.В., Дубовский В.А., Орлов С.М., Тимошенко А.В. Контроль процессов жизненного цикла высокотехнологичных образцов вооружения и военной техники в ведущих зарубежных военно-промышленных компаниях: методологические, методические и организационные аспекты // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 11–12 (185–186). С. 101–108.

## References

1. Timoshenko A.V., Perlov A.Yu., Zverev G.P. et al. An example of the theory of odd opinions in solving the problem of managing the time resource of a space monitoring radar station // Scientific

and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2024. Vol. 24. No 3. Pp. 513–519.

2. Shevtsov V.A., Timoshenko A.V., Razinkov S.N. Assessment of the state of flight safety of an aircraft based on an analysis of the risks of aviation incidents // Bulletin of higher educational institutions. Aviation equipment. 2024. No 1. Pp. 39–44.

3. Porsev V.I., Gelesev A.I., Krasko A.G. Angular excess of signals using «virtual» antenna arrays // Bulletin of the JSC «Almaz-Antey». 2019; (4): 24–34.

4. Boev S.F., Rakhmanov A.A. Method of increasing the efficiency of the introduction of new technologies in the creation of a new radar coverage // Bulletin of South Federal University. Technical science series. 2015. № 1(162). Pp. 73–81.

5. Leonov A.I., Vasenev V.N., Gaidukov Yu.I. et al. Modeling in radar: edited by A.I. Leonov. M.: Sov. Radio, 1979. 264 p.

6. Nefedov S.I., Nefedova Yu.S., Slukin G.P. et al. Software development for simulation modeling of the effectiveness of radar technical solutions // Science and Education. 2012. No 3. 8 p.

7. Rakhmanov A.A., Logovsky A.S., Maltsev G.N., Timoshenko A.V. Technical and economic indicator of the effectiveness of the creation of long-range radar detection systems // Armament and economy. 2020. № 2(52). Pp. 9–23.

8. Management of the creation and operation of long-range radar detection systems / edited by S.F. Boev. M.: Scientific book, 2019. 424 p

9. Matseevich S.V., Vladko U.A., Zyuzina A.D., Mochalov M.N., Zakharov A.S. An example of an indicator of the cognitive load of a graphic element for processing requirements for a long-range radar imaging system // Scientific Visualization, 2024 16.3: 87–96.

10. Bushmin V.V., Dubovsky V.A., Orlov S.M., Timoshenko A.V. Control of the life cycle processes of high-tech weapons and military equipment in leading foreign military-industrial companies: methodological, methodological and organizational aspects // Issues of defense technology. Series 16: Technical means of combating terrorism. 2023. № 11–12 (185–186). Pp. 101–108.

УДК 621.391.1

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_20

**КОММЕНТАРИИ К СТАТЬЕ Н.Н. ПЛОТНИКОВА, А.В. ВОЙНОВА И  
А.Н. ПУТИЛИНА «ВЫБОР АЛГОРИТМА АДАПТАЦИИ ПО РАБОЧЕЙ  
ЧАСТОТЕ В ОДНОПОЛОСНОЙ РАДИОЛИНИИ ТРОПОСФЕРНОЙ СВЯЗИ»**

**COMMENTS ON THE ARTICLE BY N.N. PLOTNIKOV, A.V. VOINOV AND  
A.N. PUTILIN «SELECTION OF ADAPTATION ALGORITHM ACCORDING TO  
OPERATING FREQUENCY IN A SINGLE-BAND RADIO LINE OF TROPOSPHERE  
COMMUNICATION»**

*Д-р техн. наук А.М. Чуднов*

*D.Sc. A.M. Chudnov*

*Военная академия связи им. С.М. Буденного*

Основной целью «Комментариев...» является освещение истории, состояния вопроса, а также методики и источников получения соотношений, характеризующих гарантированную помехоустойчивость передачи информации в условиях преднамеренных помех. Рассмотрены принципы корректной постановки задачи анализа и синтеза системы передачи информации (СПИ) с использованием обобщенной модели взаимодействия антагонистических систем, методы ее редукции и решения. Приведены актуальные значения верхней границы (гарантированной СПИ) вероятности ошибки бита данных в классе помех с ограниченной средней мощностью. Рассматриваются условия применимости приведенных в комментируемой статье оценок помехоустойчивости СПИ в условиях преднамеренных помех и отмечаются отдельные неточности. Обсуждаются вопросы корректности ссылок на источники используемых результатов и правильности их интерпретации.

**Ключевые слова:** преднамеренная помеха, теоретико-игровая задача, алгоритм формирования и приема сигналов, класс помех с ограниченной средней мощностью, гарантированная помехоустойчивость.

The main objective of the «Comments...» is to highlight the history, state of the art, as well as the methods and sources for obtaining the relationships characterizing the guaranteed noise immunity of information transmission under conditions of intentional interference. The principles of correctly formulating the problem of analyzing and synthesizing an information transmission system (ITS) using a generalized model of interaction of antagonistic systems, methods of its reduction and solution are considered. The current values of the upper limit (guaranteed ITS) of the probability of data bit error in the class of interference with limited average power are given. The conditions for the applicability of the ITS noise immunity estimates given in the commented article under intentional interference are considered, and individual inaccuracies are noted. The issues of the correctness of references to the sources of the results used and the correctness of their interpretation are discussed.

**Keywords:** intentional interference, game-theoretic problem, algorithm for generating and receiving signals, class of interference with limited average power, guaranteed noise immunity.

## Введение

Побудительными мотивами к написанию «Комментариев...» к обозначенной в заголовке статье (Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 5–6 (155–156). С. 3–8) стали имеющиеся погрешности: недоговорки, некорректные ссылки и двусмысленности, которые могут неправильно трактоваться или ввести в заблуждение по исключительному важным научным вопросам.

Так, при весьма поверхностном описании в статье конструкции и принципа работы радиолинии обращает на себя внимание утверждение (ссылки на источники и номера формул из комментируемой статьи «Выбор...» индексируются символом «\*»): «В соответствии с [6\*] вероятность ошибки на бит в условиях преднамеренных помех с ограниченной средней мощностью будет определяться соотношением... (1\*)». Неужели из основ теории вероятностей, изложенных в [6\*], авторам удалось получить такую простую универсальную формулу, которую можно использовать для анализа помехоустойчивости всех типов радиолиний (или хотя бы линий тропосферной радиосвязи) с различными вариантами реализации алгоритмов формирования и приема сигналов? Конечно, это несколько не так.

Основной целью «Комментариев...» является освещение истории и состояния вопроса, методики и источников получения соотношений, характеризующих гарантированную помехоустойчивость передачи информации в условиях преднамеренных помех, а также уточнение оценок и области применимости результатов. Кроме того, обсуждаются вопросы корректности ссылок на источники, обоснованности некоторых утверждений и выводов.

## Модель взаимодействия антагонистических систем и постановка задачи

Для прояснения вопросов учета факторов, влияющих на параметры системы, функционирующей в условиях конфликта (в данном случае антагонистического), прежде всего нужно обратиться к обобщенной динамической модели взаимодействия антагонистических систем [1], изначально в формализованном виде, введенной в рассмотрение в работе [2], в которой приведены принципы обоснования, постановки и редукции теоретико-игровой задачи синтеза системы.

Структура исследуемого макрообъекта, образованного взаимодействующими элементами системы передачи информации (СПИ) и совокупности источников помех (ИП) в рамках обобщенной модели, представлена на рис. 1, а, где процессы на входах и выходах объектов определены в  $n$ -мерном евклидовом пространстве  $\mathbb{R}^n$ .

В модели взаимодействующие элементы представляются в общем случае стохастическими причинными операторами в функциональном пространстве над  $\mathbb{R}^n$  с временным аргументом [1, 2]. Операторы  $S, H, U, X$  представляют соответственно объекты СПИ: объект управления (ОУ), канал наблюдения (КН), канал управления (КУ), систему (подсистему) принятия решений на управление (СПРУ), а операторы  $R, V, Y$  — объекты ИП: канал разведки (КР), канал подавления (КП) и систему (подсистему) принятия решений на подавление (СПРП), а функционал  $Q(\cdot)$  — показатель эффективности функционирования СПИ с позиции надсистемы.

В задаче анализа СПИ полагаются заданными элементы модели  $S, H, U, X, R, V, Q$ , при этом анализ направляется на оценку параметров и

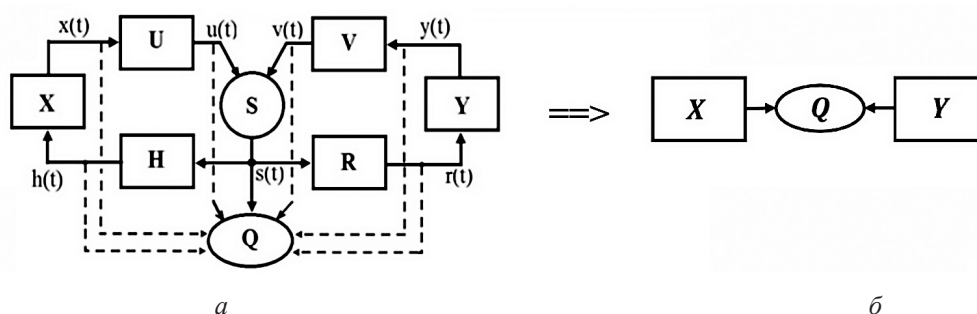


Рис. 1. Структура исследуемого макрообъекта: а — образованного взаимодействующими элементами СПИ и ИП в рамках обобщенной модели; б — взаимодействие СПИ и ИП, описанное моделью

показателей эффективности функционирования СПИ в классе  $\mathcal{Y}$  допустимых (возможных) вариантов  $Y \in \mathcal{Y}$  построения системы (контрсистемы), формирующей помехи. Особенностью преднамеренного антагонистического воздействия ИП является то, что из возможных для него вариантов  $\mathcal{Y}$ , ограниченных техническим, энергетическим, информационным, организационным, умственным ... ресурсом, ИП выберет наилучший для СПИ вариант, то есть такой, который в данном взаимодействии приводит к минимальной эффективности функционирования СПИ. Таким образом, эффективность СПИ  $X$  (варианта  $X$ ) в конечном счете будет характеризоваться величиной

$$Q_-(X) = \inf_{Y \in \mathcal{Y}} Q(X, Y), \quad (1)$$

называемой гарантированным значением показателя  $Q(\cdot)$  СПИ в классе воздействий  $\mathcal{Y}$  или нижним (гарантированным снизу) значением показателя  $Q(\cdot)$  в этом классе.

При этом задача синтеза СПИ естественным образом направляется на максимизацию величины (1) и формулируется в минимаксной постановке

$$Q_-(X) = \inf_{Y \in \mathcal{Y}} Q(X, Y) \rightarrow \max_{X \in \mathcal{X}}, \quad (2)$$

где  $\mathcal{X}$  — множество допустимых вариантов (операторов, алгоритмов, стратегий) СПИ. Решение минимаксной задачи (2) дает наилучший в классе  $\mathcal{X}$  экземпляр системы

$$X_0 = \operatorname{argmax}_{X \in \mathcal{X}} Q_-(X),$$

гарантированно обеспечивающий максимальное в  $\mathcal{X}$  значение показателя эффективности

$$\begin{aligned} Q_0 = Q_-(X_0) &= \max_{X \in \mathcal{X}} Q_-(X) = \\ &= \max_{X \in \mathcal{X}} \inf_{Y \in \mathcal{Y}} Q(X, Y), \end{aligned} \quad (3)$$

(для рассматриваемых задач устанавливается достижимость  $\min$  и  $\max$ ).

Следует отметить, что множества  $\mathcal{X}, \mathcal{Y}$  в (1), (2) должны быть достаточно полными, по-

скольку неучет в  $\mathcal{Y}$  некоторых возможностей контрсистемы может привести к некорректной оценке показателя  $Q_-(X)$ , в результате чего расчетное значение  $Q$  окажется неверным. В то же время неполнота задания множества вариантов СПИ  $\mathcal{X}$  в задаче (2) может привести к заведомо плохой конструкции СПИ. Принципиально важным в этом отношении является задание множеств  $\mathcal{X}, \mathcal{Y}$  как классов стохастических операторов, включающих рандомизированные (в теории игр называемые смешанными) стратегии систем. Таким образом, задача (2) формулируется над множествами  $\mathcal{X}, \mathcal{Y}$ , элементы  $X, Y$  в которых представлены стохастическими операторами (алгоритмами, стратегиями).

Примечание. Взаимодействие СПИ и ИП может быть описано моделью, представленной на рис. 1, б, однако при этом свойства наблюдаемых и реализуемых объектами принятия решений  $X, Y$  пришлось бы учитывать в ограничениях на классы  $\mathcal{X}, \mathcal{Y}$  операторов  $X, Y$ , что существенно усложнило бы решаемые задачи. Введение объектов  $H, U, R, V$  позволило исключить функциональные ограничения на операторы  $X, Y$  и учитывать в задаче лишь обусловленные заданной структурой системы управления.

### Теоретико-игровая задача синтеза СПИ: определенность игры

Задача (3) может рассматриваться как компонента теоретико-игровой задачи (ТИ-задачи), представленной антагонистической игрой  $\mathcal{G} = \langle \mathcal{X}, \mathcal{Y}; Q(\cdot) \rangle$  на множествах стратегий  $\mathcal{X}, \mathcal{Y}$  СПИ и ИП с функцией выигрыша первого игрока — СПИ  $Q(\cdot)$ . Решение двойственной к (2), так называемой максиминной, задачи вида

$$Q^-(X) = \sup_{X \in \mathcal{X}} Q(X, Y) \rightarrow \min_{Y \in \mathcal{Y}} \quad (4)$$

дает значение  $Q^0$  показателя эффективности, которое может быть гарантировано ИП при конфликтном взаимодействии в классах стратегий  $\mathcal{X}, \mathcal{Y}$ :

$$\begin{aligned} Q^0 = Q^-(Y^0) &= \min_{Y \in \mathcal{Y}} Q^-(Y) = \\ &= \min_{Y \in \mathcal{Y}} \max_{X \in \mathcal{X}} Q(X, Y), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $Y^0 = \operatorname{argmin}_{Y \in \mathcal{Y}} Q^-(Y)$ .

В целом задачи (2), (4) составляют игру  $\mathcal{G}$ , описывающую взаимодействие СПИ и ИП, при этом величины  $Q_0, Q^0$  называются соответственно нижней и верхней ценой игры (в общем случае  $Q_0 \leq Q^0$ ).

При поверхностном осмыслении задач (2), (4) и логики игры  $\mathcal{G}$  приходит как бы «естественная» идея обманывать противника «в процессе игры». Чтобы предотвратить бесполезное (и даже небезвредное) движение мысли в этом направлении, сразу отметим, что для типовых ТИ-задач синтеза СПИ справедлива теорема о минимаксе, в соответствии с которой имеет место равенство  $Q_0 = Q^0$  и вытекающее из него условие:

$$Q(X, Y^0) \leq Q(X_0, Y^0) \leq Q(X_0, Y), \quad (6)$$

выполняемое при всех  $X \in \mathcal{X}, Y \in \mathcal{Y}$ . Другими словами, поиск «обманывающих» стратегий как СПИ, так и ИП не имеет смысла, поскольку в рамках определенного моделью взаимодействия не существует более эффективных, чем  $X_0, Y^0$  стратегий. В силу отмеченного, стратегии  $X_0, Y^0$  называются оптимальными, ситуация  $(X_0, Y^0) \in \mathcal{X} \times \mathcal{Y}$  игры  $\mathcal{G}$  называется равновесной, а игра  $\mathcal{G}$  — определенной.

Теорема о минимаксе для ТИ-задач физического и канального уровней доказана в [3], для задач сетевого уровня существование равновесных ситуаций вытекает из свойств выпуклых игр [4]. Таким образом, сформулированная задача (2) становится ТИ-задачей, представленной игрой  $\mathcal{G}$ , и состоит в отыскании равновесной ситуации  $X_0, Y^0$  и соответствующего ей значения игры.

### Обобщенное доминирование и редукция игры

Для решения рассматриваемой ТИ-задачи, наряду с другими методами, широко используется редукция игры  $\mathcal{G}$  на основе принципа обобщенного доминирования, использованного ранее в [3, 5] и сформулированного в формализованном виде в [1, с. 165]. Принцип интерпретируется следующим образом: если в  $\mathcal{X}, \mathcal{Y}$  имеются такие подмножества  $\mathcal{X}' \subseteq \mathcal{X}, \mathcal{Y}' \subseteq \mathcal{Y}$ , что при использовании первым игроком стратегии из  $\mathcal{X}'$  второму игроку выгодно использовать стратегию из  $\mathcal{Y}'$ , и наоборот, то игра  $\mathcal{G}$  может быть редуцирована в  $\mathcal{G}' = \langle \mathcal{X}', \mathcal{Y}'; Q(\cdot) \rangle$ , при этом

нижняя (верхняя) цена игры  $\mathcal{G}'$  совпадает с нижней (верхней) ценой исходной игры  $\mathcal{G}$ .

Важные примеры редукции с использованием обобщенного доминирования получены на физическом и канальном уровнях СПИ для ТИ-задач синтеза оптимальных ( $\epsilon$ -оптимальных) алгоритмов формирования и приема сигналов (АФПС) для условий взаимодействия, допускающих такую редукцию. Именно такие условия без оговорок полагаются в статье «Выбор...», и эти условия являются необходимыми для корректности соотношений вида (1)\*.

Для простоты изложения логики решения задачи взаимодействие, представленное на рис. 1, а, рассматривается в дискретном времени, один отсчет которого (шаг) соответствует периоду передачи элементарного блока данных (символа, слова).

### Модель СПИ на физическом и канальном уровнях

Функционирование СПИ на физическом и канальном уровнях иллюстрируется на рис. 2, а.

По поступающим на каждом шаге от источника данных сообщению  $a$  и от приемной части СПИ по обратному каналу связи (ОКС) сигналу  $g'$  (если в СПИ предусмотрено взаимодействие по обратному каналу) алгоритм формирования сигналов (АФС) формирует псевдослучайно сигнал  $u_a$ , который подает на вход канала связи (КС). Полученный с выхода КС сигнал  $w = W(u_a, v)$ , образованный смесью входного сигнала  $u_a$  со случайными шумами и преднамеренной помехой  $v$ , обрабатывается алгоритмом приема сигналов (АПС), который формирует сообщение  $b$ , выдаваемое получателю данных, а также (возможно) сведения  $g$  для АФС о принятом сигнале  $w$  или сообщении  $b$ .

Редукция модели (рис. 2, а) в одношаговую модель 2, б на основе обобщенного доминирования стратегий корректна при выполнении следующих условий:

- КН и КР — это инерционные операторы задержки на 1 или более шагов;
- КУ и КВ — это единичные (тождественные) безынерционные операторы;
- КС — стационарный оператор.

При взаимодействии СПИ и ИП на физическом и канальном уровнях, как правило,

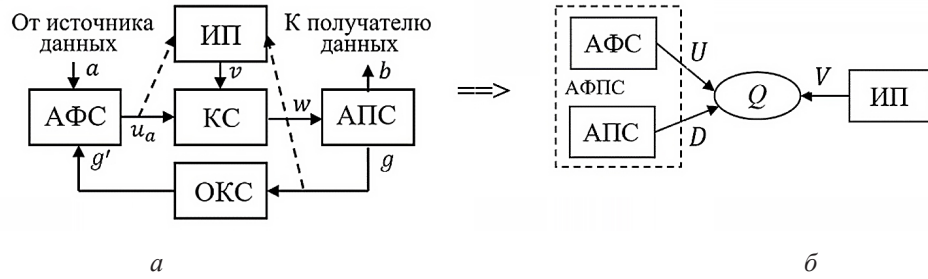


Рис. 2. Функционирование СПИ на физическом и канальном уровнях (модели)

реализуется «достаточно быстрое» переключение используемых СКК, исключающее возможность получения дополнительной информации ИП для формирования помехи на данном шаге по наблюдениям сигнала СПИ на предыдущих шагах, то есть так называемой помехи «вслед сигналу». Применение ИП одношаговой («без памяти») стратегии, в свою очередь, обуславливает целесообразность использования СПИ одношагового АФС.

В редуцированном (на одном шаге) варианте взаимодействие СПИ и ИП показано на рис. 2, б и описывается антагонистической игрой  $G' = \langle \mathcal{X}', \mathcal{Y}'; P(\cdot) \rangle$ , в которой:

- стратегия  $X$  СПИ — это АФС в  $\mathbb{R}^n$  ( $n$  — база псевдослучайного сигнала), представленный парой  $X = (U^n, D^n)$ , где АФС  $U^n$  — стохастический оператор, формирующий псевдослучайно СКК  $U^n = (U_1, \dots, U_k)$  с  $k$  сигналами с реализациями в  $\mathbb{R}^n$ ;

- АПС  $D^n(b, w(u_a, v), s)$  — рандомизированная решающая функция (правило приема), вырабатывающая по принятому из КС сигналу  $w \in \mathbb{R}^n$  и известной СКК  $u = (u_1, \dots, u_k) \in \mathbb{R}^{nk}$ , выдаваемое получателю слово  $b$ ;

- стратегия ИП  $V^n$  — случайный вектор в  $\mathbb{R}^n$ ;

- $P(\cdot) = 1 - Q(\cdot)$  — функция выигрыша второго игрока (ИП), характеризующая вероятность ошибочного приема слова; определяется конструкцией АФС  $(U^n, D^n)$ , распределением  $V^n$  и свойствами канала связи.

В рамках модели рис. 2, б корректные результаты анализа гарантированных показателей и оптимизации (синтеза) объектов модели получены в [3, 5] для однонаправленных СПИ с передачей двоичных равновероятных сообщений по каналу с аддитивной когерентной помехой. В таком случае объекты, участвующие

в модели, формализуются следующими конструкциями:

- передаваемое сообщение  $a \in \{-1, 1\}$ ;
- АФС  $U^n$  задается распределением  $F_U^n$  эталонного псевдослучайного вектора  $U^n$  с реализациями  $u \in \mathbb{R}^n$ , причем передаваемый АФС сигнал  $U_a^n$  имеет вид  $U_a^n = aU^n$ ;
- ИП  $V^n$  задается распределением  $F_V^n$  вектора помехи  $V^n$  с реализациями  $v \in \mathbb{R}^n$ ;
- КС — оператор суммирования:

$$W^n = aU^n + V^n;$$

- АПС  $D^n$  задается функцией  $P_D: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow [0, 1]$ , определяющей вероятность  $P_D(w, u)$  выдачи получателю сообщения  $b = 1$  по реализациям  $w \in \mathbb{R}^n$  и  $u \in \mathbb{R}^n$ ;
- функция выигрыша определяется усреднением вероятности ошибочного приема сообщения (бита данных) [3, 5]

$$P(F_U^n, D^n, F_V^n) = \Pr\{b \neq a\} = \frac{1}{2} \left( 1 + E \left[ P_D(-U^n + V^n, U^n) \right] - E \left[ P_D(U^n + V^n, U^n) \right] \right), \quad (7)$$

где математическое ожидание  $E[\cdot]$  вычисляется по распределениям  $F_U^n, F_V^n$ .

Множества  $\mathcal{X}', \mathcal{Y}'$  допустимых стратегий СПИ и ИП определяются энергетическими ограничениями на сигналы и помехи [5–21], причем в силу прикладной значимости (см. обоснование в [5–17]) наибольший интерес представляют задачи, в которых множество  $\mathcal{Y}'$  задано ограничением на среднюю мощность источника (совокупность источников) неравенством:

$$E[|V^n|^2] = \int_{\mathbb{R}^n} |v|^2 dF_V^n \leq \delta, \quad (8)$$

где  $\delta$  — максимально возможное отношение средней мощности помехи к средней мощности сигнала на входе приемника. При использовании ограничения (8) полагается, что средняя мощность сигнала нормирована, то есть:

$$E\left[|U^n|^2\right] = 1. \quad (9)$$

Далее полагается, что игра  $G'$  определена перечисленными условиями, включая ограничения (8), (9).

Следует отметить, что в рамках приведенной модели к настоящему времени изучена лишь небольшая область задач, направленных на синтез АФПС. Первые результаты в задаче построения приемника ФМ сигналов по критерию гарантированной помехоустойчивости были получены в [6, 7] на основе квантования компонент векторов  $U$ ,  $V$  и сведения ТИ-задачи (с заданным ФМ-АФС) к матричной игре в смешанных стратегиях. Также на оптимизацию АПС для ФМ сигналов были направлены работы [8, 18], в которых построены рекуррентные соотношения, определяющие свойства и конструкцию оптимальных АПС, причем для  $n = 1$  в аналитическом виде. В работах [2, 3, 5] в терминах игры  $G'$  была формализована задача синтеза АФПС в  $\mathbb{R}^n$  без предварительного задания АФС.

### Границы гарантированной вероятности ошибки

Построение оптимальных ( $\epsilon$ -оптимальных) в  $G'$  АФПС, стратегий постановки помехи, а также получение гарантированных (сверху и снизу) значений показателей помехоустойчивости СПИ осуществляется на основе следующих положений.

1. В  $G'$  справедлива теорема о минимаксе.

2. В  $G'$  доминируют подмножества АФС, инвариантных относительно вращений вектора  $U^n$  в  $\mathbb{R}^n$ ; при этом можно принять

$$U^n = \sqrt{Z_U} \mathcal{K}_U \mathbf{1}^n,$$

где  $Z_U$  — случайная величина (энергия сигнала  $U^n$ );

$\mathbf{1}^n \in \mathbb{R}^n$  — фиксированный вектор единичной длины;

$\mathcal{K}_U$  — случайное вращение в  $\mathbb{R}^n$  (здесь и ниже равномерно распределяющее на сфере).

3. В  $G'$  доминируют подмножества стратегий ИП, инвариантных относительно вращений вектора  $V^n$  в  $\mathbb{R}^n$ ; аналогично предыдущему  $V^n = \sqrt{Z_V} \mathcal{K}_V \mathbf{1}^n$  ( $Z_V$  — энергия помехи  $V^n$ ).

4. В  $G'$  доминируют подмножества АПС, для которых

$$P_D(w, u) = \frac{1}{2} + \varphi\left(\left|w \mathcal{K}_U^{-1} + u\right|, \left|w \mathcal{K}_U^{-1} - u\right|\right), \quad (10)$$

где  $\varphi: \mathbb{R}_+^2 \rightarrow \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]$  — вещественная знакопеременная функция двух вещественных переменных:  $\varphi(x, y) = -\varphi(y, x)$ .

Другими словами, оптимальный АПС выполняет преобразование  $\mathcal{K}_U^{-1}$  принимаемого сигнала, вычисляет расстояния от полученной точки к сигналам  $-u$ ,  $u$  и по условию (10) принимает рандомизированное решение  $b$ .

5. Вероятность ошибки бита в соответствии с (7), (10) определяется выражением:

$$p(Z, \varphi | n) = \frac{1}{2} + E\left[\varphi\left(\sqrt{Z}, \left|\sqrt{Z} \mathcal{K} - 2\right|\right)\right], \quad (11)$$

где  $Z = Z_V / Z_U$ ,  $\mathcal{K} = \mathcal{K}_U^{-1} \mathcal{K}_V$ .

6. Положения 1–5 редуцируют исходную игру  $\mathcal{G}$  в  $G' = \langle \mathcal{X}^n, \mathcal{Y}^n; p(\cdot) \rangle$ , в которой класс АФПС  $\mathcal{X}^n = F_U \times P_D$ , причем множество АФС  $\mathcal{F}_U$  определено ограничением

$$E\left[|U^n|^2\right] = E[Z_U] = \int_0^\infty z dF_U(z) = 1,$$

множество АПС  $P_D$  — условием (10), а множество стратегий ИП  $\mathcal{Y}^n = F_V(\delta)$  неравенством

$$E\left[|V^n|^2\right] = E[Z_V] = \int_0^\infty z dF_V(z) \leq \delta.$$

Как видно, при всех  $n \geq 1$  задачи синтеза двоичных АФПС в  $\mathbb{R}^n$  в условиях воздействия преднамеренной помехи свелись к серии одномерных ТИ-задач, отличающихся лишь функциями выигрыша  $p(\cdot | n)$ .

7. При задании некоторого АФПС  $X^n \in \mathcal{X}^n$  можно получить верхнюю цену игры  $G'$  (и соответственно нижнюю  $\mathcal{G}$ ):

$$p^*(\delta, n) = \max_{F_V \in F_V(\delta)} E\left[p(Z_V / Z_U, \varphi | n)\right],$$

гарантирующую, что для любой помехи в рамках условия (8) АФПС  $\mathcal{X}''$  обеспечит вероятность ошибки бита не более  $p^\wedge(\delta, n)$ . Зависимость  $p^\wedge(\delta, n)$  выпукла вверх по аргументу  $\delta$ , и в общем случае можно записать

$$p^\wedge(\delta, n) = \text{conv}_\delta^\wedge [p(\delta / Z_U, \varphi | n)],$$

где  $\text{conv}_\delta^\wedge[\cdot]$  обозначает выпуклую вверх оболочку функции  $[\cdot]$  по аргументу  $\delta$ . При этом наилучшая в классе  $F_V(\delta)$  помеха реализует выпуклую оболочку  $\text{conv}_\delta^\wedge [p(\delta / Z_U, \varphi | n)]$ , чем обуславливается двухатомность распределения  $F_V(\delta)$ .

8. Верхние границы  $p^\wedge(\delta, n)$  получены на основе АФПС  $X'' = X_K$ , в котором  $Z_U = 1$ , а АПС соответствует приемнику Котельникова, для которого  $\varphi_K(x, y) = \text{sgn}(x - y) / 2$ .

Для АФПС  $X_K$  величина  $p(Z_V, \varphi_K | n)$  вычисляется как отношение площади поверхности гиперсегмента единичного шара с высотой  $1 - 1/\sqrt{Z_V}$  при  $Z_V \geq 1$  к площади единичной сферы. Формулы для площадей поверхности и объемов гиперсегментов в  $\mathbb{R}^n$  впервые получены в [3]; в работах 2000-х гг. аналогичные соотношения приведены в других представлениях.

9. Графики зависимостей

$$p(\delta, n) = p(\delta, \varphi_K | n), p^\wedge(\delta, n)$$

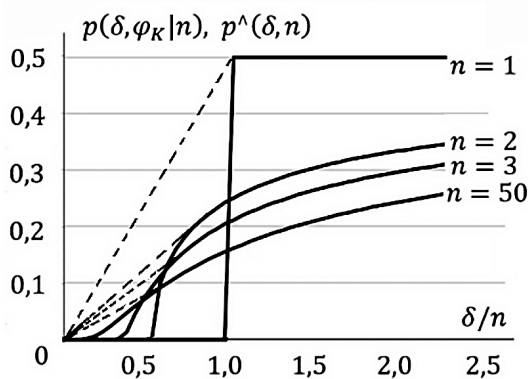


Рис. 3. Графики зависимости  $p(\delta, n)$

показаны на рис. 3, где пунктирные линии соответствуют зависимостям  $p^\wedge(\delta, n)$ . Кривые для  $n \rightarrow \infty$  на графике сливаются с зависимостью для  $n = 50$ .

Как видно, на начальном (наиболее интересном для практики) участке функции  $p^\wedge(\delta, n)$  линейны по  $\delta$ , а в асимптотике при больших  $n$  становятся линейными по  $\delta/n$ . С учетом отмеченного, наконец, можно записать соотношение

$$p^\wedge(\delta, n) = \begin{cases} c_n \delta / n, & \text{if } \delta / n \leq \gamma_n, \\ p(\delta, n), & \text{if } \delta / n > \gamma_n, \end{cases} \quad (12)$$

соответствующее по структуре формуле (1)\*.

В табл. (взята из [5]) приведены значения параметров  $c_n, \gamma_n$ , определяющих гарантированное сверху значение вероятности ошибки  $p^\wedge(\delta, n)$  в рассматриваемой задаче.

При  $n \rightarrow \infty (\delta / n = \text{const})$  имеет место сходимость  $p(\delta, n) \rightarrow 1 - \Phi(\sqrt{n} / \delta)$ , где  $\Phi(\cdot)$  — интеграл вероятностей Гаусса, и, таким образом, параметры  $c_\infty, \gamma_\infty$  определены для этого представления функции  $p(\delta, n)$  (более точно  $\gamma_\infty \approx 0,70545$ ).

10. Под простым  $k$ -расширением АФПС  $X$  в  $\mathbb{R}^n$  в [5] понимается АФПС  $X^k$  в  $\mathbb{R}^{nk}$ , который на каждом шаге равновероятно выбирает  $n$  компонент из  $n_k$  и в соответствующем выбранном пространстве  $\mathbb{R}^n$  использует АФПС  $X$ . Примерами простых  $k$ -расширений АФПС могут служить алгоритмы обработки сигналов при псевдослучайных переключениях частот (ППРЧ), каналов, временных интервалов и пр. Параметры  $c_n, \gamma_n$  АФПС, полученных путем  $k$ -расширений, совпадают с параметрами исходных АФПС. Так, при ППРЧ с  $n$  частотами и АФПС  $X_K$  (в  $\mathbb{R}^1$ ) имеет место (12) с параметрами  $c_n = 0,5, \gamma_n = 1$ .

В [8] для  $n = 1$  построен АПС (обозначим его  $X_{Dg}$ ), для которого  $c_1 = 0,25, \gamma_1 = 1$  и, следовательно, эти параметры уточняют верхние границы гарантированной вероятности ошибки  $p^\wedge(\delta, n)$ , представленные табл. при  $n = 1$  и  $n = 2$ . Как видно, использование при ППРЧ АПС

Таблица

Значения параметров  $c_n, \gamma_n$ , определяющие значение вероятности ошибки

| $n$        | 1   | 2     | 3     | 4     | 5     | 10    | 20    | 50    | $\infty$ |
|------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| $c_n$      | 0,5 | 0,262 | 0,222 | 0,205 | 0,196 | 0,180 | 0,173 | 0,168 | 0,166    |
| $\gamma_n$ | 1   | 0,793 | 0,750 | 0,734 | 0,727 | 0,714 | 0,710 | 0,707 | 0,706    |

$X_{Dg}$  обеспечит энергетический выигрыш СПИ 3 дБ по отношению к АПС  $X_K$ . Почти такую же помехоустойчивость обеспечивает при ППРЧ АФПС, формирующий амплитудно-фазомодулированный сигнал, равномерно распределенный на окружности в  $\mathbb{R}^2$ , с приемником Котельникова, для которого соотношения (12) выполняются при  $c_2 \approx 0,262, \gamma_2 \approx 0,793$ .

11. При задании некоторой стратегии ИП из  $Y'' \in \mathcal{Y}''$  можно получить нижнюю цену игры  $G''$ :

$$p^\vee(\delta, n) = \min_{F_U \in \mathcal{F}_U, \Phi} E[p(Z_V / Z_U, \Phi | n)],$$

где  $\Phi$  подбирается в множестве функций, удовлетворяющих условиям п. 4, гарантирующую, что для любого АФПС в рамках оговоренных условий (8) стратегия ИП  $Y''$  обеспечит вероятность ошибки бита не менее  $p^\vee(\delta, n)$ .

Зависимость  $p^\vee(\delta, n)$  выпукла по аргументу  $1/\delta$  и в общем случае можно записать

$$p^\vee(\delta, n) = \text{conv}_z[p(\delta/z, \Phi | n)],$$

где  $\text{conv}_z[\cdot]$  обозначает выпуклую оболочку функции  $[\cdot]$  по аргументу  $z$ .

Таким образом, функция

$$P^*(\delta, n) = \max_{Y''} p^\vee(\delta, n) = \min_{X_K} p^\wedge(\delta, n),$$

определяющая значение игры  $G''$ , вогнута по аргументу  $\delta$  и выпукла по  $1/\delta$ .

Для оценки нижней цены игры  $G''$  на отрезке получено неравенство

$$p^\vee(\delta, n) \geq p^\wedge(\delta, n+2),$$

из которого непосредственно следует оценка степени оптимальности в  $G''$ -задаче АФПС  $X_K$  и устанавливается его асимптотическая оптимальность при  $n \rightarrow \infty$ .

12. Для любых АФПС (с любыми, не только двоичными сигналами) при определенных в [5] параметрах  $c_-, \gamma_-$  и построенной функции  $\psi(\cdot)$  выполняется неравенство

$$p_-(\delta r) \geq \begin{cases} c_- \delta r, & \text{if } \delta r \leq \gamma_-, \\ \psi(\delta r), & \text{if } \delta r > \gamma_-, \end{cases} \quad (13)$$

где  $r$  — скорость передачи битов в канале.

Как видно, канал с преднамеренной помехой в классе  $F_V(\delta)$  не обладает шенноновской пропускной способностью. В связке параметров  $\delta, n, r, p$  помехоустойчивость АФПС характеризуется зависимостями вида (12), (13), представляющими верхнюю и нижнюю границы гарантированной вероятности ошибки в условиях преднамеренных помех.

Для корректного использования соотношений типа (12) при оценке параметров СПИ в условиях воздействия преднамеренных помех так или иначе (например, корректными ссылками на работы с аналогичными задачами) должны быть оговорены и ясны условия, определяющие функционирование СПИ в рамках рассматриваемой задачи. Кроме того, должны быть понятны принципы коррекции оценок применительно к другим неучтенным в модели факторам, оказывающим влияние на результаты анализа, в частности, таким как:

- некогерентность и асинхронность воздействия помехи на передаваемый сигнал;
- наличие в канале случайного шума и замираний принимаемого сигнала;
- неполная когерентность обработки сигнала и ряду других.

Аспекты учета некогерентности аддитивной преднамеренной помехи рассматривались в [5, 9]. В более поздних работах [9–21] исследовались эвристически выработанные варианты АФПС и стратегий постановки помех в рамках задачи (1), однако результатов, уточняющих обозначенные границы, не известно.

### Другие вопросы для обсуждения

К сожалению, в комментируемой статье по причине отсутствия четкого описания модели встречаются недостаточно обоснованные доводы и утверждения. Несколько примеров:

1. На с. 5 статьи определена функция геометрического распределения  $F(n)$ . Несмотря на использование этого же обозначения в формуле (1\*), очевидно, что это уже другая функция, значение которой по смыслу задачи должно убывать с ростом аргумента. С учетом приведенных границ для величины  $p^\vee(\delta, n)$  можно понять, что соотношение (1\*) с приведенными в нем численными значениями параметров ошибочно по существу.

2. Логика получения неравенства для  $t_{\text{доп}}$  не понятна и не обоснована: сначала из формулы для геометрического распределения по значению  $P$  вычисляются величины  $E$ ,  $D$ , затем распределение  $F(n)$  заменяется некоторым «граничным»  $F^*(n)$ , в котором для оценки  $t_{\text{доп}}$  используется исходное значение  $P$  и «граничное» распределение  $F^*(n)$ .

3. Приведенное на с. 5 в правой колонке верхнее неравенство (названное «модифицированной границей Чебышева») не может быть выведено из неравенства Чебышева [9\*], поскольку оно неверно и остается неверным даже после коррекции  $D^2 \rightarrow D$ , которая необходима для обеспечения масштабирования случайной величины. Дело в том, что для данного случая имеется точное (достижимое всюду при  $x \in [0, \infty)$ ) неравенство, полученное в результате комбинирования границы Маркова и односторонней границы Чебышева (на русском приведено в [1, с. 120]:

$$\Pr\{\xi_x \leq x\} \geq \begin{cases} 0, & \text{если } x < E; \\ 1 - E/x, & \text{если } E \leq x < E + D/E; \\ 1/(1 + D/(x - E)^2), & \text{если } x > E + D/E. \end{cases} \quad (14)$$

Учитывая, что в статье значение параметра  $t_{\text{доп}}$  оценивалось при  $t_{\text{доп}} \leq E$ , из (14) для этого случая можно получить лишь тривиальное условие  $t_{\text{доп}} \geq 0$ , то есть для любых значений

$$E \in (0, \infty), D \in (0, \infty), x \in [0, E)$$

можно указать двухатомное распределение в точках

$$x_1 = x/E + \varepsilon, x_2 = \frac{\left[ m_2 - x_1^2 + \sqrt{(m_2 + x_1^2)^2 - 4x_1(m_2 - x_1 + x_1^2)} \right]}{2(1 - x_1)},$$

где  $m_2 = D/E^2 + 1$ ,  $\varepsilon \in (0, 1 - x/E)$ , соответственно с вероятностями:

$$\Pr\{\xi_x = x_1\} = (x_2 - 1)/(x_2 - x_1);$$

$$\Pr\{\xi_x = x_2\} = (1 - x_1)/(x_2 - x_1),$$

для которого  $\Pr\{\xi_x \leq x\} = 0$  при  $x < E$ .

## Заключение

Приведенные границы для вероятности ошибочного приема при использовании СПИ с двоичными сигналами указывают на возможности и пути повышения помехозащищенности системы, которое может составлять  $\eta \approx 101 \lg(0,5/0,166) \approx 4,8$  дБ (относительно АФПС  $X_K$ ). Следует заметить, что значительная доля этого выигрыша может быть получена за счет использования простых  $k$ -расширений  $\varepsilon$  оптимальных АФПС для  $n = 1, 2, 3$ .

Вопрос о построении АФПС, приближающихся по помехоустойчивости к общей верхней границе [5, 10, 11, 19] в классе алгоритмов с многопозиционными сигналами, остается открытым. К настоящему времени не известно примеров СКК, равно как и алгоритмов обмена с обратным каналом, обеспечивающих уменьшение значения гарантированной вероятности ошибки по отношению к двоичным сигналам в односторонней СПИ.

Весьма актуальным направлением, обобщающим рассмотренную постановку задачи синтеза АФПС, следует считать исследование вероятностно-временных характеристик процесса передачи сообщений (пакетов данных). Перспективность таких исследований обуславливается как практической необходимостью гарантированной передачи сообщений за приемлемое время, так и возможностью построения эффективных алгоритмов обмена данными, учитывающих стратегию ИП на физическом и канальном уровнях СПИ.

При проведении исследований представляется важным авторам обращать внимание на тщательность проработки деталей, проверки хода решений и результатов, а при представлении (публикации) материалов — аккуратное соблюдение этических стандартов, в частности, предписанных журналом.

## Список источников

1. Чуднов А.М. Математические основы моделирования, анализа и синтеза систем. СПб.: ВАС, 2021. 193 с.
2. Чуднов А.М. Помехоустойчивость линий и сетей связи в условиях оптимизированных помех. Л.: ВАС, 1986. 84 с.

3. Чуднов А.М. О минимаксных алгоритмах формирования и приема сигналов // Проблемы передачи информации. 1986. Т. 22. № 4. С. 49–54.
4. Воробьев Н.Н. Основы теории игр. Бескоалиционные игры. М.: Наука, 1984. 496 с.
5. Чуднов А.М. Теоретико-игровые задачи синтеза алгоритмов формирования и приема сигналов // Проблемы передачи информации. 1991. Т. 27. № 3. С. 57–65.
6. Cahn C. Worst interference for coherent binary channel // IEEE Trans. Inform. Theory. 1971. Vol. 19. IT-17. Pp. 209–210.
7. Cahn C. Performance of Digital Matched Filter Correlator With Unknown Interference // IEEE Transactions on Communication Technology. 1971. Vol. 19. No 6. Pp. 1163–1172.
8. Жодзишский Ю.И. Максимальная гарантированная помехоустойчивость приема сигналов при ограничении средней мощности мешающих воздействий // Радиотехника. 1986. № 10. С. 56–57.
9. Чуднов А.М. Помехоустойчивость корреляционного приема псевдослучайных сигналов, модулированных по амплитуде и фазе // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. № 1. С. 62–68.
10. Чуднов А.М., Кирик Д.И., Ермакова Е.М. Оптимизация параметров кода и режима обработки сигналов в условиях преднамеренных помех // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 4. С. 79–86.
11. Чуднов А.М., Кичко Я.В., Сапунова Л.П. Оптимизация гарантированной скорости передачи информации псевдослучайными сигналами с рандомизированной базой в условиях преднамеренных помех // Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68. № 3. С. 263–270.
12. Чуднов А.М., Положинцев Б.И., Кичко Я.В. Анализ помехозащищенности обмена данными группы беспилотных летательных аппаратов в условиях оптимизированных помех // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 12. С. 33–46.
13. Sagduyu Y.E., Berry R.A., Ephremides A. Jamming games in wireless networks with incomplete information // IEEE Commun. Mag. 2011. V. 49. № 8. Pp. 112–118.
14. Han Z., Niyato D., Saad W. et al. Game Theory in Wireless and Communication Networks. Cambridge: Cambridge University Press. 2011. 554 p.
15. Чуднов А.М. Об адаптивных алгоритмах псевдослучайного переключения рабочих частот радиолиний в условиях случайных и преднамеренных помех // Журнал радиоэлектроники ИРЭ. 2015. № 4. С. 1–14.
16. Amuru S, Buehrer R.M. Optimal Jamming Against Digital Modulation // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 2015. Vol. 10. No 10. Pp. 2212–2224.
17. Bayram S., Vanli N.D., Dulek B. et al. Optimum Power Allocation for Average Power Constrained Jammers in the Presence of Non-Gaussian Noise // IEEE Communications Letters. 2012. Vol 16. No 8. Pp. 1153–1156.
18. Вейцель В.А., Жодзишский М.И., Жодзишский Ю.И. Гарантированная помехоустойчивость приема сигналов // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. № 2. С. 316–321.
19. Chen Y., Yuan W., Xu T.. Coding Split and Adjustment to Defend OFDM-IM Against Jamming Attacks // IEEE Communications Letters. 2023. Vol. 27, № 2. Pp. 457–461.
20. Yue G., Wang X. Anti-jamming coding techniques with application to cognitive radio // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2009. Vol. 8. № 12. Pp. 5996–6007.
21. Poisel R.A. Modern Communication Jamming Principles and Techniques, 2-nd edition. Boston-London: Artech House. 2011. 870 p.

## References

1. Chudnov A.M. Mathematical foundations of modeling, analysis and synthesis of systems. St. Petersburg: Military Academy of Telecom. 2021. 193 p.
2. Chudnov A.M. Noise immunity of communication lines and networks under optimized interference conditions. St. Petersburg: Military Academy of Telecom. 84 p.
3. Chudnov A.M. On Minimax Signal Generation and Reception Algorithms // Probl. Peredachi Inf. 1986. V. 22, № 4. Pp. 49–54.
4. Vorobiev N.N. Fundamentals of Game Theory. Non-Cooperative Games. Moscow: Nauka. 1984. 496 p.
5. Chudnov A.M. Game-Theoretical Problems of Synthesis of Signal Generation and Reception Algorithms // Probl. Peredachi Inf., 1991. V. 27. № 3. Pp. 57–65.

6. Cahn C. Worst interference for coherent binary channel. // IEEE Trans. Inform. Theory. 1971. Vol. 19. IT-17. Pp. 209–210.
7. Cahn C. Performance of Digital Matched Filter Correlator With Unknown Interference // IEEE Transactions on Communication Technology. 1971. Vol. 19. No 6. Pp. 1163–1172.
8. Zhodzishsky Yu. I. Maximal guaranteed noise immunity of signal reception with limitation of average power of interfering effects // Radio engineering. 1986. № 10. Pp. 56–57.
9. Chudnov A.M. Noise immunity of correlation reception of pseudo-random signals modulated by amplitude and phase // Radio engineering and electronics. 1987. V. 32. № 1. Pp. 62–68.
10. Chudnov A.M., Kirik D.I., Ermakova E.M. Optimization of code parameters and signal processing mode under conditions of intentional interference // Proceedings of educational institutions of communication. 2019. V. 5. № 4. Pp. 79–86.
11. Chudnov A.M., Kichko Ya.V., Sapunova L.P. Optimization of the guaranteed rate of information transmission by pseudo-random signals with a randomized base under conditions of deliberate interference // Radio engineering and electronics. 2023. V. 68. № 3. Pp. 263–270.
12. Chudnov A.M., Polozhintsev B.I., Kichko Ya.V. Analysis of noise immunity of data exchange of a group of unmanned aerial vehicles under optimized noise conditions // Radio engineering. 2022. V. 86. № 12. Pp. 33–46.
13. Sagduyu Y.E., Berry R.A., Ephremides A. Jamming games in wireless networks with incomplete information // IEEE Commun. Mag. 2011. V. 49. № 8. Pp. 112–118.
14. Han Z., Niyato D., Saad W. et al. Game Theory in Wireless and Communication Networks. Cambridge: Cambridge University Press. 2011. 554 p.
15. Chudnov A.M. On adaptive Frequency-hopping spread spectrum algorithms of radio lines under random and deliberate interference // Journal of Radio Electronics IRE. 2015. № 4. Pp. 1–14.
16. Amuru S, Buehrer R. M. Optimal Jamming Against Digital Modulation // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 2015. Vol. 10. No 10. Pp. 2212–2224.
17. Bayram S., Vanli N. D., Dulek B. et al. Optimum Power Allocation for Average Power Constrained Jammers in the Presence of Non-Gaussian Noise // IEEE Communications Letters. 2012. Vol. 16. No 8. Pp. 1153–1156.
18. Veitsel V.A., Zhodzishsky M. I., Zhodzishsky Yu.I. Guaranteed noise immunity of signal reception // Radio engineering and electronics. 1987. V. 32. № 2. Pp. 316–321.
19. Chen Y., Yuan W., Xu T.. Coding Split and Adjustment to Defend OFDM-IM Against Jamming Attacks // IEEE Communications Letters. 2023. Vol. 27. № 2. Pp. 457–461.
20. Yue G., Wang X. Anti-jamming coding techniques with application to cognitive radio // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2009. Vol. 8. № 12. Pp. 5996–6007.
21. Poisel R.A. Modern Communication Jamming Principles and Techniques. Boston-London: Artech House. 2011. 870 p.

УДК 621.314

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_31

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ, РЕАЛИЗУЮЩЕГО МЕТОДИКУ  
ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**  
**DEVELOPMENT OF A PROGRAM MODULE REALIZING THE METHODOLOGY  
OF POWER TRANSFORMER FAULT IDENTIFICATION**

*Д-р техн. наук И.А. Меделяев, д-р техн. наук Д.В. Макаров, М.С. Шопик*

*D.Sc. I.A. Medelyaev, D.Sc. D.V. Makarov, M.S. Shopik*

*Военная академия Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого*

В статье раскрывается вопрос оптимизации процесса сбора и обработки информации об отказах силовых трансформаторов и другого оборудования энергоблоков электростанций и подстанций, для чего была разработана программа для электронно-вычислительных машин, которая формирует архив отказов, выполняет статистическую обработку архивных данных и рассчитывает среднее время наработки на отказ. Раскрыт процесс работы данной программы для электронно-вычислительных машин и подробно описаны алгоритмы, по которым осуществляется реализация методики идентификации неисправностей с привязкой по фактору времени, номеру силового трансформатора и месту возникновения, с их подробным описанием для осуществления дальнейшего наиболее полного и достоверного анализа технического состояния силовых трансформаторов и прогноза по их дальнейшей эксплуатации.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, алгоритм, неисправность, программа ЭВМ, методика идентификации.

The article reveals the issue of optimizing the process of collecting and processing information on failures of power transformers and other equipment of power units of power plants and substations, for which a program for electronic computers has been developed, which forms an archive of failures, performs statistical processing of archive data and calculates the average time to failure. The process of work the given program for electronic-computing machines is disclosed and algorithms are described in detail, according to which realization of methodology of identification of failures with reference to time factor, number of power transformer and place of occurrence is carried out, with their detailed description for realization of the further most complete and reliable analysis of technical condition of power transformers and forecast on their further operation.

**Keywords:** power transformer, algorithm, fault, computer program, identification technique.

В связи со сложной геополитической ситуацией в мире, в условиях проведения Специальной военной операции Российской Федерацией, актуальность сохранения целостности нашей

страны и отстаивание ее интересов никуда не исчезает.

В современных условиях, когда более 50 % силового электрооборудования различных

объектов достигло нормативного срока эксплуатации, а его обновление происходит низкими темпами, основной задачей становится продление срока службы оборудования вплоть до выработки реального, заложенного при изготовлении, ресурса [1–3].

При этом на первый план выходят методы контроля состояния оборудования на месте его установки под рабочим напряжением. Внедрение средств технического диагностирования состояния маслonaполненного электрооборудования (трансформаторов, автотрансформаторов, реакторов) является актуальной и остро необходимой задачей. Это обусловлено рядом объективно сложившихся причин, основной из которых является физический износ, достигающий 50–70 % [4–6].

Целью сбора информации об аварийных отключениях является их распределение по группам и определение характерных неисправностей, возникающих в трансформаторах. Результатом данной статьи должны стать алгоритмы обработки данных об отказах силовых трансформаторов по различным факторам [6–9].

Однако обработка «вручную» объемной информации об аварийных отключениях и их причинах требует больших усилий и временных затрат. С целью их минимизации данных затрат появилась необходимость разработки специализированного программного обеспечения для автоматизированной обработки данных о неисправностях и причинах их возникновения.

### **Основной алгоритм программы сбора и статистической обработки данных об отказах**

Для оптимизации процесса сбора и обработки информации об отказах силовых трансформаторов и другого оборудования энергоблоков электростанций была разработана программа для ЭВМ. Данная программа формирует архив отказов, выполняет статистическую обработку архивных данных и рассчитывает среднее время наработки на отказ. Основной алгоритм программы приведен на рис. 1. Для работы алгоритма необходимы входные данные: информация о произошедшем отказе в силовом трансформаторе. Ввод данных осуществляется непосредственно в программе (блок 1). Данные вводятся в следующем формате: YYYYMMDD.NN.Cause,

где YYYYMMDD — дата возникновения отказа: год, месяц и число, введенные без пробелов; NN — номер трансформатора либо энергоблока, в котором произошел отказ оборудования; Cause — причина отказа, представляющая собой строку длиной до 50 символов [10, 11].

Данные сохраняются в файле архива Archive.dat. На экран выводится следующая информация о файле архива: имя файла, количество записей в нем, первая и последняя даты (блок 2). Ввод данных осуществляется до тех пор, пока оператор не ответит положительно на запрос об обработке данных (блок 3).

В случае положительного ответа выполняются сортировка и обработка сохраненных данных по дате: определяется суммарное число отказов в течение каждого года, а также распределение этих отказов по обследуемым объектам. Затем рассчитываются статистические показатели (математическое ожидание и дисперсия) для каждого года. Отсортированные статистические данные сохраняются в файлах SortArchive.dat и StatData.dat соответственно (блоки 4–5).

На следующем этапе аналогичная статистическая обработка данных осуществляется по номеру трансформатора. Данные сохраняются в файлах SortTrans.dat и StatTrans.dat (блок 6).

Далее оператору поступает запрос на детализацию одного из годов. В случае положительного ответа подсчитывается количество отказов трансформаторов в каждом месяце выбранного года. Результаты сохраняются в файле SortArchiveYear.dat (блок 7).

Затем данные сортируются по причине (месту возникновения) отказа: определяется суммарное число отказов по данной причине и их распределение по трансформаторам. Данные подвергаются статистической обработке. Результаты сохраняются в файлах SortCause.dat и StatCause.dat соответственно (блок 8).

После выполнения всех статистических расчетов выполняется расчет среднего времени наработки на отказ трансформаторов всех энергоблоков. Рассчитанные значения сохраняются в файле Totk.dat и выводятся на экран (блок 9).

На завершающем этапе на экране строятся диаграммы, отображающие распределение количества отказов по годам, по трансформаторам, по причинам возникновения, а также строится диаграмма распределения количества отказов

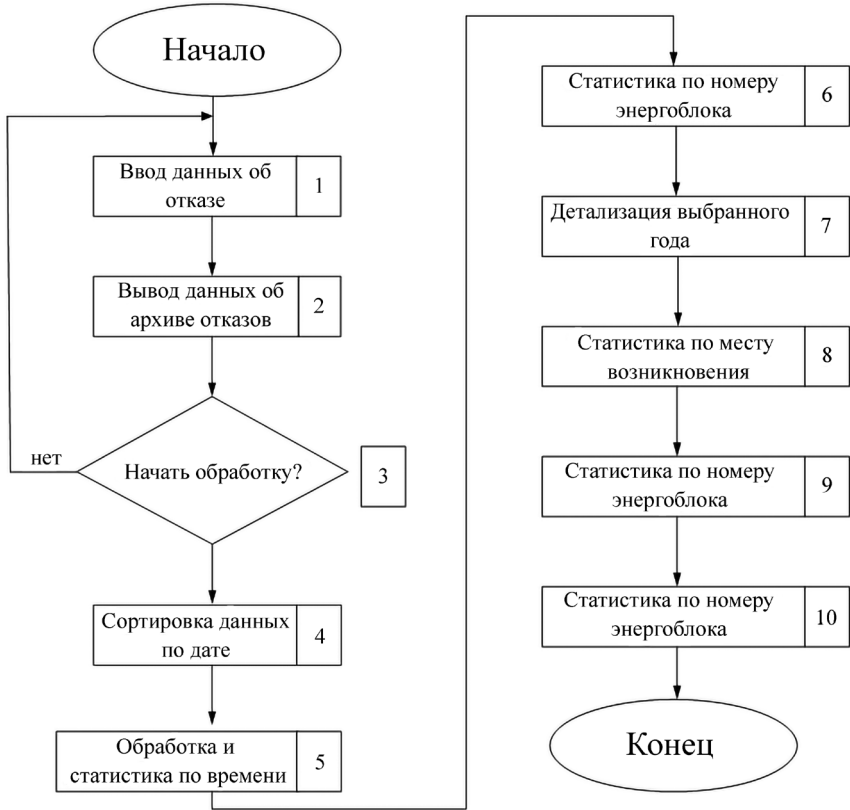


Рис. 1. Основной алгоритм программы сбора и статистической обработки данных об отказах

по месяцам года, выбранного для детализации (блок 10).

**Алгоритм обработки данных об отказах по фактору времени и номеру трансформатора**

В основном блоке программы производится сортировка данных об отказах по дате. Для того чтобы оценить зависимость количества отказов от времени и номера трансформатора, рассчи-

тать числовые характеристики полученных распределений и получить графическое представление собранных данных, необходимо отсортированный массив обработать и представить в виде, показанном на рис. 2. Для этого был разработан алгоритм обработки данных, представленный на рис. 3.

В блоках 1 и 2 алгоритма задаются начальные значения переменных  $i$ ,  $k$  и  $str$ . В блоке 3 выполняется проверка равенства текущего года

|       | Число отказов трансформатора энергоблока 1 | Число отказов трансформатора энергоблока 2 | ... | Число отказов трансформатора энергоблока $i$ | Суммарное число отказов |
|-------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-----|----------------------------------------------|-------------------------|
| год_1 |                                            |                                            |     |                                              |                         |
| год_2 |                                            |                                            |     |                                              |                         |
| ...   |                                            |                                            |     |                                              |                         |
| год_к |                                            |                                            |     |                                              |                         |

Рис. 2. Представление данных об отказах для последующей статистической обработки

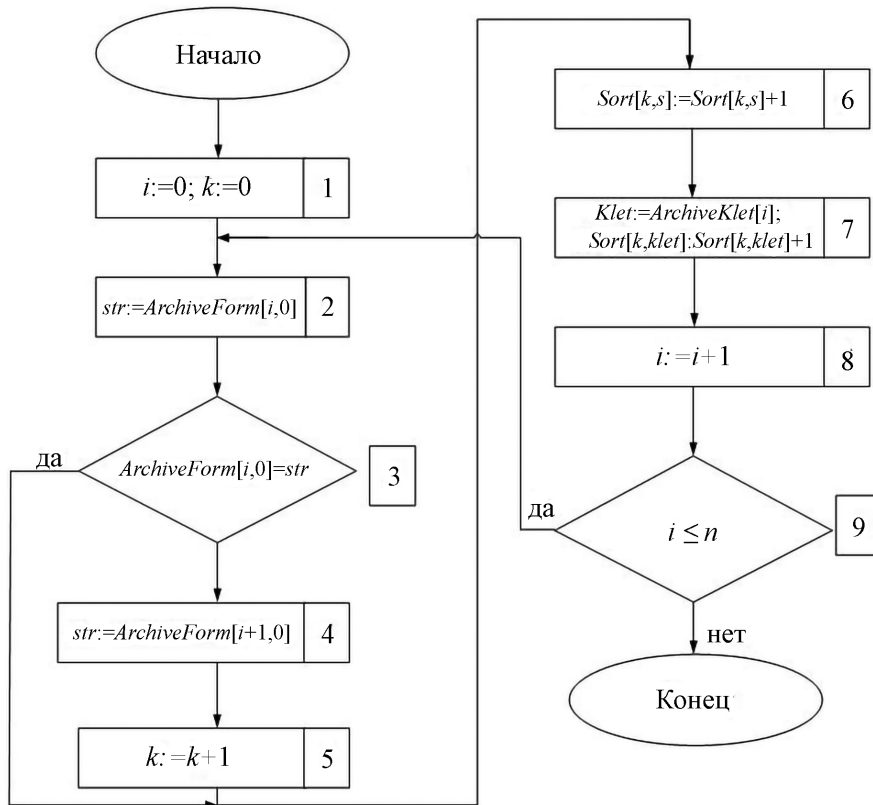


Рис. 3. Алгоритм обработки данных об отказах по фактору времени и номеру трансформатора

$str$  и года записи в массиве отсортированных данных  $ArchiveForm[i,0]$ . Если условие выполняется, то суммарное количество отказов в этом году увеличивается на единицу (блок 6). В блоке 7 выполняется поиск номера трансформатора, в котором произошел данный отказ, и количество отказов в данном трансформаторе также увеличивается на один. Если условие не выполняется, то значение текущего года изменяется на следующее (блок 4), счетчик годов  $k$  увеличива-

ется (блок 5), и после этого выполняются операции, показанные в блоках 6, 7.

После завершения обработки текущей записи алгоритм переходит к обработке следующей (блок 8). Обработка осуществляется до тех пор, пока не будут проверены все записи (блок 9). Результаты выполнения данного алгоритма передаются в основной алгоритм, где полученный массив сохраняется и подвергается статистическому анализу.

| Характер неисправности                           | Число отказов трансформатора_1 | ... | Число отказов трансформатора_i | Суммарное число отказов |
|--------------------------------------------------|--------------------------------|-----|--------------------------------|-------------------------|
| Износ изоляции обмоток                           |                                |     |                                |                         |
| Пробой изоляции отводов                          |                                |     |                                |                         |
| Пробой внутренней изоляции высоковольтных вводов |                                |     |                                |                         |
| Повреждения РПН                                  |                                |     |                                |                         |
| ...                                              |                                |     |                                |                         |
| Прочие причины                                   |                                |     |                                |                         |

Рис. 4. Представление данных для последующей статистической обработки

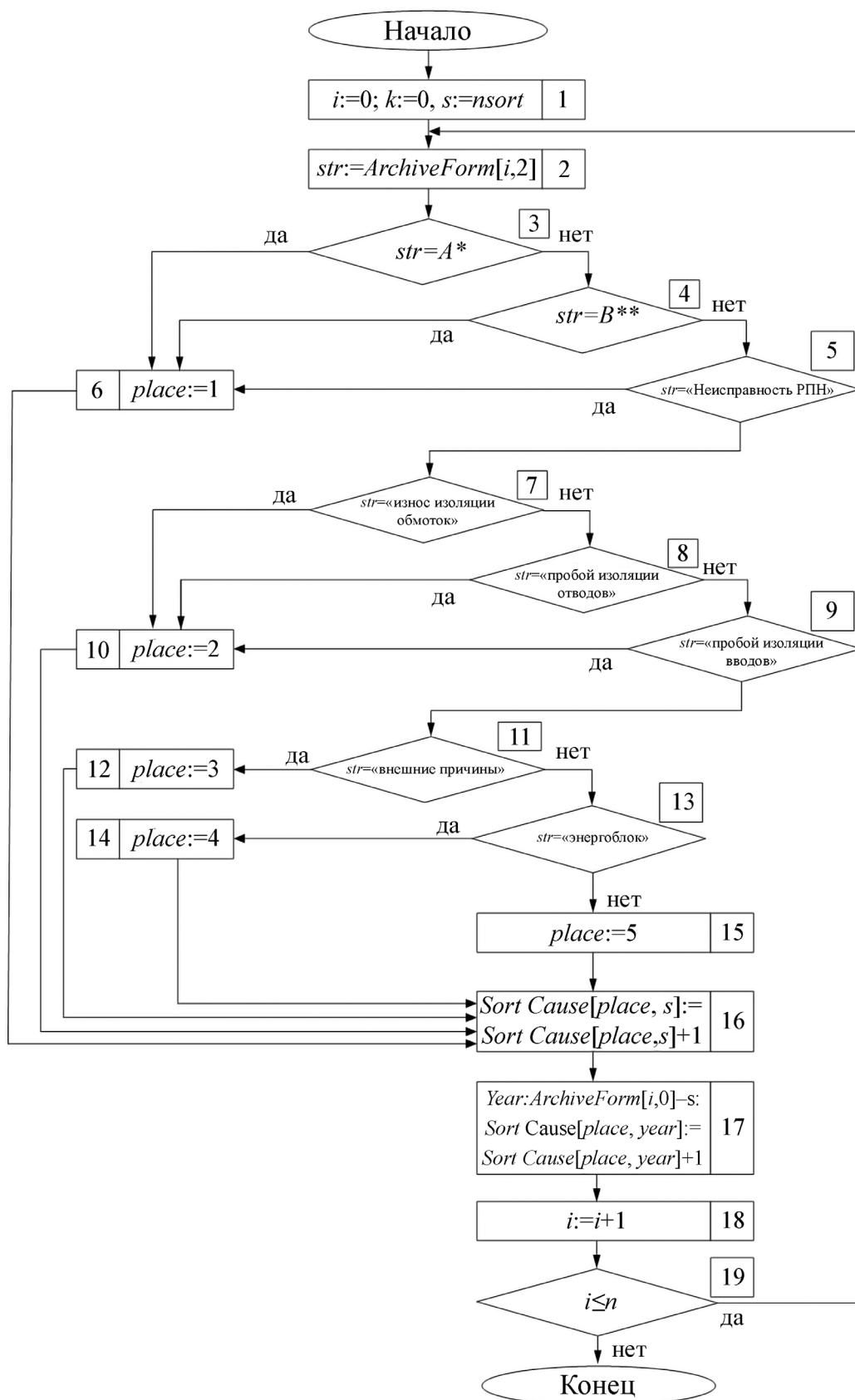


Рис. 5. Алгоритм обработки данных об отказах по месту возникновения

### Алгоритм обработки данных по месту возникновения отказа

Для того чтобы оценить распределение количества отказов в зависимости от места их возникновения, рассчитать числовые характеристики полученного распределения и получить графическое представление собранных данных необходимо отсортированный массив обработать и представить в виде, показанном рис. 4. Для этого был разработан алгоритм обработки данных, представленный на рис. 5.

Для работы алгоритма необходимы входные данные:

*ArchiveForm*[*i*,0] — нулевой столбец массива с отсортированными данными, содержащий информацию о годах;

*ArchiveForm*[*i*,2] — столбец массива с отсортированными данными, содержащий информацию о причинах отказов;

*n* — общее число записей в массиве с отсортированными данными;

*nsort* — число лет.

В алгоритме приняты следующие обозначения:

*i* — номер текущей записи в массиве отсортированных данных об отказах;

*place* — индекс, обозначающий место возникновения отказа;

*s* — номер столбца, в который вносится сумма отказов в месте возникновения *place*;

*year* — год;

*str* — текущая причина отказов;

*SortCause*[*place*,*year*] и *Sort Cause*[*place*,*s*] — значения массива, содержащие количество отказов в году *year* и суммарное количество отказов в месте возникновения *place*.

В блоке 1 алгоритма задается начальное значение переменной *i*. В блоке 2 считывается текущая причина возникновения отказа трансформатора. В блоках 3–5 выполняется сравнение текущего значения причины отказа с возможными причинами отказов. Если хотя бы одно условие выполняется, то индексу *place*, обозначающему место возникновения отказа, присваивается значение «1» (блок 6). В противном случае проверка продолжается и в блоках 7–9 проверяется, не относится ли текущая причина отказа к пробоем изоляции. Если условие выполняется, то индексу *place* прис-

ваивается значение «2» (блок 10). Если условия блоков 7–9 не выполняются, то в блоке 11 проверяется условие равенства текущей причины отказов значению «внешние причины». При выполнении этого условия индексу *place* присваивается значение «3» (блок 12). В противном случае алгоритм проверяет текущую причину отказов на соответствие значению «энергоблок» (блок 14), и индексу *place* присваивается значение «4» в случае равенства сравниваемых причин (блок 14) и значение «5» (прочие причины) в случае невыполнения условия (блок 15).

*A\** = 'неисправность внешних соединений';

*B\*\** = 'неисправность системы вентиляции'.

После выполнения блоков 3–15 и определения места возникновения отказов суммарное количество отказов в данном месте возникновения увеличивается на единицу (блок 16). В блоке 17 выполняется поиск года, в котором произошел данный отказ, и количество отказов в данном году также увеличивается на один.

После завершения обработки текущей записи алгоритм переходит к обработке следующей (блок 18). Обработка осуществляется до тех пор, пока не будут проверены все записи (блок 19). Результаты выполнения данного алгоритма передаются в основной алгоритм, где полученный массив сохраняется и подвергается статистическому анализу.

Таким образом, разработанная и описанная в данной статье программа для ЭВМ позволяет осуществлять оптимизацию процесса сбора и обработки информации об отказах силовых трансформаторов и другого оборудования энергоблоков электростанций и подстанций, формировать архив отказов, выполнять статистическую обработку архивных данных и рассчитывать среднее время наработки на отказ, что позволяет проводить наиболее полный и достоверный анализ технического состояния силовых трансформаторов и делать прогноз по их дальнейшей эксплуатации [11].

### Список источников

1. Блок В.М. Электрические сети и системы. М.: Высшая школа, 1986. 430 с.

2. Методические указания по диагностике силовых трансформаторов, автотрансформаторов, шунтирующих реакторов и их вводов. МУ 0634–2006. Москва, Федеральное агентство по атомной энергетике. 2006. 60 с.

3. Трубицин В.И. Теория надежности в вопросах эксплуатации и проектирования электрической части станций: учеб. пособие. М.: МЭИ, 1989. 64 с.

4. Руководство по эксплуатации прибора локализации частичных разрядов (акустическим методом) AR-700. Пермь, 2006. 49 с.

5. Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Мостовой С.Е. и др. Внедрение систем диагностирования технического состояния высоковольтных силовых трансформаторов // Сталь. 2009. № 3. 94 с.

6. РД ЭО 0188-00. Методические рекомендации по диагностике электрических аппаратов, распределительных устройств электростанций и подстанций. Москва.

7. Алексеев Б.А. Новое в энергетике: трансформаторы // Энергетика за рубежом. 2005. № 6. С. 40–53.

8. Аксенов Ю.П. Мониторинг технического состояния высоковольтной изоляции электрооборудования энергетического назначения в эксплуатации и при ремонтах: учеб. пособие. М.: Научтехлитиздат, 2002. 338 с.

9. Киреева Э.А. Диагностика силовых трансформаторов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2008. № 9. С. 59–65.

10. Хренников А.Ю., Гольдштейн В.Г., Назарычев А.Н. Диагностические модели для оценки технического состояния электрооборудования электростанций и подстанций // Промышленная энергетика. 2010. № 10. С. 17–20.

11. Правила устройства электроустановок. М.: Эксмо, 2023. 512 с.

## References

1. Block V.M. Electric networks and systems. M.: Vyssh. shk., 1986. 430 p.

2. Methodical instructions for diagnostics of power transformers, autotransformers, shunt reactors and their types. MU 0634–2006. Moscow, 2006. 60 p.

3. Trubitsin V.I. Reliability theory in the issues of operation and design of the electrical part of stations: textbook. Moscow: MEI, 1989. 64 p.

4. Operation Manual of the partial discharge locator (acoustic method) AR-700. Perm, 2006. 49 p.

5. Karandaev A.S., Evdokimov S.A. Implementation of systems of diagnostics of technical condition of high-voltage power transformers // Steel, 2009. № 3. 94 p.

6. RD EO 0188-00. Methodical recommendations on diagnostics of electrical apparatuses, switchgears of power stations and substations. Moscow.

7. Alekseev B.A. New in power engineering: transformers // Energetics abroad. 2005. № 6. Pp. 40–53.

8. Aksenov Yu.P. Monitoring of technical condition of high-voltage insulation of electrical equipment of power engineering purpose in operation and during repairs. M.: Nauchtekhizdat, 2002. 338 p.

9. Kireeva E.A. Diagnostics of power transformers // Electrical equipment: operation and repair. 2008. № 9. Pp. 59–65.

10. Khrennikov A.Yu., Goldstein V.G., Nazarychev A.Yu. Diagnostic models for evaluating the technical condition of electrical equipment of power plants and substations // Industrial Energy. 2010. № 10. Pp. 17–20.

11. Rules for the construction of electrical installations. M.: EXMO, 2023. 512 p.

УДК 519.8

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_38

**МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕН ПРОЛЕТОВ КОСМИЧЕСКИХ  
АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ,  
ДВИЖУЩИХСЯ ПО КРУГОВЫМ ОРБИТАМ НАД ЗОНОЙ ЭКСТРЕННОГО  
ОПОВЕЩЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ**

**MODEL FOR DETERMINING FLIGHT TIMES OF EARTH REMOTE SENSING  
SPACECRAFT MOVING IN CIRCULAR ORBITS OVER THE EMERGENCY  
PUBLIC WARNING AREA**

*Д-р техн. наук Е.П. Минаков, канд. техн. наук М.А. Александров, А.В. Мищеряков,  
канд. техн. наук А.М. Зубачев*

*D.Sc. E.P. Minakov, Ph.D. M.A. Aleksandrov, A.V. Mishcheryakov, Ph.D. A.M. Zubachev*

*Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского*

В статье рассматривается вопрос определения времен пролетов орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, движущихся по круговым орбитам, над зоной экстренного оповещения населения (территорией, подверженной риску возникновения быстро развивающихся во времени и пространстве опасных природных явлений и техногенных процессов, представляющих непосредственную угрозу жизни и здоровью находящихся на ней людей). В рамках решения задачи разработан алгоритм определения времен пролета орбитальной группировки, выполнены вычислительные эксперименты, получены пессимистические оценки максимального числа пролетов заданной орбитальной группировки космических аппаратов и установлены временные разрывы в наблюдаемости зоны экстренного оповещения. В основе алгоритма и модели лежит графо-аналитический метод исследования движения космических аппаратов с применением основных теорем сферической тригонометрии.

**Ключевые слова:** зона экстренного оповещения населения, наземный подвижный объект, время пролета орбитальной группировки.

The article considers the issue of determining the flight times of the orbital constellation of Earth remote sensing spacecraft moving in circular orbits over the emergency warning zone of the population (the territory at risk of the occurrence of dangerous natural phenomena and technogenic processes rapidly developing in time and space, posing an immediate threat to the life and health of people on it). As part of solving the problem, an algorithm for determining the flight times of the orbital constellation was developed, computational experiments were performed, pessimistic estimates of the maximum number of flights of a given orbital constellation of spacecraft were obtained, and time gaps in the observability of the emergency warning zone were established. The algorithm and model are based on a graph-analytical method for studying the motion of spacecraft using the basic theorems of spherical trigonometry.

**Keywords:** emergency public warning area, ground mobile object, orbital group flyby time.

## Введение

В Российской Федерации ежегодно происходит большое количество чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера (пожары, наводнения, утечки компонентов топлива) приводящие как к жертвам среди мирного населения так и к ущербу различному имуществу. Для предотвращения жертв и ущерба необходимо своевременное проведение спасательных работ в полном объеме. Успешное проведение спасательных работ достигается:

- своевременной организацией и непрерывным ведением разведки (всех видов и средств), с добыванием ею достоверных данных к установленному сроку;
- быстрым вводом формирований в очаги ЧС для выполнения задач;
- высоким профессионализмом и психологической стойкостью личного состава;
- знанием и строгим соблюдением личным составом правил и мер безопасности при выполнении работ;
- заблаговременным изучением командирами формирований особенностей выполнения работ на объектах [1].

Спасение людей при чрезвычайных ситуациях — это действия по эвакуации людей из зоны, где имеется вероятность воздействия на них опасных факторов чрезвычайных ситуаций в безопасную зону. Спасательные работы включают:

- разведку (доразведку) маршрутов движения и участков работ;
- локализацию и тушения пожаров на маршрутах движения и участках работ;

– розыск пострадавших и извлечение их из поврежденных и горящих зданий, загазованных, затопленных и задымленных помещений, завалов;

– вывоз (вывод) населения из опасных мест (зон экстренного оповещения) в безопасные районы [1].

Определение данных для маршрутизации и планирования движения наземных подвижных объектов (организованных групп осуществляющих вывоз или вывод населения), должно осуществляться с применением всех видов средств наблюдения в том числе с использованием космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), с целью постоянного мониторинга развития ЧС и маршрутов эвакуации. Требуется определение времен пролет над участками путей наземных подвижных объектов (НПО). В связи с тем, что для подавляющего числа КА ДЗЗ орбиты могут считаться круговыми, это позволяет использовать элементы сферической тригонометрии для определения времен их пролетов над участками путей НПО и делает актуальным разработку и апробацию соответствующей модели.

## Постановка задачи

Рассмотрим три конструктивно разных типа КА ДЗЗ, применяемых по областям расположенным на поверхности Земли [2, 3, 6]:

1) при требуемой ориентации и переориентации оси визирования аппаратуры, реализуемое на КА, оснащенных оптико-электронной аппаратурой (рис. 1, а);

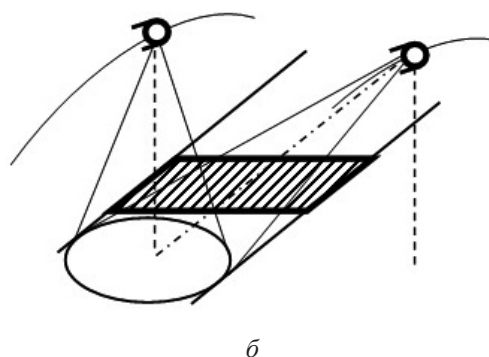
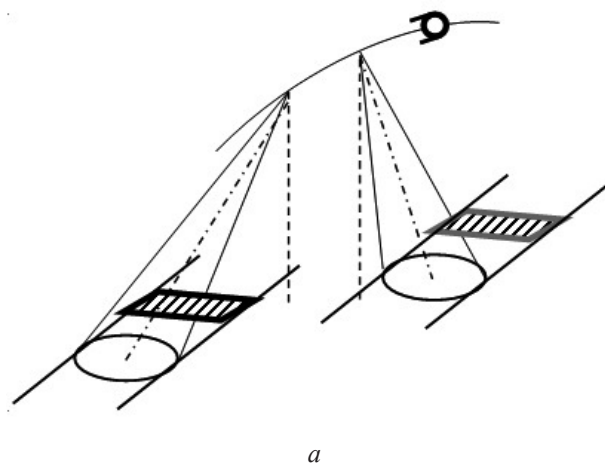


Рис. 1. Применение разнотипных КА ДЗЗ

2) при постоянной ориентации оси визирования аппаратуры в Надир, реализуемое на КА с радиолокационной аппаратурой (рис. 1, б);

3) при постоянной ориентации оси визирования аппаратуры по углу крена, реализуемое на КА с радиолокационной аппаратурой (рис. 1, б).

Расчет углового размера зоны обнаружения (ЗО) КА ДЗЗ может быть осуществлен по универсальной формуле (рис. 2) [6, 10]:

$$\varphi_{3j} = \pi / 2 - (\gamma_j + \beta_j) - \arccos \frac{R_3 + H_j}{R_3 \cdot \sin(\gamma_j + \beta_j)},$$

где  $\gamma_j$  — половина угла ЗО аппаратуры ДЗЗ  $\gamma_j = \text{const}$ ;

$\beta_j$  — половина угла крена аппаратуры ДЗЗ ( $\beta_j = \text{var}$  для КА первого типа;  $\beta_j = 0^0$  для КА второго типов;  $\beta_j \neq 0^0 = \text{const}$  для КА третьего типа).

Рис. 2, а соответствует КА первого и второго типов, рис. 2, б — КА первого и третьего типов.

В том случае, если задается линейный размер «кадра» КА ДЗЗ, соответствующий ширине мгновенной полосы обзора —  $L$ , пересчет его в угловой размер при использовании сферической модели поверхности Земли с радиусом  $R_3$  для всех типов КА может быть осуществлен по формуле:

$$\varphi_3 = L / (2 \cdot R_3).$$

Задача определения времен пролетов КА ДЗЗ, движущихся по круговым орбитам, над

участком пути НПО имеет следующую формулировку.

Пусть заданы (рис. 3):

1) участок пути НПО, моделируемый ортодромией с исходной точкой (ИТ) —  $A(\psi_A, \lambda_A, T_A)$  и конечной точкой (КТ) —  $B(\psi_B, \lambda_B, T_B)$ , где  $\psi_A$  — широта точки А в Гринвичской системе координат,  $\lambda_A$  — долгота точки А в Гринвичской системе координат,  $T_A$  — московское декретное время начала движения НПО из точки А;  $\psi_B, \lambda_B$  — аналогичные параметры для точки Б;  $T_B$  — время окончания движения НПО в точке Б [3, 11];

2) группировка КА ДЗЗ:

— общее количество КА —  $M$ ;

— параметры движения каждого  $j$ -го КА по круговой орбите —  $B_j = \langle H_j, i_j, L_{oj}, t_{oj} \rangle$ ,

где  $H_j$  — высота полета;  $i_j$  — наклонение орбиты;  $L_{oj}$  — долгота восходящего узла орбиты на начальном витке в Гринвичской системе координат;  $t_{oj}$  — московское декретное время пролета восходящего узла орбиты на начальном витке:  $t_{oj} \geq T_A$  и  $t_{oj} - T_A = \text{min}$ ;

— технические характеристики (ТХ) по каждому  $j$ -го КА —  $A_j = \langle \gamma_j, \beta_j \rangle$ , где  $\gamma_j$  — угол полураствора ЗО бортовой аппаратуры ДЗЗ;  $\beta_j$  — предельный угол крена оси визирования бортовой аппаратуры ДЗЗ;

3) долготы —  $L_{nj}$  и времена пролетов КА —  $t_{nj}$  восходящих узлов орбит на интервале времени  $[T_A, T_B]$ ;

— пусть моделирование движения  $j$ -го КА ДЗЗ осуществляется в рамках Кеплеровой теории с гравитационной постоянной Земли —  $K_3 = 398600,44 \text{ км}^3/\text{с}^2$  для ее сферической поверхности с радиусом  $R_3 = 6371 \text{ км}$  при рав-

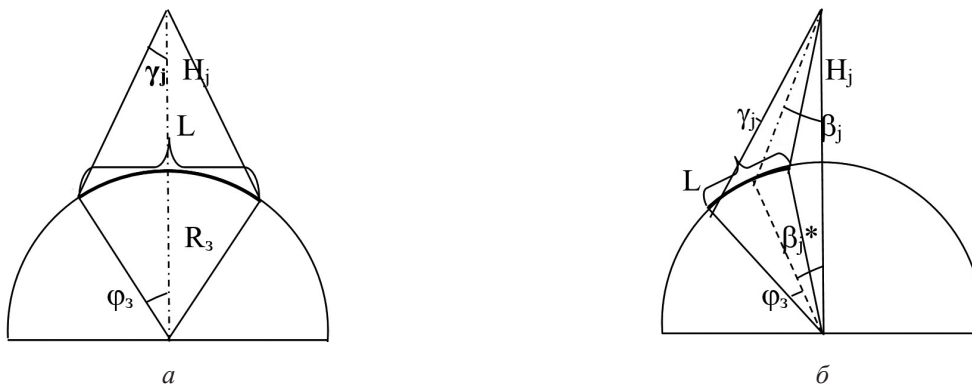


Рис. 2. Зоны обнаружения КА ДЗЗ

номерном вращении Земли вокруг своей оси с угловой скоростью  $\omega_3 = 7,2921150 \cdot 10^{-5}$  1/с [4];

– по указанным исходным данным при принятых допущениях требуется определить времена пролетов каждого  $j$ -го КА ДЗЗ над участком пути НПО в Зените —  $t_{nj}^{нз}$  и соответствующие времена и окончания начала обзора  $t_{nj}^{нн}$  и  $t_{nj}^{нк}$ .

### Алгоритм определения времен пролетов КА ДЗЗ, движущихся по круговым орбитам, над участком пути НПО

Пусть методом наклонных проекций по каждому  $j$ -му КА ДЗЗ определены долготы левой и правой границ наклонных проекций на экватор Земли  $\lambda_{лj}^в$  и  $\lambda_{пj}^в$  для восходящих ветвей и  $\lambda_{лj}^н$  и  $\lambda_{пj}^н$  для нисходящих ветвей траектории [5].

Пусть угловой размер ортодромии пути НПО не превосходит  $\pi$ .

Для определения  $t_{nj}^{нз}$ ,  $t_{nj}^{нн}$  и  $t_{nj}^{нк}$  может быть использован алгоритм, включающий в себя следующие этапы:

1) определение углового размера ортодромии пути НПО —  $s_{AB}$  по теореме косинусов для сферических треугольников [9] (рис. 4):

$$\cos s_{AB} = \sin \psi_A \cdot \sin \psi_B + \cos \psi_A \cdot \cos \psi_B \cdot \cos(\lambda_A - \lambda_B);$$

2) вычисление углового размера дуги — продолжения ортодромией пути и дугой экватора Земли —  $s_1$  двойным применением правила Непера [5, 9] (рис. 5, 6)

$$\sin \alpha = \sin \psi_A / \sin s_1;$$

$$\operatorname{ctg} s_1 = (\sin \psi_B / \sin \psi_A - \cos s_{AB}) / \sin s_{AB};$$

3) расчет угла между ортодромией пути НПО и дугой экватора Земли —  $\alpha$ ;

$$\sin \alpha = \sin \psi_A / \sin s_1;$$

4) определение дуги экватора Земли между точкой пересечения продолжения ортодромией пути экватора Земли и меридианом точки А —  $\Delta \lambda_1$  по правилу Непера (рис. 3):

$$\begin{cases} \sin \Delta \lambda_1 = \operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \psi_A; \\ \operatorname{tg} \Delta \lambda_1 = \cos \alpha / \operatorname{ctg} s_1; \end{cases}$$

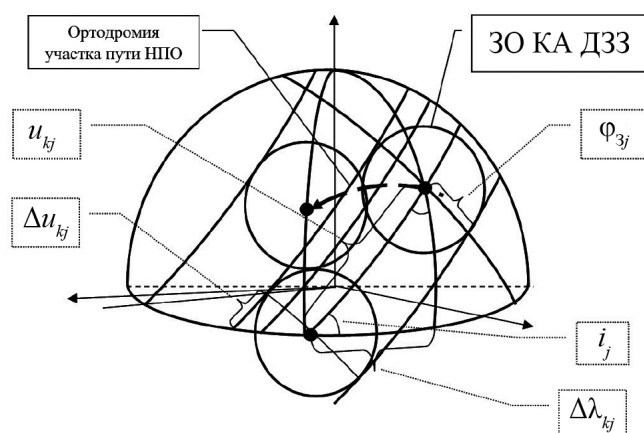


Рис. 3. Параметры покрытия точек А и Б ЗО КА ДЗЗ

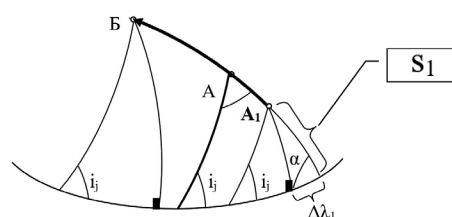


Рис. 4. К определению  $s_{AB}$ ,  $\alpha$ ,  $s_1$

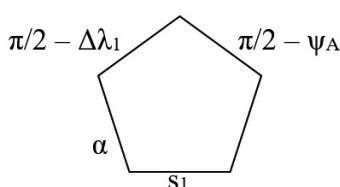


Рис. 5. Пятиугольник Непера для  $s_1$

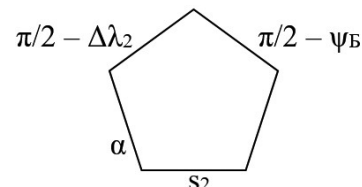


Рис. 6. Пятиугольник Непера для  $s_2$

5) вычисление долготы точкой пересечения продолжения ортодромией пути экватора Земли и меридианом точки А —  $\lambda^\alpha$

$$\lambda^\alpha = \lambda_A + \Delta\lambda_1;$$

6) расчет углового размера дуги между точкой пересечения продолжения ортодромией пути экватора Земли и меридианом точки А и долготой пролета  $j$ -го КА ДЗЗ восходящего узла орбиты на  $n$ -м витке:

$$\Delta\lambda_{nj}^\alpha = \lambda^\alpha - L_{nj};$$

7) определение угла между ортодромией участка пути и ортодромией между восходящим узлом орбиты и точкой пересечения ее ортодромии участка пути  $j$ -го КА ДЗЗ по теореме косинусов для сферических треугольников [5, 9] —  $A_1$ :

$$\cos A_1 = -\cos i_j \cdot \cos \alpha + \sin i_j \cdot \sin \alpha \cdot \cos \Delta\lambda_{nj}^\alpha;$$

8) расчет центрального угла отклонения оси визирования для КА первого и третьего типов (рис. 2, а):

$$\beta_j^* = \pi/2 - \beta_j - \arccos((H_j + R_3)/R_3 \cdot \sin \beta_j);$$

9) вычисление углового размера ортодромии между восходящим узлом орбиты и точкой пересечения ее ортодромии участка пути  $j$ -го КА ДЗЗ по теореме синусов для сферических треугольников —  $u_{\Lambda nj}$  [5, 8, 9]:

а) при ориентации оси визирования в Надир

$$\sin u_{\Lambda nj} = \sin \alpha \cdot \sin \Delta\lambda_{nj}^\alpha / \sin A_1;$$

б) при ориентации оси визирования под углом  $\beta_j$  для прямого наклонения  $j$ -го КА ДЗЗ (рис. 7, а, 8):

$$\sin \Delta\beta_j = \operatorname{ctg} i_j \cdot \operatorname{tg} \beta_j;$$

— при ориентации оси визирования вправо по направлению полета КА ДЗЗ

$$u_{\Lambda nj}^{\text{ПП}} = u_{\Lambda nj} - \Delta\beta_j;$$

— при ориентации оси визирования влево по направлению полета КА ДЗЗ

$$u_{\Lambda nj}^{\text{ЛП}} = u_{\Lambda nj} + \Delta\beta_j;$$

в) при ориентации оси визирования под углом  $\beta_j$  для обратного наклонения  $j$ -го КА ДЗЗ (рис. 7, б, 9):

$$\sin \Delta\beta_j = -\operatorname{ctg} i_j \cdot \operatorname{tg} \beta_j$$

— при ориентации оси визирования вправо по направлению полета КА ДЗЗ

$$u_{\Lambda nj}^{\text{ПО}} = u_{\Lambda nj} + \Delta\beta_j;$$

— при ориентации оси визирования влево по направлению полета КА ДЗЗ

$$u_{\Lambda nj}^{\text{ЛО}} = u_{\Lambda nj} - \Delta\beta_j;$$

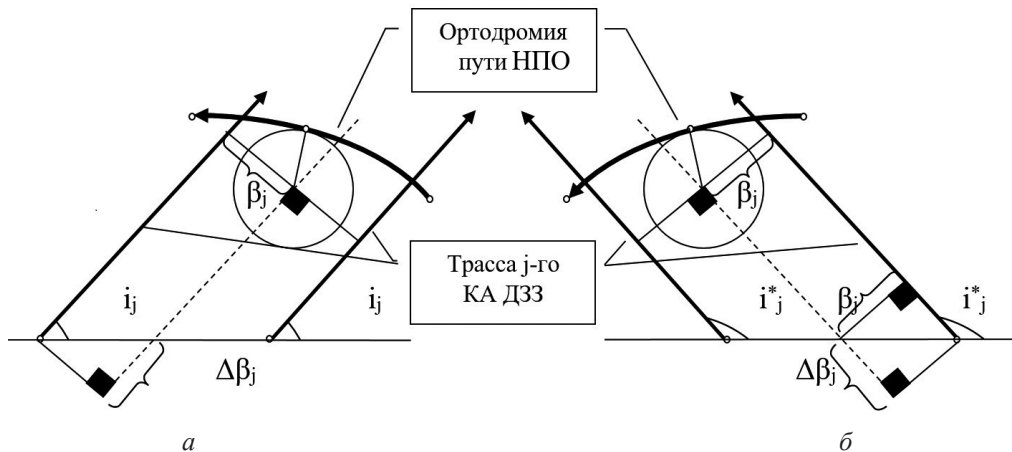


Рис. 7. Ориентация оси визирования КА ДЗЗ

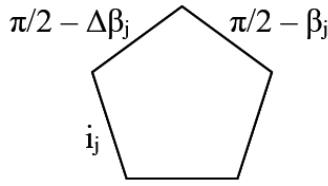


Рис. 8. Пятиугольник Непера для  $\Delta\beta_j$

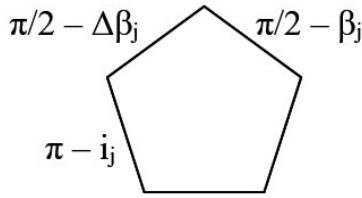


Рис. 9. Пятиугольник Непера для  $\Delta\beta_j$  для обратного наклонения  $j$ -го КА ДЗЗ

10) расчет периода обращения  $T_j$ :

$$T_j = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\{(R_3 + H_j)^3 / K_3\}};$$

11) определение времени движения  $j$ -го КА ДЗЗ от восходящего узла орбиты до точки пролета над ортодромией пути НПО в Зените —  $\Delta t_{\Lambda nj}$ :

а) при ориентации оси визирования в Надир

$$\Delta t_{\Lambda nj} = (T_j \cdot u_{\Lambda nj}) / (2 \cdot \pi);$$

б) при ориентации оси визирования под углом  $\beta_j$  для прямого наклонения  $j$ -го КА ДЗЗ:

– при ориентации оси визирования вправо по направлению полета КА ДЗЗ:

$$\Delta t_{\Lambda nj} = (T_j \cdot u_{\Lambda nj}^{\text{пр}}) / (2 \cdot \pi);$$

– при ориентации оси визирования влево по направлению полета КА ДЗЗ:

$$\Delta t_{\Lambda nj} = (T_j \cdot u_{\Lambda nj}^{\text{лп}}) / (2 \cdot \pi);$$

в) при ориентации оси визирования под углом  $\beta_j$  для обратного наклонения  $j$ -го КА ДЗЗ:

– при ориентации оси визирования вправо по направлению полета КА ДЗЗ:

$$\Delta t_{\Lambda nj} = (T_j \cdot u_{\Lambda nj}^{\text{по}}) / (2 \cdot \pi);$$

– при ориентации оси визирования влево по направлению полета КА ДЗЗ:

$$\Delta t_{\Lambda nj} = (T_j \cdot u_{\Lambda nj}^{\text{ло}}) / (2 \cdot \pi);$$

12) вычисление московского декретного времени пролета точки Зенита —  $\Delta t_{\Lambda nj}$ :

$$t_{\Lambda nj} = t_{nj} + \Delta t_{\Lambda nj};$$

13) расчет половины углового размера 30  $j$ -го КА ДЗЗ —  $\Phi_{3j}$ :

$$\Phi_{3j} = \pi / 2 - (\gamma_j + \beta_j) - \arccos \frac{R_3 + H_j}{R_3 \cdot \sin(\gamma_j + \beta_j)};$$

14) определение времени движения  $j$ -го КА ДЗЗ по дуге соответствующего углового размера —  $\Delta t_{\Phi j}$ :

$$\Delta t_{\Phi j} = (T_j \cdot \Phi_{3j}) / (2 \cdot \pi);$$

15) вычисление времени начала обзора участка пути НПО  $j$ -м КА ДЗЗ —  $t_{nj}^{\text{нп}}$ :

$$t_{nj}^{\text{нп}} = t_{\Lambda nj} - \Delta t_{\Phi j};$$

16) расчет времени окончания обзора участка пути НПО  $j$ -м КА ДЗЗ —  $t_{nj}^{\text{пк}}$ :

$$t_{nj}^{\text{пк}} = t_{\Lambda nj} + \Delta t_{\Phi j};$$

17) определение продолжительности обзора участка пути НПО  $j$ -м КА ДЗЗ —  $t_n^{\text{пк}}$ :

$$\Delta t_{nj} = 2 \cdot \Delta t_{\Phi j}.$$

В связи с тем, что скорость полета  $j$ -го КА ДЗЗ по круговой орбите —  $V_{\text{кр}j}$  существенно выше максимальной скорости движения НПО по участку пути —  $V_{\text{нпо}}^{\text{по}}$  ( $V_{\text{кр}j} \gg V_{\text{нпо}}^{\text{по}}$ ) [2, 10] уместно положить, что:

– на интервале от начальной точки касания трассой КА ДЗЗ ортодромии до пролета им точки Зенита НПО всегда будет наблюдаем с КА ДЗЗ;

– на интервале от пролета КА ДЗЗ точки Зенита до конечной точки касания трассой КА ДЗЗ НПО не будет наблюдаем с КА ДЗЗ.

### Пример определения времен пролетов КА ДЗЗ, движущихся по круговым орбитам, над участком пути НПО

Пусть круговыми считаются орбиты КА ДЗЗ, для которых относительный эксцентриситет —  $e_j \leq 10^{-2}$  [5]. В соответствии с этим можно выявить группировку, состоящую из 43 КА, оснащенных различной аппаратурой ДЗЗ (табл. 1).

Как видно из данных табл. 1 орбиты всех КА ДЗЗ могут считаться круговыми и, следовательно, может быть эффективно применен метод наклонных проекций [6].

По параметрам движения и ТХ может быть выделено 16 типов таких КА (табл. 1). По каждому из них были рассчитаны средняя высота круговой орбиты и среднее наклонение, определены соответствующая максимальная и минимальная высота (табл. 2).

Пусть продолжительность применения КА ДЗЗ по участку пути НПО составляет одни сутки, то есть  $T_k - T_n = 86400$  с.

Значения  $\gamma_j$  и  $\beta_j = \text{const}$  для всех КА и координаты ИТ и КТ участка пути НПО приведены в табл. 3.

Для решения поставленной задачи в MSExcel был разработан специальный программно-моделирующий комплекс. С его использованием по каждому типу КА ДЗЗ методом наклонных проекций для значений, соответствующих максимальной высоте и наклонению, были рассчитаны пространственно-временные параметры наклонных проекций: долгота левой границы наклонной проекции (ДЛГ НП), долгота правой границы наклонной проекции (ДПГ НП), угловой размер наклонной проекции (УР НП), время начала существования наклонной проекции (ВНС НП), время окончания существования наклонной проекции (ВОС НП), продолжительность существования наклонной проекции (ПС НП) для восходящих и нисходящих ветвей траекторий этих КА (табл. 4).

Результаты расчетов числа пролетов над участком пути для всех КА ДЗЗ приведены в табл. 5.

Из данных табл. 5 видно, что на рассматриваемом интервале при принятых исходных данных по параметрам движения и ТХ число покрытий участка пути для КА ДЗЗ изменяется от 0 до 2, а общее число пролетов группировки, состоящей из 43 КА, составляет 28 раз. Последнее число позволяет оценить величину — сред-

нее время, в течение которого над путем пролетает хотя бы один КА ДЗЗ, которое в этом случае составляет величину в 3085,714 с = 51,42857 мин и которое может служить характеристикой пути НПО.

Из данных табл. 5 видно, что максимальное число пролетов одиночного КА ДЗЗ над ортодромией пути при принятых исходных данных может быть равным двум. Это позволяет сформировать пессимистическую оценку максимального числа пролетов, равную в этом случае 86, что, в свою очередь, позволяет оценить осредненное время, в течение которого над путем пролетает хотя бы один КА ДЗЗ из группировки и которое составляет величину в 1004,651 с = 16,74419 мин, что также может служить характеристикой пути НПО.

Таблица 1

Группировка 43 КА, оснащенных различной аппаратурой ДЗЗ

| j     | $L_{oj}$ | Высота перигея | Высота апогея | $e_j$    | $i_j$ | $T_j$  |
|-------|----------|----------------|---------------|----------|-------|--------|
|       | град     | км             | км            |          | град  | мин    |
| 1 тип |          |                |               |          |       |        |
| 1     | 12       | 624            | 643           | 1,36E-03 | 97,9  | 97,4   |
| 2     | 4        | 622            | 645           | 1,64E-03 | 97,9  | 97,4   |
| 2 тип |          |                |               |          |       |        |
| 3     | 43       | 501            | 519           | 1,31E-03 | 97,5  | 94,8   |
| 4     | 74       | 491            | 508           | 1,24E-03 | 97,5  | 94,8   |
| 5     | 83       | 495            | 510           | 1,09E-03 | 97,5  | 94,6   |
| 6     | 121      | 500            | 519           | 1,38E-03 | 97,5  | 94,8   |
| 3 тип |          |                |               |          |       |        |
| 7     | 0        | 334            | 347           | 9,69E-04 | 96,92 | 91,34  |
| 4 тип |          |                |               |          |       |        |
| 8     | 0        | 622            | 623           | 7,15E-05 | 97,9  | 97,2   |
| 9     | 0        | 622            | 623           | 7,15E-05 | 97,9  | 97,2   |
| 10    | 0        | 622            | 623           | 7,15E-05 | 97,9  | 97,2   |
| 11    | 0        | 622            | 623           | 7,15E-05 | 97,9  | 97,2   |
| 12    | 0        | 621            | 648           | 1,93E-03 | 97,9  | 97,2   |
| 13    | 0        | 621            | 622           | 7,15E-05 | 97,8  | 97,1   |
| 5 тип |          |                |               |          |       |        |
| 14    | 0        | 800            | 800           | 0,00E+00 | 98,6  | 100,87 |
| 6 тип |          |                |               |          |       |        |
| 15    | 0        | 480            | 480           | 0,00E+00 | 97,3  | 94     |

Таблица 1 (продолжение)

| $j$    | $L_{oj}$ | Высота перигея | Высота апогея | $e_j$    | $i_j$  | $T_j$  |
|--------|----------|----------------|---------------|----------|--------|--------|
|        | град     | км             | км            |          | град   | мин    |
| 7 тип  |          |                |               |          |        |        |
| 16     | 0        | 1101           | 1107          | 4,01E-04 | 122,99 | 107,35 |
| 17     | 0        | 1068           | 1107          | 2,61E-03 | 123    | 107    |
| 18     | 0        | 1066           | 1081          | 1,01E-03 | 123    | 106,7  |
| 19     | 0        | 1086           | 1087          | 6,71E-05 | 123    | 106,7  |
| 8 тип  |          |                |               |          |        |        |
| 20     | 0        | 1047           | 1057          | 6,74E-04 | 106    | 106,2  |
| 21     | 0        | 710            | 729           | 1,34E-03 | 98,3   | 99,1   |
| 10 тип |          |                |               |          |        |        |
| 22     | 0        | 683            | 683           | 0,00E+00 | 98,1   | 98,42  |
| 23     | 0        | 669            | 690           | 1,49E-03 | 98,16  | 98,35  |
| 24     | 0        | 681            | 683           | 1,42E-04 | 98,1   | 98     |
| 25     | 0        | 679            | 682           | 2,13E-04 | 98,1   | 98,37  |
| 26     | 0        | 676            | 698           | 1,56E-03 | 98,2   | 98,5   |
| 27     | 0        | 679            | 696           | 1,20E-03 | 98,2   | 98,5   |
| 11 тип |          |                |               |          |        |        |
| 28     | 0        | 522            | 540           | 1,30E-03 | 97,5   | 95,25  |
| 12 тип |          |                |               |          |        |        |
| 29     | 0        | 366            | 416           | 3,70E-03 | 73,6   | 92,7   |
| 30     | 0        | 395            | 419           | 1,77E-03 | 74     | 92,7   |
| 13 тип |          |                |               |          |        |        |
| 31     | 0        | 535            | 552           | 1,23E-03 | 97,6   | 95,5   |
| 14 тип |          |                |               |          |        |        |
| 32     | 0        | 697            | 699           | 1,41E-04 | 98,2   | 98,7   |
| 33     | 0        | 678            | 691           | 9,21E-04 | 98,5   | 98,45  |
| 15 тип |          |                |               |          |        |        |
| 34     | 0        | 623            | 626           | 2,14E-04 | 97,9   | 97,2   |
| 35     | 0        | 615            | 617           | 1,43E-04 | 97,9   | 97,2   |
| 16 тип |          |                |               |          |        |        |
| 36     | 0        | 538            | 541           | 2,17E-04 | 97,6   | 95,4   |
| 37     | 0        | 550            | 557           | 5,06E-04 | 97     | 96     |
| 38     | 0        | 563            | 573           | 7,21E-04 | 96,9   | 96,02  |
| 39     | 0        | 468            | 505           | 2,70E-03 | 98,2   | 94,3   |
| 40     | 0        | 470            | 503           | 2,41E-03 | 98,19  | 94,34  |
| 41     | 0        | 473            | 496           | 1,68E-03 | 98,17  | 94,3   |
| 42     | 0        | 448            | 486           | 2,78E-03 | 98,16  | 94,4   |
| 43     | 0        | 474            | 502           | 2,04E-03 | 98,16  | 94,37  |

Таблица 2

Значения средней высоты круговой орбиты и среднего наклона и соответствующие им максимальные и минимальные высоты

| Тип КА ДЗЗ | Средняя высота | Максим. высота | Миним. высота | Среднее наклон. |
|------------|----------------|----------------|---------------|-----------------|
| 0          | км             | км             | км            | град            |
| 1          | 633,5          | 633,5          | 633,5         | 97,9            |
| 2          | 505,375        | 510            | 499,5         | 97,5            |
| 3          | 340,5          | 340,5          | 340,5         | 96,92           |
| 4          | 624,3333       | 634,5          | 621,5         | 97,9            |
| 5          | 800            | 800            | 800           | 98,6            |
| 6          | 480            | 480            | 480           | 97,3            |
| 7          | 1087,875       | 1104           | 1073,5        | 122,99          |
| 8          | 1052           | 1052           | 1052          | 106             |
| 9          | 719,5          | 719,5          | 719,5         | 98,3            |
| 10         | 683,25         | 687,5          | 679,5         | 98,1            |
| 11         | 531            | 531            | 531           | 97,5            |
| 12         | 399            | 407            | 391           | 73,6            |
| 13         | 543,5          | 543,5          | 543,5         | 97,6            |
| 14         | 691,25         | 698            | 684,5         | 98,2            |
| 15         | 620,25         | 624,5          | 616           | 97,9            |
| 16         | 509,1875       | 568            | 467           | 97,6            |

Таблица 3

Координаты ИТ и КТ участка путей НПО

| $\gamma_j$ | $\beta_j$ | $\psi_{нт}$ | $\lambda_{нт}$ | $\psi_{кт}$ | $\lambda_{кт}$ | $T_{н}$ | $T_{к}$ |
|------------|-----------|-------------|----------------|-------------|----------------|---------|---------|
| град       | град      | град        | град           | град        | град           | с       | с       |
| 5          | 12        | 47,096      | 37,5471        | 47,222      | 39,72          | 3000    | 89400   |

Таблица 4

Рассчитанные значения пространственно-временных параметров наклонных проекций

| Тип<br>КА | Восходящая ветвь |           |           |           |           |           |
|-----------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|           | ДЛГ НП           | ДПГ НП    | УР НП     | ВНС НП    | ВОС НП    | ПС НП     |
|           | град             | град      | град      | с         | с         | с         |
| 1         | 47,570552        | 53,357207 | 5,7866544 | 2228,9889 | 88621,118 | 86392,129 |
| 2         | 47,3903          | 52,47188  | 5,081584  | 2249,323  | 88643,48  | 86394,15  |
| 3         | 47,10949         | 51,22926  | 4,119767  | 2272,594  | 88670,41  | 86397,82  |
| 4         | 47,56841         | 53,36073  | 5,792322  | 2249,323  | 88643,48  | 86394,15  |
| 5         | 47,99408         | 54,74132  | 6,747244  | 2228,989  | 88621,12  | 86392,13  |
| 6         | 47,23252         | 52,14197  | 4,90945   | 928,7314  | 87320,84  | 86392,11  |
| 7         | 82,60662         | 92,63778  | 10,03117  | 2249,323  | 88643,48  | 86394,15  |
| 8         | 56,07948         | 64,53533  | 8,455848  | 2095,067  | 88541     | 86445,94  |
| 9         | 47,8319          | 54,11435  | 6,282454  | 2201,889  | 88616,19  | 86414,3   |
| 10        | 47,789012        | 53,887627 | 6,0986147 | 2249,323  | 88643,475 | 86394,152 |
| 11        | 47,34538         | 52,54553  | 5,200158  | 2240,101  | 88647,16  | 86407,06  |
| 12        | 21,61243         | 26,02067  | 4,408236  | 2235,385  | 88628,97  | 86393,59  |
| 13        | 47,42969         | 52,70201  | 5,272317  | 2235,561  | 88645,04  | 86409,48  |
| 14        | 48,10153         | 54,26573  | 6,1642    | 2205,057  | 88619,21  | 86414,15  |
| 15        | 47,58984         | 53,32549  | 5,735652  | 2220,291  | 88631,83  | 86411,54  |
| 16        | 48,04542         | 53,46609  | 5,420665  | 2229,365  | 88640,14  | 86410,77  |
| тип<br>КА | Нисходящая ветвь |           |           |           |           |           |
|           | ДЛГ НП           | ДПГ НП    | УР НП     | ВНС НП    | ВОС НП    | ПС НП     |
|           | град             | град      | град      | с         | с         | с         |
| 1         | 216,11128        | 221,80407 | 5,6927881 | 859,72771 | 87251,857 | 86392,129 |
| 2         | 216,6743         | 221,6665  | 4,992212  | 914,2376  | 87308,39  | 86394,15  |
| 3         | 217,4792         | 221,516   | 4,036826  | 978,4266  | 87378,43  | 86400     |
| 4         | 216,6743         | 221,6665  | 4,992212  | 914,2376  | 87308,39  | 86394,15  |
| 5         | 216,1113         | 221,8041  | 5,692788  | 859,7277  | 87251,86  | 86392,13  |
| 6         | 216,9259         | 221,7481  | 4,822198  | 930,753   | 87322,84  | 86392,09  |
| 7         | 178,2923         | 187,7963  | 9,504003  | 952,9372  | 87204,83  | 86251,89  |
| 8         | 206,084          | 214,3552  | 8,2712    | 720,0531  | 87074,25  | 86354,19  |
| 9         | 215,5809         | 221,7651  | 6,184205  | 825,0058  | 87210,74  | 86385,73  |
| 10        | 215,72331        | 221,72481 | 6,0015027 | 838,99105 | 87225,627 | 86386,636 |
| 11        | 216,6549         | 221,7656  | 5,110708  | 906,6255  | 87297,54  | 86390,92  |
| 12        | 242,7161         | 247,3244  | 4,608379  | 996,9745  | 87381,63  | 86384,66  |
| 13        | 216,5313         | 221,7131  | 5,181815  | 901,3559  | 87291,9   | 86390,55  |
| 14        | 215,3742         | 221,4382  | 6,063991  | 835,3478  | 87221,23  | 86385,88  |
| 15        | 216,1196         | 221,7614  | 5,641819  | 866,1628  | 87254,65  | 86388,48  |
| 16        | 215,8337         | 221,1577  | 5,323998  | 892,3127  | 87281,56  | 86389,25  |

Таблица 5

Результаты расчетов числа пролетов всех КА ДЗЗ над участком путей

| Тип   | 1  |    | 2  |    |    |    | 3  | 4      |    |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|--------|----|
| $j$   | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8      | 9  |
| $N_j$ | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0      | 2  |
| Тип   | 4  |    |    |    | 5  | 6  | 7  |        |    |
| $j$   | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17     | 18 |
| $N_j$ | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  | 2  | 2      | 1  |
| Тип   | 7  | 8  | 9  | 10 |    |    |    |        |    |
| $j$   | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26     | 27 |
| $N_j$ | 2  | 1  | 1  | 1  | 0  | 2  | 0  | 0      | 2  |
| Тип   | 11 | 12 |    | 13 | 14 |    | 15 |        | 16 |
| $j$   | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35     | 36 |
| $N_j$ | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2      | 0  |
| Тип   | 16 |    |    |    |    |    |    |        |    |
| $j$   | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | $N=43$ |    |
| $N_j$ | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  | 1  | 0  | 28     |    |

### Заключение

Полученные оценки указывают на то, что в случае применения принятой группировки КА ДЗЗ с соответствующими параметрами движения и ТХ, на заданном интервале времени имеют место разрывы в наблюдаемости с их использованием пути НПО и, следовательно, существует принципиальная необходимость доразведки с помощью иных способов и средств с целью постоянного контроля состояния (наличия) маршрутов вывоза (выхода) населения из зон экстренного оповещения населения.

### Список источников

1. Гражданская оборона; под общ. ред. В.А. Пучкова; МЧС России. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2016. 377 с.
2. Аверкиев Н.Ф., Власов Р.П., Богачев С.А. и др. Баллистические основы проектирования ракет-носителей и спутниковых систем: учебник. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. 302 с.
3. Советский энциклопедический словарь; гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Сов. энциклопедия, 1988. 1600 с.

4. Инженерный справочник по космической технике. М.: Военное издательство МО СССР, 1969. 696 с.

5. Минаков Е.П., Александров М.А., Мищеряков А.В., Мищеряков С.В. Алгоритм определения параметров наклонных проекций точек на поверхности Земли для круговых орбит космических аппаратов // Труды МАИ. 2024. № 135. С. 1–34.

6. Баринев К.Н., Бурдаев М.Н., Мамон П.А. Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1975. 232 с.

7. Минаков Е.П., Мусиенко С.А., Шафигуллин И.Ш. Сборник основных терминов, понятий и определений по вопросам оценивания эффективности и моделирования применения специальных организационно-технических систем: учеб. пособие. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. 184 с.

8. Минаков Е.П., Александров М.А., Мищеряков А.В. Метод определения характеристик пролета орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли над пространственно-временными областями // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского, 2023. Вып. № 690. С. 121–134.

9. Мамон П.А., Половников В.И. Приложение теорем сферической тригонометрии к решению практических задач: учеб. пособие. Вып. 4. ВИКИ, 1973. 27 с.

10. Основы теории полета космических аппаратов; под ред. Г.С. Нариманова и М.К. Тихонравова. М.: Машиностроение, 1972. 608 с.

11. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. Л.: ОГИЗ, 1946. 556 с.

12. Чернов А.А., Чернявский Г.М. Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли. Лекции и упражнения. М.: Радио и связь, 2005. 200 с.

13. Глушенко А.А., Хохлов В.П. Алгоритм идентификации изменений и уточнения параметров движения техногенного объекта в околоземном космическом пространстве на основе радиолокационных измерений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. Вып. 12. С. 164–170.

14. Минаков Е.П., Александров М.А., Мищеряков А.В. Модель расчета вероятности потенциально результативных пролетов космичес-

кого аппарата над заданным районом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 11. С. 152–157.

15. Маштаков Я.В., Ткачев С.С. Построение углового движения спутника ДЗЗ при отслеживании маршрутов на поверхности Земли // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. № 20. 31 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-20> (дата обращения: 21.04.2024).

## References

1. Civil defense / Under the general editorship of V.A. Puchkov; the Ministry of Emergency Situations of Russia. M.: Federal State Budgetary Institution of the Russian Academy of Sciences (FC), 2016. 377 p.

2. Averkiev N.F., Vlasov R.P., Bogachev S.A. and others. Ballistic fundamentals of the design of launch vehicles and satellite systems: Textbook. St. Petersburg: A.F. Mozhaisky VKA, 2017. 302 p.

3. The Soviet Encyclopedic Dictionary / Chief editor A.M. Prokhorov. M.: Soviet Encyclopedia, 1988. 1600 p.

4. Engineering handbook of space technology. Military Publishing House of the USSR Ministry of Defense, 1969. 696 p.

5. Minakov E.P., Alexandrov M.A., Mishcheryakov A.V., Mishcheryakov S.V. Algorithm for determining the parameters of inclined projections of points on the Earth's surface for circular orbits of spacecraft // Proceedings of MAI. 2024. No 135. Pp. 1–34.

6. Barinov K.N., Burdaev M.N., Mamon P.A. Dynamics and the principles of building orbital systems of spacecraft. M.: Mashinostroenie, 1975. 232 p.

7. Minakov E.P., Musienko S.A., Shafigulin I.Sh. Collection of basic terms, concepts and definitions on the issues of evaluating the effective-

ness and modeling the use of special organizational and technical systems: A study guide. St. Petersburg: A.F. Mozhaisky VKA, 2012. 184 p.

8. Minakov E.P., Alexandrov M.A., Mishcheryakov A.V. A method for determining the characteristics of the flight of an orbital grouping of Earth remote sensing spacecraft over spatiotemporal regions // Proceedings of the A.F. Mozhaisky VKA, 2023. Issue No. 690. Pp. 121–134.

9. Mamon P.A., Polovnikov V.I. Application of spherical trigonometry theorems to solving practical problems: a textbook. Issue 4. WIKI, 1973. 27 p.

10. Fundamentals of the theory of spacecraft flight. Edited by G.S. Narimanov and M.K. Tikhonravov. M.: Mashinostroenie, 1972. 608 p.

11. Bronstein I.N., Semendyaev K.A. Handbook of mathematics for engineers and students of higher education institutions. L.: OGIZ, 1946. 556 p.

12. Chernov A.A., Chernyavskiy G.M. Orbits of Earth remote sensing satellites. Lectures and exercises. Moscow: Radio and Communication, 2005. 200 p.

13. Glushchenko A.A., Khokhlov V.P. Algorithm of the changes identification and refinement of the man-made object motion parameters in the near-Earth space on the basis of the radar measurements (in Russian) // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2021. Vyp. 12. Pp. 164–170.

14. Minakov E.P., Alexandrov M.A., Mishcheryakov A.V. Model for calculating the probability of potentially effective spacecraft overflights over a given area // Izvestiya Tula State University. Technical Sciences. 2023. № 11. Pp. 152–157.

15. Mashtakov Y.V., Tkachev S.S. Construction of angular motion of a remote sensing satellite during tracking of routes on the Earth's surface // Preprints of M.V. Keldysh IPM. 2014. № 20. 31 p. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-20> (date of reference: 21.04.2024).

УДК 533.6.011.72

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_49

**ТРОЙНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ УДАРНЫХ И ВЗРЫВНЫХ ВОЛН  
С РАВЕНСТВОМ СКОРОСТНЫХ НАПОРОВ ЗА ПАДАЮЩЕЙ, ОТРАЖЕННОЙ  
ВОЛНАМИ И В НАБЕГАЮЩЕМ ПОТОКЕ**

**TRIPLE CONFIGURATIONS OF SHOCK AND BLAST WAVES WITH EQUAL  
DYNAMIC PRESSURES BEHIND THE INCIDENT SHOCK, THE REFLECTED  
WAVE AND IN THE INCOMING FLOW**

*Д-р техн. наук М.В. Чернышов, К.Э. Савелова*

*D.Sc. M.V. Chernyshov, K.E. Savelova*

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова*

Рассматриваются тройные конфигурации ударных или взрывных волн, бегущие по потоку газа, с прямой главной (маховской) ударной волной (так называемые стационарные маховские конфигурации). Получены основные соотношения, определяющие скоростные напоры потоков, разделенных контактным разрывом, исходящим из тройной точки маховского отражения, и позволяющие сравнить их между собой и со скоростным напором набегающего потока. Аналитически определены параметры стационарной маховской конфигурации, скоростные напоры потоков за которой равны между собой, а также со скоростным напором потока перед тройной конфигурацией. Показано, что при этом поток за отраженной ударной волной воздействует на объект с той же аэродинамической силой и в том же направлении, что и набегающее течение, а поток за главной волной — с силой, равной по абсолютной величине, но противоположной по направлению.

**Ключевые слова:** ударная волна, взрывная волна, скоростной напор, трансляционное действие, перенос частиц.

Triple configurations of shock or blast waves traveling along a gas stream with a normal main (Mach) shock (the so-called stationary Mach configurations) are considered. The basic relations determining the dynamic pressures of flows separated by a contact discontinuity emanating from the triple point of the Mach reflection and allowing them to be compared with each other and with the dynamic pressure of the incoming flow are obtained. The parameters of the stationary Mach configuration are analytically determined, the dynamic pressures of both streams behind which are equal to each other, as well as with the dynamic pressure of the flow before that configuration. It is shown that in this case, the flow behind the reflected shock affects the object with the same aerodynamic force and in the same direction as the incoming stream, and the flow behind the main (Mach) shock acts with a force equal in absolute magnitude, but opposite in direction.

**Keywords:** shock wave, blast wave, dynamic pressure, translational effect, transfer of particles.

## Введение

При движении сверхзвуковых летательных аппаратов вблизи поверхности Земли возникает отражение (регулярное или маховское) возникающих скачков уплотнения (в системе координат, связанной с поверхностью, это уже не скачки, а бегущие ударные волны согласно ГОСТ 23238–78 [1]). Спутные потоки, возникающие за ударными (в частности, взрывными) волнами, воздействуют на объекты и сооружения, что нередко приводит к их перемещению (так называемое трансляционное воздействие) и последующему удару с катастрофическими последствиями (например, с летальным исходом при перемещении тела человека и его последующем ударе о твердую поверхность [2]).

Трансляционное воздействие потока за ударными волнами имеет, например, существенное значение при внутреннем взрыве на борту летательного аппарата (например, при детонации заряда конденсированного взрывчатого вещества [3–5], в том числе при произвольном начальном значении давления на борту воздушного судна или орбитальной станции [6]). Волны, возникающие в результате взрыва в замкнутом объеме, многократно взаимодействуют между собой и с различными поверхностями, образуя разветвленные ударно-волновые структуры и многочисленные тройные конфигурации бегущих ударных волн. При этом, как показано в [7–9], взрывные ударные волны и их тройные конфигурации, как правило, перемещаются не в неподвижной среде, а в потоке, ранее возмущенном другими волнами, имеющими определенную ненулевую скорость течения.

Спутный поток за ударной волной, имеющий некоторую скорость  $\bar{\mathbf{u}}$ , воздействует на объект (внутренний элемент разрушаемой конструкции, или осколок остекления, или человеческое тело), находящийся в покое, с аэродинамической силой [4]

$$X = c_x \cdot d \cdot S = c_x \cdot \frac{\rho u^2}{2} \cdot S, \quad (1)$$

где  $d = \rho u^2 / 2$  — динамическое давление (скоростной напор) потока;

$c_x$  — коэффициент лобового сопротивления объекта;

$S$  — характерная площадь его поперечного сечения.

Если объект воздействия ударной волны уже перемещается со скоростью  $\bar{\mathbf{u}}_p$ , то вектор воздействующей на него аэродинамической силы представляется в виде

$$\bar{\mathbf{X}} = c_x \cdot \frac{\rho (\bar{\mathbf{u}} - \bar{\mathbf{u}}_p) |\bar{\mathbf{u}} - \bar{\mathbf{u}}_p|}{2} \cdot S. \quad (2)$$

Согласно (2), эта сила пропорциональна динамическому давлению, соответствующему скорости потока относительно движущегося объекта.

Таким образом, в соответствии с (1) и (2), разгон тела спутным потоком за фронтом ударной или взрывной волны, или последовательностью таких волн (ударно-волновой системой [10]) напрямую зависит от динамического давления (скоростного напора) потока за волной или системой.

Как показано в [11–14] для различных случаев установившегося течения, скоростные напоры потоков за тройной точкой маховского отражения неподвижных ударных волн (скачков уплотнения), значительно отличаются (при больших сверхзвуковых скоростях набегающего потока — в десятки раз). Соответствующим образом различается и трансляционное воздействие этих потоков.

В работе [15] проведено численное и аналитическое исследование скоростных напоров (и, соответственно, трансляционных воздействий) потоков за тройными конфигурациями бегущих ударных волн, распространяющихся в движущемся потоке воздуха. На примере наиболее известной и легко поддающейся аналитическому исследованию стационарной маховской конфигурации с прямой главной (маховской) ударной волной построена математическая модель, позволяющая оценить эти значения. Выявлены особые тройные конфигурации с равенством скоростных напоров за главной (маховской) и отраженной волнами попарно между собой или со скоростным напором набегающего потока. Определены также тройные конфигурации ударных волн, тормозящие поток за главной или отраженной волной до нулевой скорости, и, следовательно, до нулевого значения скоростного напора. Найдены конфигурации, встречные по отношению к набегающему потоку и способ-

ные развернуть течение за главной волной, или за главной и отраженной волнами, в противоположном направлении.

Результаты, полученные в [15], позволяют выбрать наименее угрожаемое размещение людей и критически важных элементов конструкций. В частности, аналитически и численно показано, что при приповерхностном («приподнятом») взрыве конденсированного вещества (рис. 1) человеческие тела, находящиеся сверху от траектории тройной точки маховского отражения, испытывают существенно меньшее трансляционное (переносное) воздействие, чем находящиеся снизу от этой траектории (то есть у поверхности земли). Для размещения критически важных элементов конструкции в окрестности взрывозащитного устройства, специально разработанного для применения на борту воздушного судна [3–5], также важно, в какую область поля течения (выше или ниже тройной точки) попадет этот элемент, и какой степени трансляционного воздействия, а также воздействия вторичного осколочного потока он будет подвергнут. Кроме того, анализ трансляционного воздействия спутных потоков за ударной волной может быть полезен для оценки механического действия взрыва различных топлив на борту аэрокосмических аппаратов, оценки и оптимизации действия импульсных газодинамических (в частности, двигательных) устройств.



Рис. 1. Трансляционное действие взрыва, выраженное в перемещении человеческих тел, животных и неодушевленных объектов, при покушении на Первого консула Франции Наполеона Бонапарта 24 декабря 1800 года (3 нивоза IX года по французскому революционному календарю)

## Схема течения и основные соотношения

Рассматривается взаимодействие газового потока, движущегося со скоростью  $u$  (с числом Маха  $M = u/a$ , где  $a$  — скорость звука), и стационарной маховской конфигурации (СМК) с прямой главной волной  $s_1$ , перемещающейся со скоростью  $u_s$  (рис. 2, а–в). Тройная точка  $T$  стационарной маховской конфигурации является общей для главной  $s_1$ , падающей  $s_2$  и отраженной  $s_3$  волн, а также для контактного разрыва  $K$ , разделяющего потоки за отраженной и главной волнами.

Течение газа перед СМК характеризуется числом Маха  $M = u/a$ , которое считается положительным при  $u > 0$  (рис. 2, а–б; поток направлен слева направо) и отрицательным при  $u < 0$  (рис. 2, в; поток течет справа налево). Скорость  $u_s$  ударной волны  $s_1$  характеризуется условным числом Маха  $M_s = u_s/a$ , которое считается положительным при  $u_s > 0$ , отрицательным

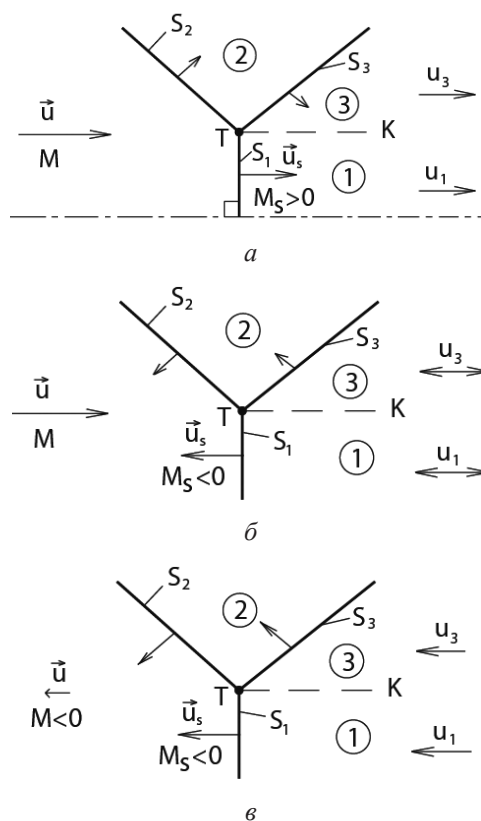


Рис. 2. Схема течения со стационарной маховской конфигурацией бегущих ударных волн: а — «дрейфующая»; б — «встречная»; в — «догоняющая» конфигурация

при  $u_s < 0$  и равным нулю для прямого скачка уплотнения, неподвижного в избранной системе координат. Для определенности здесь и далее рассматриваются тройные конфигурации ударных волн, встречающие своим фронтом частицы газа, изначально расположенные слева от них (то есть при  $M > M_s$ ). В зависимости от направлений движения главной ударной волны и потока перед ней, различают (в терминологии [1]) СМК с «дрейфующей» (при  $M > 0$  и  $M_s > 0$ , рис. 2, а), «встречной» (при  $M > 0$  и  $M_s < 0$ , рис. 2, б) и «догоняющей» (при  $M < 0$  и  $M_s < 0$ , рис. 2, в) главной ударной волной, которые соответствуют областям параметров I–III на рис. 3. Термины «дрейфующая», «встречная» и «догоняющая» (по отношению к набегающему потоку) могут использоваться применительно не только к главной волне, но и, по аналогии, ко всей стационарной маховской конфигурации в целом.

Значения чисел Маха  $M$  и  $M_s$ , а также показатель адиабаты  $\gamma$  совершенного газа (здесь и далее все примеры расчетов приводятся для  $\gamma = 1,4$ ) позволяют определить параметры ударных волн, составляющих СМК, и свойства течения за ними (включая скоростные напоры  $d_1 = \rho_1 u_1^2 / 2$  за главной ( $s_1$ ) и  $d_3 = \rho_3 u_3^2 / 2$  за отраженной ( $s_3$ ) волнами). В частности, изменение термодинамических параметров потока на ударных волнах  $s_i$  ( $i = 1 \dots 3$ ), составляющих СМК, характеризуется их интенсивностями  $J_i$  — отношениями статических давлений за соответствующей волной и перед ней. Интенсивность

$J_1 = p_1 / p$  главной (маховской) ударной волны  $s_1$ , где  $p$  — статическое давление в невозмущенном потоке, а  $p_1$  — в области 1 за волной  $s_1$ , зависит от ее скорости движения относительно встречаемого потока следующим образом [1]:

$$J_1 = (1 + \varepsilon)(M - M_s)^2 - \varepsilon, \quad (3)$$

где  $\varepsilon = (\gamma - 1) / (\gamma + 1)$ .

Интенсивность  $J_2 = p_2 / p$  падающей волны  $s_2$  определяется уравнением [16–19]

$$\sum_{n=0}^3 A_n J_2^n = 0, \quad (4)$$

где  $A_3 = 1 - \varepsilon$ ,

$$A_2 = - \left[ (1 + \varepsilon - \varepsilon^2 + \varepsilon^3)(M - M_s)^2 + (1 - \varepsilon)(1 - \varepsilon + \varepsilon^2) \right],$$

$$A_1 = \varepsilon \left[ (1 + \varepsilon)(M - M_s)^2 + 1 - \varepsilon \right] \times \left[ (1 - \varepsilon)(M - M_s)^2 - 2 + \varepsilon \right],$$

$$A_0 = (1 - \varepsilon) \left[ (M - M_s)^2 - 1 \right] \times \left[ (1 + \varepsilon)(M - M_s)^2 - \varepsilon \right],$$

а интенсивность  $J_3 = p_3 / p_2$  отраженной волны  $s_3$ , согласно условию равенства давлений на сторонах контактного разрыва  $K$ , удовлетворяет условию

$$J_3 = J_1 / J_2. \quad (5)$$

В работе [15] показано, что скоростной напор  $d_1 = \rho_1 u_1^2 / 2$  за главной (маховской) ударной волной СМК связан со скоростным напором  $d = \rho u^2 / 2$  набегающего потока следующим образом:

$$d_1 = \frac{\left[ M \sqrt{(1 + \varepsilon)(J_1 + \varepsilon)} - (1 - \varepsilon)(J_1 - 1) \right]^2}{(1 + \varepsilon)(1 + \varepsilon J_1) M^2} \cdot d. \quad (6)$$

Связь между скоростным напором  $d_3 = \rho_3 u_3^2 / 2$  течения за отраженной волной и  $d = \rho u^2 / 2$  в набегающем потоке осуществляется таким образом:

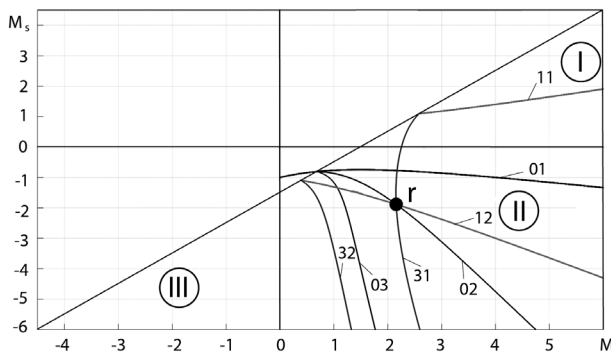


Рис. 3. Параметрический анализ скоростных напоров за стационарными маховскими конфигурациями, бегущими в потоке газа, на плоскости чисел Маха набегающего течения и главной ударной волны

$$d_3 = \frac{d}{E_2 E_3 M^2} \times \left\{ M - \sqrt{\frac{J_1 + \varepsilon}{1 + \varepsilon}} + \sqrt{\frac{1 + \varepsilon J_1 - (1 - \varepsilon^2) J_1 E_2 E_3}{\varepsilon(1 + \varepsilon)}} \right\}^2, \quad (7)$$

где  $E_2 = (1 + \varepsilon J_2) / (J_2 + \varepsilon) = \rho / \rho_2$  (8)

и  $E_3 = (1 + \varepsilon J_3) / (J_3 + \varepsilon) = \rho_2 / \rho_3$  (9)

— отношения плотностей газа перед соответствующими (падающей и отраженной) ударными волнами и за ними, согласно адиабате Ренкина–Гюгонио.

В статье [15] на плоскости  $(M, M_s)$  чисел Маха, определяющих решение задачи (рис. 3), построены кривые 01 и 03, соответствующие торможению потока за главной ( $d_1 = 0$ ) и отраженной ( $d_3 = 0$ ) волнами. В области параметров, расположенной выше кривой 01, поток газа за главной волной течет слева направо, а ниже этой кривой — справа налево. Аналогичное относится к кривой 03 применительно к потоку за отраженной волной. При этом кривая 01 описывается зависимостью

$$M_s = \frac{(1 - 2\varepsilon)M - \sqrt{M^2 + 4(1 - \varepsilon)^2}}{2(1 - \varepsilon)}, \quad (10)$$

вытекающей из соотношения (6) при  $d_1 = 0$ , а кривая 03 — более сложной зависимостью, выводимой из формулы (7) при условии  $d_3 = 0$ .

В области II, соответствующей «встречным» тройным конфигурациям, между кривыми 01 и 03 находится линия 02, указывающая на равенство скоростных напоров за главной и отраженной волнами ( $d_1 = d_3$ ). Из расположения кривых 01, 02 и 03 следует, что, несмотря на равенство скоростных напоров, течения за главной и отраженной волнами направлены противоположно: за отраженной волной — в ту же сторону, что и набегающее течение, а за (маховской) волной — в противоположную сторону (как на рис. 4).

Кривые 11 и 12, показанные на рис. 3, соответствуют равенству скоростных напоров за главной волной и в набегающем потоке ( $d_1 = d$ ). При этом кривая 11 соответствует потоку за «дрейфующей» волной, направленной в ту

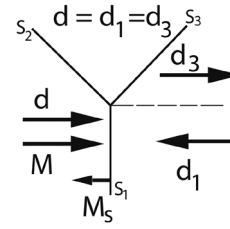


Рис. 4. Схема особой тройной конфигурации бегущих ударных волн, характеризующейся равенством скоростных напоров в набегающем течении и в потоках за ней ( $d = d_1 = d_3$ )

же сторону, что и набегающее течение, а кривая 12 — потоку за «встречной» прямой волной, развернутому в противоположном направлении.

Кривые 31 и 32 соответствуют равенству  $d_3 = d$  скоростных напоров за отраженной волной и в набегающем течении. Кривая 31 соответствует потоку за «дрейфующей» (при  $M_s > 0$ ) или «встречной» (при  $M_s < 0$ ) тройной конфигурацией, направленному в ту же сторону, что и набегающее течение, а кривая 32 — потоку за отраженной волной, развернутому «встречной» конфигурацией в противоположном направлении (при этом поток за главной (маховской) волной тоже развернут).

Обращает на себя внимание единственная на рис. 3 точка  $r$  пересечения кривых 02, 12 и 31, указывающая на равенство скоростных напоров во всех трех течениях: в набегающем потоке, за главной и отраженной волнами ( $d_1 = d_3 = d$ ). Для определения координат этой точки и соответствующих параметров особой тройной конфигурации и потока перед ней, необходимо приравнять скоростные напоры, выражаемые соотношениями (6) и (7), между собой и со скоростным напором  $d$  набегающего потока. При этом интенсивности  $J_1$ ,  $J_2$  и  $J_2$  главной, падающей и отраженной волн определяются соотношениями (3)–(5), а значения  $E_2$  и  $E_3$ , упоминаемые в соотношении (7) — ударными адиабатами (8) и (9), соответственно.

### Аналитическое решение

Число Маха  $M^r = 2,158$  течения перед стационарной маховской конфигурацией с равенством скоростных напоров в набегающем потоке, за главной и за отраженной волнами ( $d = d_1 = d_3$ )

представляет собой единственный положительный вещественный корень уравнения

$$\sum_{n=0}^3 A_n M^{2n} = 0,$$

где

$$A_3 = 4 - 9\varepsilon - 10\varepsilon^2 - \varepsilon^3 + 4\varepsilon^4,$$

$$A_2 = -(1 - \varepsilon)^2 \cdot (13 + 14\varepsilon + 13\varepsilon^2),$$

$$A_1 = (1 - \varepsilon)^2 \cdot (5 - 6\varepsilon + 13\varepsilon^2),$$

$$A_0 = -4(1 - \varepsilon)^4.$$

Число Маха  $M'_s = -1,887$  ударной волны, встречной по отношению к набегающему потоку, определяется соотношением (10). Зависимость (3) позволяет найти интенсивность  $J'_1 = 18,914$  главной ударной волны анализируемой тройной конфигурации:

$$J_1 = (1 + \varepsilon)(M - M_s)^2 - \varepsilon = 18,914,$$

а уравнение (4) определяет интенсивность падающей волны ( $J'_2 = 5,586$ ), так что отраженная волна, согласно (5), характеризуется интенсивностью  $J'_3 = J'_1 / J'_2 = 3,386$ .

Таким образом, при вполне умеренном числе Маха относительного встречного движения ударных волн и потока перед ними существует стационарная маховская конфигурация, разделяющая поток на две части: сверху от контактного разрыва и снизу от него. При попадании объекта (поражающего элемента, осколка конструкции, твердой частицы в составе авиационного или ракетного топлива) сверху от контактного разрыва он подвергается воздействию сначала падающей, а потом отраженной ударной волны. При этом параметры потока за отраженной волной, воздействующие на объект, существенно изменяются: в частности, плотность газа увеличивается, а скорость течения — падает. Однако скоростью течения за отраженной волной не изменяется по сравнению с набегающим потоком ( $d_3 = d$ ), а само это течение направлено в ту же сторону, что и перед тройной конфигурацией. Следовательно, частица, попавшая под воздействие стационарной маховской конфигурации сверху от траектории тройной точки,

не испытывает изменения воздействующей на него аэродинамической силы.

Если же объект расположен снизу от траектории тройной точки определенной здесь стационарной маховской конфигурации, на него воздействует скоростной напор  $d_1$  течения за главной волной, численно равный скоростным напорам  $d_3$  за отраженной волной и  $d$  — в набегающем потоке. Однако течение за главной волной направлено в сторону, противоположную набегающему потоку и течению за отраженной волной (рис. 4). В результате поток газа, воздействующий на частицу снизу от траектории тройной точки, переносит его с прежней аэродинамической силой, но в противоположном направлении.

### Заключение

В представленной работе аналитически определена уникальная тройная конфигурация ударных (в частности, взрывных) волн, воздействующая на поток газа. При попадании объекта (частицы) с одной стороны траектории тройной точки такой конфигурации объект не испытывает изменения воздействующей на него аэродинамической силы лобового сопротивления, несмотря на то, что проходит систему из падающей и отраженной ударных волн. Если же объект расположен с другой стороны тройной точки, воздействующая на него аэродинамическая сила остается прежней по абсолютной величине, но воздействует на частицу в противоположном направлении.

Таким образом, начальное расположение объекта сверху или снизу от траектории тройной точки (и, следовательно, от исходящего из нее контактного разрыва) является «триггером», оставляющим силовое воздействие потока без изменений или же меняющим его на такое же по модулю, но противоположное по направлению.

Специалистам, разрабатывающим перспективные проекты импульсных газодинамических установок, ракетных двигателей и двигателей беспилотной авиации, устройств защиты от взрыва и минимизации его силового воздействия, следует задуматься о практическом применении «триггерного» эффекта, найденного и описанного здесь теоретически.

## Благодарность

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект «Создание и научное обоснование методологии аэрогазодинамического проектирования общего облика двигательных энергетических установок, технологий разработки массового производства беспилотной аэрокосмической техники для решения задач в экстремальных условиях и чрезвычайных ситуациях», № FZWF-2024-0003).

## Список источников

1. Усков В.Н. Бегущие одномерные волны. СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2013. Т. 1. 232 с. Т. 2. 186 с.
2. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Баротермическое действие взрывов. СПб.: Астерион, 2006. 657 с.
3. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В., Михайлин А.И., Чернышов М.В. Защита широкофюзеляжного самолета от взрывных нагрузок // Проблемы управления рисками в техносфере. 2009. № 1–2 (9–10). С. 21–31.
4. Сильников М.В., Михайлин А.И., Чернышов М.В., Шишкин В.Н. Защита узкофюзеляжного воздушного судна от поражающего действия внутреннего взрыва // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2011. № 1 (67). С. 18–27.
5. Silnikov M.V., Mikhaylin A.I. Protection of flying vehicles against blast loads // Acta Astronautica. 2014. Vol. 97. Pp. 30–37.
6. Silnikov M.V., Chernyshov M.V., Mikhaylin A.I. Blast wave parameters at diminished ambient pressure // Acta Astronautica. 2015. Vol. 109. Pp. 235–240.
7. Settles G.S., Keane B.T., Anderson B.W., Gatto J. Shock waves in aviation security and safety // Shock Waves. 2003. Vol. 12. Issue 4. Pp. 267–275.
8. Mundy J.A., Rizzetta D.P., Melville R.B. Numerical simulation of the jet produced by an internal aircraft explosion // Journal of Aircraft. 1995. Vol. 32. No 2. Pp. 370–376.
9. Baum J.D., Hong Luo, Löhner R. Numerical Simulation of a Blast Inside a Boeing 747 // AIAA Paper 93–3091. 1993. 9 p.

10. Омельченко А.В., Усков В.Н. Оптимальные ударно-волновые системы // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 1995. № 6. С. 118–126.

11. Усков В.Н., Чернышов М.В. Особые и экстремальные тройные конфигурации скачков уплотнения // Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47. № 4. С. 39–53.

12. Hekiri H., Emanuel G. Structure and morphology of a triple point // Physics of Fluids. 2015. Vol. 27. Issue 5. Article number 056102.

13. Чернышов М.В. Экстремальные тройные конфигурации с отрицательным углом наклона отраженного скачка // Известия вузов. Авиационная техника. 2019. № 2. С. 82–88.

14. Чернышов М.В., Гвоздева Л.Г. Тройные конфигурации скачков уплотнения и бегущих ударных волн // Известия вузов. Авиационная техника. 2022. № 2. С. 87–110.

15. Чернышов М.В., Савелова К.Э. Скоростные напоры и их соотношения за стационарными маховскими конфигурациями ударных волн, распространяющихся в потоке газа // Аэрокосмическая техника и технологии. 2024. Т. 2. № 3. С. 40–62.

16. Chernyshov M.V., Tolpegin O.A. Optimal regular reflection of oblique shocks // Acta Astronautica. 2019. Vol. 163. Pp. 225–231.

17. Henderson L.F. Exact Expressions for Shock Reflection Transition Criteria in a Perfect Gas // ZAMM — Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 1982. Vol. 62. No 6. Pp. 258–261.

18. Усков В.Н., Мостовых П.С. Тройные конфигурации бегущих ударных волн в потоке невязкого газа // Прикладная механика и техническая физика. 2008. Т. 49, № 3. С. 3–10.

19. Блат П.В., Денисенко П.В. Тенденции разработки детонационных двигателей для высокоскоростных воздушно-космических летательных аппаратов и проблема тройных конфигураций ударных волн. Часть II. Исследования встречных ударных волн и тройных ударно-волновых конфигураций // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16, № 2. С. 199–223.

## References

1. Uskov V.N. Running One-Dimensional Waves. Saint Petersburg: Baltic State Technical

University «VOENMEH», 2013. Vol. 1: 232 p. Vol. 2: 186 p.

2. Gelfand B.E., Silnikov M.V. Barothermal Action of Blasts. Saint Petersburg: Asterion, 2006. 657 p.

3. Gelfand B.E., Silnikov M.V., Mikhaylin A.I., Chernyshov M.V. Wide-body aircraft defense from blast loading // Problems of Risk Management in the Technosphere. 2009. Issue 1–2 (9–10). Pp. 21–31.

4. Silnikov M.V., Mikhaylin A.I., Chernyshov M.V., Shishkin V.N. Protection of narrow-fuselage air vehicle from damage action of internal blast // Bulletin of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. 2011. Issue 1 (67). Pp. 18–27.

5. Silnikov M.V., Mikhaylin A.I. Protection of flying vehicles against blast loads // Acta Astronautica. 2014. Vol. 97. Pp. 30–37.

6. Silnikov M.V., Chernyshov M.V., Mikhaylin A.I. Blast wave parameters at diminished ambient pressure // Acta Astronautica. 2015. Vol. 109. Pp. 235–240.

7. Settles G.S., Keane B.T., Anderson B.W., Gatto J. Shock waves in aviation security and safety // Shock Waves. 2003. Vol. 12. Issue 4. Pp. 267–275.

8. Mundy J.A., Rizzetta D.P., Melville R.B. Numerical simulation of the jet produced by an internal aircraft explosion // Journal of Aircraft. 1995. Vol. 32. No 2. Pp. 370–376.

9. Baum J.D., Hong Luo, Löhner R. Numerical Simulation of a Blast Inside a Boeing 747 // AIAA Paper 93–3091. 1993. 9 p.

10. Omel'chenko A.V., Uskov V.N. Optimal shock-wave systems // Fluid Dynamics. 1995. Vol. 30. Issue 6. Pp. 118–126.

11. Uskov V.N., Chernyshov M.V. Special and extreme triple shock-wave configurations // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2006. Vol. 47. No. 4. Pp. 39–53.

12. Hekiri H., Emanuel G. Structure and morphology of a triple point // Physics of Fluids. 2015. Vol. 27. Issue 5. Article number 056102.

13. Chernyshov M.V. Extreme Triple Configurations with Negative Slope Angle of the Reflected Shock // Russian Aeronautics. 2019. Vol. 62. No 2. Pp. 82–88.

14. Chernyshov M.V., Gvozdeva L.G. Triple Configurations of Steady and Propagating Shocks // Russian Aeronautics. 2022. Vol. 65. No 2. Pp. 87–110.

15. Chernyshov M.V., Savelova K.E. Dynamic pressures and their relations downstream the stationary Mach configurations of shock waves propagating in a gas stream // Aerospace Engineering and Technology. 2024. Vol. 2. Issue 3. Pp. 40–62.

16. Chernyshov M.V., Tolpegin O.A. Optimal regular reflection of oblique shocks // Acta Astronautica. 2019. Vol. 163. Pp. 225–231.

17. Henderson L.F. Exact Expressions for Shock Reflection Transition Criteria in a Perfect Gas // ZAMM — Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 1982. Vol. 62. No 6. Pp. 258–261.

18. Uskov V.N., Mostovyykh P.S. Triple configurations of the running shock waves in a flow of a non-viscous gas (in Russian) // Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya physika. 2008. Vol. 49, № 3. Pp. 3–10.

19. Blat P.V., Denisenko P.V. Trends in the Development of Detonation Engines for High-Speed Aerospace Aircraft and the Problem of Triple Configurations of Shock Waves. Part II. Studies of counter shock waves and triple shock-wave configurations // Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2016. Vol. 16, № 2. Pp. 199–223.

УДК 629.7

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_57

## НОВЫЙ ЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ АРТИЛЛЕРИЙСКОЙ ЗВУКОВОЙ РАЗВЕДКИ

### NEW EFFICIENT ALGORITHM FOR ARTILLERY SOUND RECONNAISSANCE

*Канд. физ.-мат. наук О.О. Барабанов, канд. физ.-мат. наук Л.П. Барабанова*

*Ph.D. O.O. Barabanov, Ph.D. L.P. Barabanova*

*Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева*

Представлен новый алгоритм артиллерийской звуковой разведки с одновременным вычислением скорости звука по показаниям четырех разнесенных звукоприемников. Постановка задачи осуществляется в плоских декартовых координатах, что приводит к разностно-дальномерной системе уравнений, как и в стандартном случае, который в западной терминологии обозначается аббревиатурой TDOA (time difference of arrival). Однако в отличие от стандартного случая число уравнений увеличивается на один и число неизвестных также увеличивается на один (это будет скорость звука, соответствующая акустической ситуации в непосредственный момент выстрела/взрыва). Предлагаемый алгоритм снабжен необходимым математическим анализом и серией компьютерных экспериментов. Когда все четыре звукоприемника находятся на одной прямой, алгоритм не работает. Для версии штатного алгоритма разработан прототип в среде MathCad.

**Ключевые слова:** алгоритм, звукоприемник, скорости звука, декартовы координаты, обратная разностно-дальномерная задача.

A new algorithm for artillery sound reconnaissance is presented with simultaneous calculation of the speed of sound based on the readings of four spaced apart sound receivers. The problem is formulated in flat Cartesian coordinates, which leads to a difference-rangefinder system of equations, as in the standard case, which in Western terminology is denoted by the abbreviation TDOA (time difference of arrival). However, unlike the standard case, the number of equations increases by one and the number of unknowns also increases by one (this will be the speed of sound corresponding to the acoustic situation at the immediate moment of the shot/explosion). The proposed algorithm is equipped with the necessary mathematical analysis and a series of computer experiments. When all four sound receivers are on the same straight line, the algorithm does not work. A prototype was developed for the version of the standard algorithm in the MathCad environment.

**Keywords:** algorithm, sound receiver, sound speed, Cartesian coordinates, inverse TDOA.

Как сказано в работе [1]: «Главная функция артиллерийской разведки состоит в своевременном обнаружении, опознавании и определении координат наземных целей с достаточной полнотой и точностью, позволяющей

огневым средствам артиллерии эффективно их поражать. При этом необходимо использовать данные всех имеющихся источников информации о целях». В этих тезисах содержится очень важная мысль о максимальном использовании

всех имеющихся источников информации. В артиллерийской разведке источниками информации являются данные от звукоприемников (ЗП) и таблицы поправок на направление ветра, силу ветра, на скорость звука и т.д. Однако основными источниками информации в артиллерийской разведке являются данные звукоприемников.

Известна классическая постановка задачи артиллерийской разведки в виде системы нескольких уравнений с участием временных промежутков звукового сигнала. В отечественной литературе эту постановку называют разностно-дальномерным методом или обратной разностно-дальномерной задачей (ОРДЗ) [2–6]. В зарубежной литературе эта постановка носит сокращение TDOA (time difference of arrival) [7–10].

Как работала упрощенная версия ОРДЗ — TDOA в годы Второй мировой войны, описано в рассказе [11].

Параллельно с технологиями звуковой артиллерийской разведки развивались технологии навигации и обнаружения в радиоэлектронной области, где место скорости звука заняла скорость света. В конечном итоге это привело к созданию GPS и ГЛОНАСС.

Неудивительно, что акустические и радиоэлектронные системы обнаружения подчиняются одним и тем же системам уравнений. В начале 90-х годов была сделана ошибочная оценка применения технологии ОРДЗ: «Большой объем математических действий делает и этот прием неприемлемым даже при использовании ЭВМ» [12, с. 98]. Прогресс в области вычислительной техники открыл новые перспективы как в спутниковой навигации, так и в звуковой артиллерийской разведке.

Исторические исследования показали, что с математической точки зрения упомянутые задачи имеют античный аналог и в этом качестве их решением занимались великие ученые: Аполлоний, Виет, Декарт, Ферма, Ньютон, Коши [6].

Интерес к разностно-дальномерной задаче (РДЗ) и ОРДЗ возобновился в конце XX века [4] и стал фактически переоткрытием алгебраического метода Декарта.

Новым в этом направлении после Декарта стал способ, в котором скорость сигнала была введена в число неизвестных расширенной (на единицу) системы уравнений [13, 14].

Применительно к артиллерийской звуковой разведке этот способ потребует четырех (вместо трех) разнесенных звукоприемников.

Во всех известных на данный момент способах артиллерийской разведки скорость звука определяется косвенным образом [2–4, 6–12, 15–18]. Очевидно, такой подход будет сопровождаться неконтролируемой ошибкой местоопределения выстрела/взрыва.

В настоящей работе приводится новый эффективный алгоритм артиллерийской звуковой разведки с 4-мя разнесенными звукоприемниками. На входе нового алгоритма, как и в классическом случае, находятся плоские декартовы координаты звукоприемников и моменты приема звукового сигнала синхронизированными звукоприемниками. На выходе нового алгоритма, как и в классическом случае, будут находиться плоские декартовы координаты источника выстрела/взрыва (ИЗ). Кроме того, в отличие от классического случая будет находиться эффективная скорость звука.

В настоящей работе скорость звука является измеряемой величиной, соответствующей акустической ситуации в непосредственный момент выстрела/взрыва.

## 1. Постановка задачи

Рассматривается плоский случай в системе декартовых координат  $\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$ . Для осуществления предлагаемого способа, в отличие от известного способа, необходимы как минимум 4 разнесенных ЗП. Звукоприемник с номером  $j$  задается столбцом декартовых координат  $a_j = \begin{pmatrix} a_{j,1} \\ a_{j,2} \end{pmatrix}$ . Неизвестный столбец декартовых координат  $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$  звукоизлучателя, неизвестный момент  $\tau$  излучения (выстрела/разрыва) и неизвестная скорость сигнала  $c$  оказываются связаны 4 уравнениями

$$|x - a_j| = c \cdot (t_j - \tau) \quad j = 1, \dots, 4, \quad (1)$$

где  $|x - a_j| = \sqrt{(x_1 - a_{j,1})^2 + (x_2 - a_{j,2})^2}$  — расстояние от излучателя до ЗП с номером  $j$ ;

$a_j \in \mathbb{R}^2$  — известное местоположение  $j$ -го звукоприемника;

$t_j$  — момент приема звукового сигнала  $j$ -м звукоприемником. Требуется одновременно найти 4 неизвестных  $x_1, x_2, \tau, c$ , то есть решить систему (1) относительно этих четырех неизвестных.

## 2. Математический анализ задачи

Без ограничения общности положим

$$t_1 = \min\{t_j : j = 1, \dots, 4\} = 0, \quad a_1 = \bar{0},$$

где  $\bar{0}$  — нулевой столбец. Тогда исходная система запишется в равносильном виде как

$$x^2 = c^2 \cdot \tau^2, \quad (2)$$

$$(x - a_j)^2 = c^2(\tau - t_j)^2, \quad j = 2, 3, 4, \quad (3)$$

$$\tau \leq 0, \quad (4)$$

где  $x^2 = x^T \cdot x = (x_1)^2 + (x_2)^2$  — скалярный квадрат;

$(\cdot)^T$  — операция транспонирования. Вычитая первое уравнение (2) из остальных уравнений (3), получим подсистему

$$2 \cdot a_j^T \cdot x - a_j^2 = 2 \cdot c^2 \cdot t_j \cdot \tau - c^2 \cdot t_j^2.$$

Введем новую систему 4-х неизвестных  $x_1, x_2, \theta, \kappa$ ,

$$\text{где } z = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \theta = c^2 \cdot \tau \end{pmatrix} \text{ и } \kappa = c^2.$$

Тогда в новых неизвестных исходная система (2), (3), (4) будет равносильна системе 4 уравнений

$$\kappa \cdot x^2 - \theta^2 = 0, \quad (5)$$

$$2 \cdot a_j^T \cdot x - 2 \cdot t_j \cdot \theta = a_j^2 - t_j^2 \cdot \kappa, \quad j = 2, 3, 4, \quad (6)$$

$$\theta \leq 0. \quad (7)$$

Система (6) в матричном виде получит вид

$$\mathbf{L} \cdot z = \mathbf{b} + \kappa \cdot \mathbf{h}, \quad (8)$$

где

$$\mathbf{L} = 2 \cdot \begin{pmatrix} a_{2,1} & a_{2,2} & -t_2 \\ a_{3,1} & a_{3,2} & -t_3 \\ a_{4,1} & a_{4,2} & -t_4 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} (a_{2,1})^2 + (a_{2,2})^2 \\ (a_{3,1})^2 + (a_{3,2})^2 \\ (a_{4,1})^2 + (a_{4,2})^2 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{h} = \begin{pmatrix} -(t_2)^2 \\ -(t_3)^2 \\ -(t_4)^2 \end{pmatrix}.$$

Разрешая линейную относительно  $x, \theta$  подсистему (8), получим

$$z = K \cdot \mathbf{b} + \kappa \cdot K \cdot \mathbf{h},$$

где  $K = \mathbf{L}^{-1}$ . Очевидно, что здесь необходима невырожденность матрицы  $\mathbf{L}$ .

Утверждение 1. Если звукоприемники лежат на одной прямой, то определитель матрицы  $\mathbf{L}$  равен нулю.

Доказательство. Пусть звукоприемники лежат на одной прямой. Тогда столбцы разностей координат звукоприемников пропорциональны. Соответственно, алгебраические дополнения к элементам третьего столбца матрицы  $\mathbf{L}$  равны нулю, что влечет  $\det(\mathbf{L}) = 0$ . Утверждение доказано.

Пусть  $\det(\mathbf{L}) \neq 0$ . Расчленим  $z$  в последней формуле. Пусть

$$f = K \cdot \mathbf{b}, \quad g = K \cdot \mathbf{h}. \quad (9)$$

Тогда

$$x = P + \kappa \cdot Q, \quad (10)$$

$$\text{где } P = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix}, \quad Q = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \end{pmatrix}.$$

Аналогично

$$\theta = p + \kappa \cdot q, \quad (11)$$

где  $p = f_3; q = g_3$ .

После подстановки выражений (10) и (11) в формулу (5) получим кубическое относительно  $\kappa$  уравнение

$$Q^2 \cdot \kappa^3 + (2 \cdot P^T \cdot Q - q^2) \cdot \kappa^2 + (P^2 - 2 \cdot p \cdot q) \cdot \kappa - p^2 = 0. \quad (12)$$

Пусть  $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$  — корни уравнения (12). Если корень  $\kappa_m$  имеет ненулевую мнимую часть или  $\theta = p + \kappa_m \cdot q \geq 0$  (7), то он отвергается. Из оставшихся корней выбирается корень  $\kappa_m$ , ближайший к номиналу  $C^2$ . В итоге, искомое  $x$  вычисляется по формуле обратного сдвига

$$x = P + \kappa_m \cdot Q + a_1.$$

### Алгоритм

Для демонстрации нового алгоритма звуковой разведки вместо псевдокода мы избрали язык Mathcad, который наилучшим образом обеспечивает верификацию алгоритма и подготовку штатных программ для робототехнического комплекса звуковой разведки. Структура Mathcad-программы верификации нового алгоритма представлена на рис. 1. Именно процедура  $S(M, t)$  имитирует звукоизмерения выстрела/взрыва произвольной конфигурацией  $M$  четырех разнесенных звукоприемников (задается матрицей  $2 \times 4$ ), что приводит к столбцу  $t$  четырех отметок времени. Затем осуществляется сдвиг к локальной системе координат «пространство-время», чтобы всецело применить предыдущий п.2. Код элементарной и непринципиальной процедуры  $S(M, t)$  для краткости опускается.

На выходе  $S(M, t)$  будет столбец, два первых члена которого — восстановленные по новому алгоритму декартовы координаты ИЗ, третья координата — восстановленный момент выстрела/

взрыва, четвертая координата — восстановленная скорость звука.

Математическое ядро программы для нового алгоритма — процедура  $X(a, t)$  — представлена на рис. 2.

### Верификации нового алгоритма

Для верификации нового алгоритма был проведен следующий массивированный компьютерный эксперимент. При неизменных ИЗ  $\begin{pmatrix} 0,5 \\ 8 \end{pmatrix}$ ,  $\tau = 3$  и номинале скорости звука  $C = 2$  на вход алгоритма подавались 12 различных конфигураций ЗП в правдоподобных геометрических пропорциях. Во всех случаях, кроме одного, специально созданного (вырожденного), был получен идеальный результат.

На рис. 3 приведены результаты 3 экспериментов из 12. Крайний справа — вырожденный случай, когда все четыре ЗП лежат на одной прямой, и это в силу утверждения (1) приводит к делению на ноль.

Поясним, что на графиках рис. 3 ИЗ показан звездочкой, ЗП — точками.

Итак, предлагаемый алгоритм имеет особенность в случае расположения ЗП на одной прямой. По непрерывности близкие конфигурации будут приводить к неприемлемым ошибкам. Таким образом, становится целесообразным снабдить новый алгоритм вычислением коэффициента чувствительности, подобного PDOP в практике спутниковой навигации [5, глава 10], [19], но это уже выходит за рамки настоящей работы.

### Заключение

Разработан новый эффективный алгоритм артиллерийской звуковой разведки с одновре-

|                 |                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                     |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $R(M, t, C) :=$ | $\begin{cases} Mt \leftarrow S(M, t) \\ a \leftarrow \text{submatrix}(Mt, 1, 4, 1, 2) \\ t \leftarrow \text{submatrix}(Mt, 1, 4, 3, 3) \\ X(a, t) \end{cases}$ | <ul style="list-style-type: none"> <li>- перенумерованный массив ЗП</li> <li>- соответствующие моменты времени</li> <li>- ядро программы</li> </ul> |
| $R(M, t, C) =$  | $\begin{bmatrix} 0.5 \\ 8 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix}$                                                                                                             |                                                                                                                                                     |

Рис. 1. Структура программы верификации нового алгоритма

|                                                                                                                                                       |                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| $X(a, t) = K + \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} a_{2,1} & a_{2,2} & -t_2 \\ a_{3,1} & a_{3,2} & -t_3 \\ a_{4,1} & a_{4,2} & -t_4 \end{bmatrix}^{-1}$ | - вычисление обратной матрицы к $L$ согласно (8)  |
| $b \leftarrow \begin{bmatrix} (a_{2,1})^2 + (a_{2,2})^2 \\ (a_{3,1})^2 + (a_{3,2})^2 \\ (a_{4,1})^2 + (a_{4,2})^2 \end{bmatrix}$                      | - вычисление столбца $b$ согласно (8)             |
| $h \leftarrow \begin{bmatrix} -(t_2)^2 \\ -(t_3)^2 \\ -(t_4)^2 \end{bmatrix}$                                                                         | - вычисление столбца $h$ согласно (8)             |
| $f \leftarrow K \cdot b$                                                                                                                              | - вычисление столбца $f$ согласно (9)             |
| $P \leftarrow \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}$                                                                                               | - вычисление столбца $P$ согласно (10)            |
| $p \leftarrow f_3$                                                                                                                                    | - вычисление $p$ согласно (11)                    |
| $g \leftarrow K \cdot h$                                                                                                                              | - вычисление столбца $g$ согласно (9)             |
| $Q \leftarrow \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix}$                                                                                               | - вычисление столбца $Q$ согласно (10)            |
| $q \leftarrow g_3$                                                                                                                                    | - вычисление $q$ согласно (11)                    |
| $koff \leftarrow \begin{bmatrix} -p^2 \\ P^T \cdot P - 2 \cdot p \cdot q \\ 2 \cdot P^T \cdot Q - q^2 \\ Q^T \cdot Q \end{bmatrix}$                   | - вычисление столбца коэффициентов уравнения (12) |
| $\kappa \kappa \leftarrow \text{polyroots}(koff)$                                                                                                     | - вычисление корней уравнения (12)                |
| $m \leftarrow \text{argmin}( \kappa \kappa - C^2 )$                                                                                                   | - выбор корня, ближайшего к номиналу              |
| $\kappa \leftarrow \kappa \kappa_m$                                                                                                                   |                                                   |
| $x \leftarrow P + \kappa \cdot Q + \begin{bmatrix} a_{1,1} \\ a_{1,2} \end{bmatrix}$                                                                  | - столбец координат выстрела/взрыва               |
| $\text{stack}(x, \kappa^{-1} \cdot p + q + t_1, \sqrt{\kappa})$                                                                                       | Выход: $x, \tau, c$                               |

Рис. 2. Математическое ядро программы для нового алгоритма

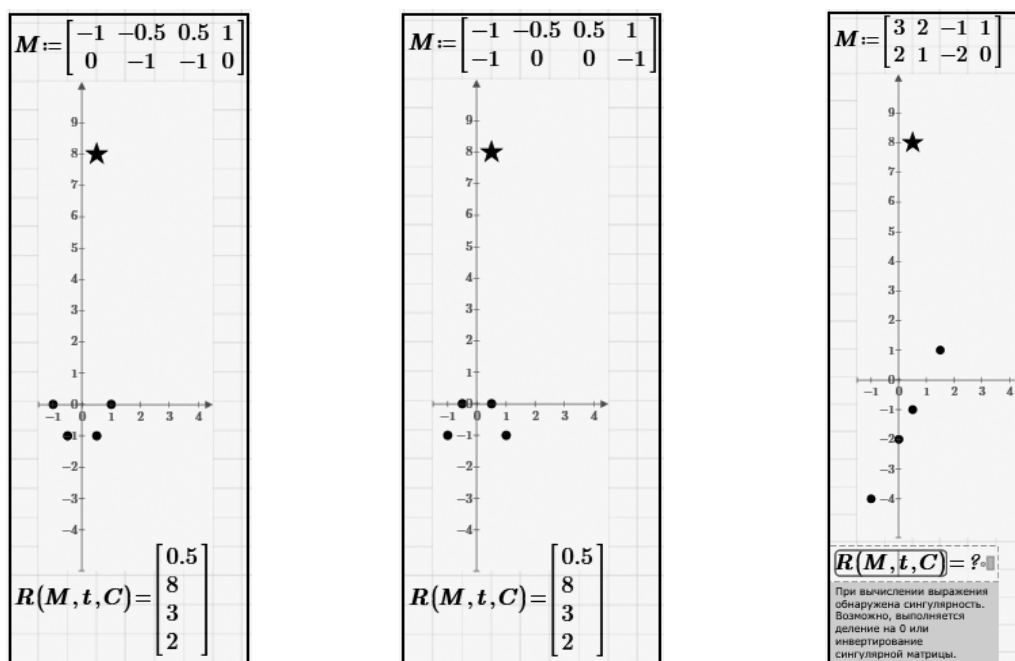


Рис. 3. Отчетные графики для верификации нового алгоритма

менным вычислением скорости звука по показаниям четырех разнесенных звукоприемников. Приведено его математическое обоснование. Новый способ обещает повышение точности артиллерийской разведки. В среде MathCad разработан прототип нового штатного алгоритма для робототехнического комплекса звуковой артиллерийской разведки.

Таким образом, сделан еще один шаг на пути к беспилотному робототехническому комплексу звуковой артиллерийской разведки.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № FZEF–2024–0001.

### Список источников

1. Сафонов М.А., Шульга В.В., Камышев В.В. Основные направления развития звуковой разведки в интересах обеспечения боевых действий ракетных войск и артиллерии // Военная мысль. 2020. № 11. С. 59–65.
2. Головин Н.Я., Таланов А.В. Звукометрия. Л.: Изд-во Артиллер. Ордена Ленина Академии РККА им. Дзержинского, 1938. 483 с.
3. Таланов А.В. Звуковая разведка артиллерии. М.: Военное издательство Министерства Вооруженных Сил Союза ССР, 1948. 404 с.
4. Барабанов О.О., Барабанова Л.П. Универсальный конечный алгоритм для разностно-дальномерных навигационных систем // Известия вузов. Приборостроение, Т. 32. 1989. № 5. С. 42–45.
5. Барабанов О.О., Барабанова Л.П. Математические задачи дальномерной навигации. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 272 с.
6. Барабанов О.О., Барабанова Л.П. Алгоритмы решения навигационной разностно-дальномерной задачи от Аполлония до Коши // История науки и техники, 2008. № 11. С. 2–21.
7. Cobos M., Antonacci F., Alexandridis F. et al. A Survey of Sound Source Localization Methods in Wireless Acoustic Sensor Networks // Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2017, Article ID 3956282, 24 p.
8. Chung M.A., Chou H.C., Lin C.W. Sound Localization Based on Acoustic Source Using Multiple Microphone Array in an Indoor Environment // Electronics 2022, 11, 890.
9. Mišković M., Vukmirović N., Golubović D., Eric M. Method for Direct Localization of Multiple Impulse Acoustic Sources in Outdoor Environment // Electronics. 2022. 11. 2509.
10. Kowalska-Stycze A., Peleshchak R., Lytvyn V., Peleshchak I. et al. Automatic Identification of Sound Source Position Coordinates Using a Sound Metric System of Sensors Linked with an Internet Connection // Symmetry 2022, 14, 2338.
11. Солженицын А.И. Желябугские высылки. URL: <https://rvb.ru/20vek/solzhenizyn/ss30/vol01/text/016.html?ysclid=m4ck0wahv7438590998> (дата обращения: 18.05.2024).
12. Шуляченко Р.И., Кубышкин Ю.И., Кривоносенко В.И., Холохоленко Л.А. Артиллерийская звуковая разведка. М.: Военное издательство. 1993. 394 с.
13. Способ разностно-дальномерного определения декартовых координат приемника: пат. 2310213 Рос. Федерация. № 2005122788/09; заявл. 18.07.2005; опубл. 10.11.2007, Бюл. № 31. 9 с.
14. Барабанов О.О., Барабанова Л.П. Алгоритм разностно-дальномерного позиционирования с оценкой скорости света // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 4. С. 90–96.
15. Статин С.С. Методика расчета координат радиотехнической системой обнаружения позиций стрелков // Технические науки — от теории к практике. 2015. № 12 (48). С. 195–202.
16. Насибуллин И.Ю., Тюсенко Е.А., Ульянов Г.Н. Вариант совершенствования автоматизированного звукометрического комплекса // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2016. № 7–8. С. 111–114.
17. Способ определения координат стреляющих артиллерийских систем и разрывов снарядов звукометрическим комплексом: пат. 2676830 Рос. Федерация. № 2017109351; заявл. 20.03.2017; опубл. 11.01.2019, Бюл. № 2. 12 с.
18. Латышев А., Комарова Е. Полевой «антибиотик»: как комплексы разведки «Пенициллин» повышают эффективность российской артиллерии. URL: <https://russian.rt.com/russia/article/1257578-penicillin-razvedka-artilleriya?ysclid=m4cknsxmms867736994> (дата обращения: 18.05.2024).
19. Барабанова Л.П. К минимизации геометрических факторов GNSS // Известия РАН. Теория и системы управления. 2010. № 2. С. 145–152.

## References

1. Safonov M.A., Shul'ga V.V., Kamyshev V.V. Osnovnye napravleniya razvitiya zvukovoi razvedki v interesakh obespecheniya boevykh deistvii raketnykh voisk i artillerii // Voennaya mysl'. № 11. 2020. Pp. 59–65.
2. Golovin N.Ya., Talanov A.V. Zvukometriya. L.: Izd. Artiller. Ordena Lenina Akademii RKKA im. Dzerzhinskogo, 1938. 483 s. URL: Publikatsiya NNR Zvukometriya (e-heritage.ru) (date of access: 18.05.2024).
3. Talanov A.V. Zvukovaya razvedka artillerii. M.: Voennoe izdatel'stvo Ministerstva Vooruzhenykh Sil Soyuza SSR, 1948.
4. Barabanov O.O., Barabanova L.P. Universal'nyi konechnyi algoritim dlya raznostno-dal'nomernykh navigatsionnykh sistem // Izvestiya vuzov. Priborostroenie, T. XXXII. 1989. № 5. C. 42–45.
5. Barabanov O.O., Barabanova L.P. Matematicheskie zadachi dal'nomernoi navigatsii. M.: FIZMATLIT, 2007.
6. Barabanov O.O., Barabanova L.P. Algoritmy resheniya navigatsionnoi raznostno-dal'nomernoi zadachi ot Apolloniya do Koshi // Istoriya nauki i tekhniki, 2008. № 11. Pp. 2–21.
7. Cobos M., Antonacci F., Alexandridis F., Mouchtaris A., Bowon B. A Survey of Sound Source Localization Methods in Wireless Acoustic Sensor Networks // Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2017, Article ID 3956282, 24 p.
8. Chung M.-A.; Chou H.-C.; Lin C.-W. Sound Localization Based on Acoustic Source Using Multiple Microphone Array in an Indoor Environment // Electronics 2022, 11, 890.
9. Miškovic' M., Vukmirovic' N., Golubovic' D., Eric' M. Method for Direct Localization of Multiple Impulse Acoustic Sources in Outdoor Environment // Electronics. 2022. 11. 2509.
10. Kowalska-Stycze A., Peleshchak R., Lytvyn V., Peleshchak I., Dyriv, A., Danylyk V. Automatic Identification of Sound Source Position Coordinates Using a Sound Metric System of Sensors Linked with an Internet Connection // Symmetry 2022, 14, 2338.
11. Solzhenitsyn A.I. Zhelyabugskie vyselki. URL: <https://rvb.ru/20vek/solzhenizyn/ss30/vol01/text/016.html?ysclid=m4ck0wahv7438590998> (date of reference: 18.05.2024).
12. Shulyachenko R.I., Kubyshkin Yu.I., Kriwonosenko V.I., Kholokholenko L.A. Artilleriiskaya zvukovaya razvedka. M.: Voennoe izdatel'stvo. 1993.
13. Method of difference-dalimeter determination of Cartesian coordinates of the receiver: patent. 2310213 Ros. Federation. No. 2005122788/09; avt. 18.07.2005; published 10.11.2007, Bulletin No. 31. 9 p.
14. Barabanov O.O., Barabanova L.P. Algoritim raznostno-dal'nomernogo pozitsionirovaniya s otsenkoi skorosti sveta // Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya. 2008. № 4. Pp. 90–96.
15. Statin S.S. Metodika rascheta koordinat radiotekhnicheskoi sistemoi obnaruzheniya pozitsii strelkov // Tekhnicheskije nauki — ot teorii k praktike. 2015. № 12 (48). Pp. 195–202.
16. Nasibullin I.Y., Tyusenkov E.A., Ulyanov G.N. Variant sovershenstvovaniya avtomatizirovannogo zvukometricheskogo kompleksa // Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskije sredstva protivodeistviya terrorizmu. 2016. № 7–8. Pp. 111–114.
17. Method of determining the coordinates of firing artillery systems and shell bursts by a sound-metric complex: patent. 2676830 Ros. Federation. No 2017109351; avt. 20.03.2017; publ. 11.01.2019, Bul. no. 2. 12 p.
18. Latyshev A., Komarova E. Field «antibiotic»: how «Penicillin» reconnaissance complexes increase the effectiveness of Russian artillery. URL: <https://russian.rt.com/russia/article/1257578-penicillin-razvedka-artilleriya?ysclid=m4cknsxmms867736994> (date of reference: 18.05.2024).
19. Barabanova L.P. K minimizatsii geometricheskikh faktorov GNSS // Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya. 2010. № 2. Pp. 145–152.

УДК 623.455

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11-12\_64

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БОЕПРИПАСОВ  
С ГОТОВЫМИ ПОРАЖАЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

**ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF AMMUNITION  
WITH READY-MADE STRIKING ELEMENTS**

*А.А. Михайлов<sup>1</sup>, С.А. Козлов<sup>2</sup>*

*A.A. Mikhailov, S.A. Kozlov*

*<sup>1</sup>НИЦ «Охрана» Росгвардии, <sup>2</sup>НПО «СТУС» МВД России*

В статье рассматривается эффективность использования боеприпасов с готовыми поражающими элементами (ГПЭ), а также сравнение их по эффективности применения с боеприпасами, в которых применяется естественное дробление корпуса (ЕДК) при взрыве. Проводится сравнение технических характеристик наиболее распространенных ручных гранат с ГПЭ. Проводится расчет параметров ручной гранаты с ГПЭ в виде цилиндров, в результате которого определена убойная дистанция и убойная скорость поражающего элемента для заданной удельной кинетической энергии, а также основные параметры образующегося осколочного поля.

Для гранат с ЕДК проводится анализ поражения ростовой мишени, предлагается вариант отечественного боеприпаса с ГПЭ в виде цилиндров в габаритах и весовых параметрах гранаты РГД-5 и Ф-1, который позволяет существенно повысить эффективность их применения, в том числе вероятность поражения цели и радиус поражения.

**Ключевые слова:** ручная граната, готовые поражающие элементы, осколочное поле, ростовая мишень, убойная скорость.

The article examines the effectiveness of using ammunition with ready-made submunitions (RMS), as well as comparing their effectiveness with ammunition that uses natural crushing of the body during an explosion (UNC). A comparison is made of the technical characteristics of the most common hand grenades with RMS. The parameters of a hand grenade with a RMS in the form of cylinders are calculated, as a result of which the lethal distance and lethal speed of the striking element for a given specific kinetic energy are determined, as well as the main parameters of the resulting fragmentation field. For grenades with UNC, an analysis of the destruction of a growth target is carried out, a version of domestic ammunition with GPE in the form of cylinders is proposed in the dimensions and weight parameters of the RGD-5 and F1 grenades, which can significantly increase the efficiency of their use, including the frequency of probability the target and the radius of destruction.

**Keywords:** hand grenade, ready-made submunitions, fragmentation field, growth target, lethal speed.

Характеристики типовых ручных гранаты с ГПЭ можно проанализировать на примере ручных гранат фирмы Arges Armaturen GmbH, AT. (табл. 1).

Ручные гранаты фирмы Arges впоследствии стали прототипами для ручных гранат серии M-DN, производимых в Германии. В стенках корпусов этих гранат залиты стальные шарики:

- М-DN 11 — 3800 шариков диаметром 2,5–3 мм;
- М-DN 21 — 2200 шариков диаметром 2–2,3 мм;
- М-DN 31 — 3000 шариков диаметром 2–2,3 мм;
- М-DN 61 — 4300 шариков диаметром 2–2,3 мм.

Типовую конструкцию гранат с ГПЭ можно проанализировать на примере югославской гранаты М75 (рис. 1), швейцарской гранаты НГ 85 (рис. 2), польской гранаты RGO-88 (рис. 3).

Граната М75 содержит 3000 стальных шариков диаметром 2,5–3 мм с эффективным радиусом поражения в 12–18 м и максимальным радиусом поражения в 30–54 м. Заряд взрывчатого вещества содержит 36–38 г пластичной взрывчатки. Взрыватель, имеет время задержки от 3 до 4,4 с [3].

Существенной трудностью при массовом производстве гранат с ГПЭ, особенно в период мобилизационной экономики, является производство поражающих элементов шарикообразной формы.

В связи с чем предлагается в качестве ГПЭ использовать цилиндрические элементы с соотношением длины к диаметру равным единице. Производство ГПЭ в виде цилиндров можно осуществлять из стальной проволоки диаметром 3–5 мм.

Близким аналогом гранаты с ГПЭ в виде цилиндров можно считать гранату с полуготовыми поражающими элементами, используемую в Нагорном Карабахе (рис. 4).

К недостаткам данного типа гранаты можно отнести отсутствие полуготовых поражающих элементов с торцовых частей, что не дает 100 % гарантии их правильного фрагментирования при

Таблица 1

Основные характеристики гранат фирмы Arges [1]

| Тип гранаты                                      | Масса гранаты, г | Масса заряда ВВ, г | Длина гранаты, мм | Диаметр гранаты, мм | Время замедления, с | Количество ГПЭ, шт. |
|--------------------------------------------------|------------------|--------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| ARGES HG 73                                      | 335              | 50                 | 91                | 57                  | 3,5–4,5             | 2600                |
| ARGES HG 7                                       | 470              | 75                 | 96                | 63                  | 3,5–5,5             | 5500                |
| ARGES HG 79                                      | 391              | 48                 | 96                | 57                  | 3,5–4,5             | 4400                |
| ARGES HG 84<br>Оборонительная/<br>наступательная | 500/460          | 90                 | 115               | 60                  | 3,5–5,5             | 5300 (оборон.)      |

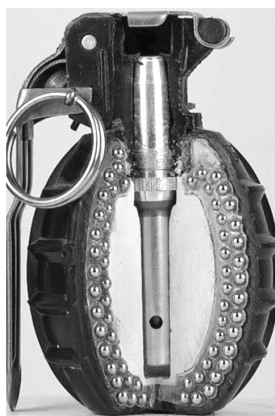


Рис. 1. Югославская ручная осколочная граната М75 [2]



Рис. 2. Швейцарская граната НГ-85 (модифицированная), в качестве поражающих элементов используются вольфрамовые шарики [4]

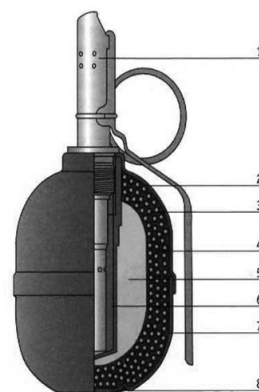


Рис. 3. Конструкция польской гранаты RGO-88: 1 — взрыватель (УЗРГМ); 2 — верхняя часть корпуса; 3 — шарики; 4 — пластмасса; 5 — взрывчатое вещество; 6 — втулка; 7 — нижняя часть корпуса; 8 — донушко

Таблица 2

Основные характеристики гранаты RGO-88 [4]

| Параметр                                                       | Характеристики |
|----------------------------------------------------------------|----------------|
| Диаметр гранаты, мм                                            | 57             |
| Высота снаряженной гранаты с унифицированным запалом УЗРГМ, мм | 114            |
| Масса снаряженной гранаты, г                                   | 485            |
| Масса взрывчатого вещества, г                                  | 60             |
| Масса поражающего элемента, г                                  | 0,25           |
| Количество поражающих элементов, шт.                           | 1150           |

использовании гранаты. Поэтому в гранатах с ГПЭ в виде цилиндров необходимо использовать полностью готовые поражающие элементы и иметь конструкцию, близкую к гранате RGO-88.

#### Расчет параметров ручной гранаты с ГПЭ в виде цилиндров

Минимальное значение удельной кинетической энергии, соответствующей нижней границе поражения человека, принято в 0,5 Дж/мм<sup>2</sup> [5].

Определим кинетическую энергию поражающего элемента в виде цилиндра диаметром 3 мм, с отношением длины к диаметру, равным единице (масса — 0,16 г) [6].

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{0,16 \cdot 10^{-3} \cdot 1200^2}{2} = 115,2 \text{ Дж.}$$

Определим удельную кинетическую энергию  $E_{уд}$ , при площади контакта основания цилиндра с поверхностью  $S_{пл} = 9 \text{ мм}^2$ :

$$E_{уд} = 115,2/9 = 12,8 \text{ Дж/мм}^2.$$

Определим скорость поражающего элемента для удельной кинетической энергии в 5 Дж/мм<sup>2</sup> (в 10 раз большей нижней границы поражения человека), то есть определим  $V_{yb}$ :

$$V_{yb} = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 45}{0,16 \cdot 10^{-3}}} = 750 \text{ м/с.}$$

Определим убойную дистанцию таким поражающим элементом.

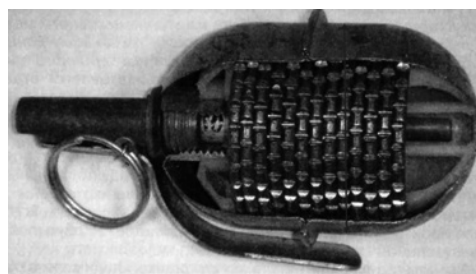


Рис. 4. Граната, используемая во время конфликта в Нагорном Карабахе, имеет диаметр — 60 мм, толщину проволоки — 3 мм, количество полуготовых поражающих элементов — 480 шт.

Исходные данные:

- масса осколка  $m = 0,16 \text{ г}$ ;
- коэффициент лобового сопротивления осколка  $C_x = 1,21$ ;
- параметр формы осколка  $\Phi = 1,38$ ;
- начальная скорость поражающего элемента  $V_0 = 1200 \text{ м/с}$ ;
- убойная скорость поражающего элемента  $V_y = 750 \text{ м/с}$ .

Тогда убойная дистанция составит:

$$I_{yb} = 145 \cdot \frac{m^{0,333}}{C_x \cdot \Phi} \cdot \lg \frac{V_0}{V_y} = 145 \cdot \frac{0,16^{0,333}}{1,21 \cdot 1,38} \cdot \lg \frac{1200}{750} = 11,3 \text{ м.}$$

При этом площадь поражения равна  $S_{пр} = 400,1 \text{ м}^2$ .

В гранате РГД-5 масса корпуса со взрывателем УЗРГМ-2, которые создают осколочное поле, составляет 200 г.

При использовании ГПЭ весом 0,16 г в количестве 1000 шт. получим вес в 160 г, из которых 40 г отводится на вес унифицированного запала ручной гранаты модернизированной (УЗРГМ) и связующий материал для фиксации поражающих элементов или тонкостенный внешний корпус.

Определим количество осколков гранаты РГД-5, рис. 5 (обратите внимание, насколько неравномерно происходит дробление корпуса гранаты РГД-5).

Кроме того, следует учесть, что параметр формы осколков  $\Phi$  гранаты РГД-5 будет находиться в диапазоне от 1,8 (для мелких осколков) до 2,8 (для крупных осколков). Параметр формы осколков  $\Phi$  гранаты с ГПЭ в виде цилиндров составляет 1,38.



Рис. 5. Осколки гранаты РГД-5 [7]

Из этого следует, что при равной энергетике осколков  $I_{уб}$  — убойная дистанция гранаты с естественным дроблением — сократится для мелких осколков  $1,8/1,38 = 1,3$  раза, а для крупных —  $2,8/1,38 = 2$  раза.

Для подсчета количества осколков воспользуемся свободно распространяемой программой ImageJ (рис. 6). Таких осколков получилось 138 шт.

Если рассматривать осколки гранаты Ф-1, то можно отметить непредсказуемость дробления корпуса гранаты. С одной стороны, наблюдается превращение значительной части корпуса в металлическую пыль (рис. 7), не обладающую убойными свойствами, с другой стороны, в зависимости от свойств сталистого чугуна наблюдается образование слишком крупных осколков, (рис. 8). Большинство экспертов считают, что количество убойных элементов гранаты Ф-1 не превышает 300 шт.

Необходимо отметить, что аналогичные недостатки при образовании осколочного поля присущи и более современным ручным гранатам РГН/РГО (рис. 9).

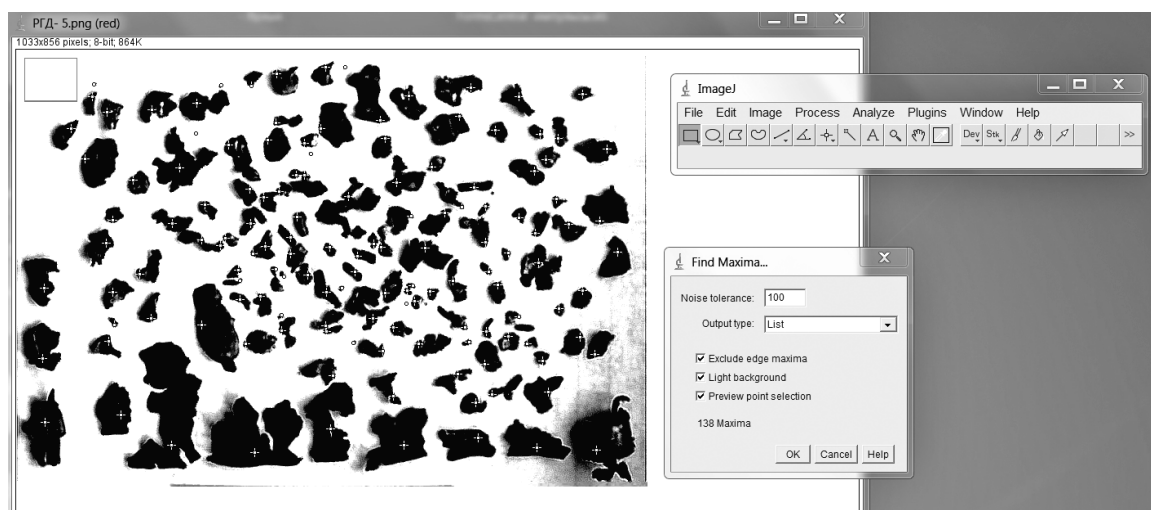


Рис. 6. Подсчет осколков гранаты РГД-5 с помощью программы ImageJ (количество осколков 138 шт.)



Рис. 7. Осколки гранаты Ф-1 (при этом примерно половина из 540 г корпуса гранаты превращается в пыль) [8]



Рис. 8. Осколки гранаты Ф-1 (в зависимости от используемой марки чугуна дробление гранаты может происходить на достаточно крупные осколки, чем и объясняется паспортная дистанция разлета убойных осколков в 200 м)



Рис. 9. Осколки гранаты РГН [9]

**Определение вероятности поражения  
ростовой мишени на дистанции в 4 м  
при взрыве гранаты РГД-5, Ф-1, с ГПЭ  
в виде цилиндров диаметром 3 мм  
в количестве 1000 шт. [8]**

Исходные параметры:

- площадь ростовой мишени (1,5×0,5 м),  
 $S_m = 0,75 \text{ м}^2$ ;
- количество осколков гранаты РГД-5 —  
138 шт.;
- количество осколков гранаты Ф-1 —  
300 шт.;
- количество осколков гранаты с ГПЭ —  
1000 шт.;
- расстояние от центра взрыва до мишени —  
4 м;
- площадь сферы с радиусом в 4 м,  
 $S_{сф} = 201 \text{ м}^2$ .

Допущение. Считаем форму гранаты сферической с равномерным осколочным полем.

Плотность осколочного поля для гранаты РГД-5

$$Пл = \frac{S_{сф}}{\text{кол. оскл.}} = \frac{201}{138} = 1,46 \text{ м}^2,$$

тогда математическое ожидание попадания будет равно:

$$\frac{S_m}{Пл} = \frac{0,75}{1,46} = 0,5.$$

Для случая, когда угловые размеры цели малы по сравнению с шириной сектора осколоч-

ного поля, закон распределения близок к закону Пуассона, где  $P_n$  — вероятность того, что в мишень попадет ровно  $n$  осколков,  $n$  — случайное число осколков,  $\langle n \rangle$  — математическое ожидание числа осколков, приходящихся на площадь цели.

Для  $n = 1$

$$P_n = \frac{n^{-n}}{n!} \cdot e^{-\langle n \rangle} = 2,72^{-0,5} = 0,6.$$

Для  $n = 3$

$$P_n = \frac{n^{-n}}{n!} \cdot e^{-\langle n \rangle} = \frac{3^{-3}}{3!} \cdot e^{-\langle 0,5 \rangle} = 0,037$$

(то есть пренебрежимо мала).

Плотность осколочного поля для гранаты Ф-1:

$$Пл = \frac{S_{сф}}{\text{кол. оскл.}} = \frac{201}{300} = 0,67 \text{ м}^2,$$

то есть в площадь ростовой мишени гарантированно попадет

$$K_{оск} = \frac{S_m}{Пл} = \frac{0,75}{0,67} = 1,1 \text{ оскол.}$$

Плотность осколочного поля для гранаты с ГПЭ в виде цилиндров:

$$Пл = \frac{S_{сф}}{\text{кол. оскл.}} = \frac{201}{1000} = 0,201 \text{ м}^2,$$

то есть в площадь ростовой мишени гарантированно попадет

$$K_{оск} = \frac{S_m}{Пл} = \frac{0,75}{0,201} = 3,7 \text{ ГПЭ.}$$

**Параметры оборонительной гранаты с ГПЭ  
в виде цилиндров диаметром 5 мм**

С учетом прогнозирования появления противоосколочных курток и брюк в качестве защитного обмундирования класса защиты Бр 1 (защищает от фрагментов/осколков, соответствующих условному стальному шарiku весом 1,01 г, 6,35 мм, который летит со скоростью 508 м/с,

энергией — 130,3 Дж), определим кинетическую энергию ГПЭ в виде цилиндров диаметром 5 мм, с отношением длины к диаметру, равным единице (масса — 0,77 г).

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{0,77 \times 10^{-3} \times 1200^2}{2} = 554,4 \text{ Дж.}$$

Определим  $V_{уб\text{ ст3}}$ , исходя из энергетики ГПЭ.

$$V_{уб\text{ ст3}} = 145 \cdot \frac{h_{ст} \cdot \Phi}{m^{0,333}} = 145 \cdot \frac{3 \cdot 1,38}{0,77^{0,333}} = 655 \text{ м/с.}$$

Определим  $V_{уб\text{ ст3}}$ , исходя из необходимости пробития стального 3-мм листа (Ст.3).

Исходные данные:

- $h_{ст} = 3 \text{ мм}$ ;
- масса осколка  $m = 0,77 \text{ г}$ ;
- параметр формы осколка  $\Phi = 1,38$ .

Тогда

$$V_{уб\text{ ст3}} = 145 \times \frac{h_{ст} \times \Phi}{m^{0,333}} = 145 \times \frac{3 \times 1,38}{0,77^{0,333}} = 655 \text{ м/с.}$$

За конечную точку расчета примем  $V_{уб\text{ ст3}} = 655 \text{ м/с}$ .

Определим убойную дистанцию поражения ГПЭ в виде цилиндров диаметром 5 мм.

Исходные данные:

- масса осколка  $m = 0,77 \text{ г}$ ;
- коэффициент лобового сопротивления осколка  $C_x = 1,21$ ;
- параметр формы осколка  $\Phi = 1,38$ ;
- начальная скорость поражающего элемента  $V_0 = 1200 \text{ м/с}$ ;
- убойная скорость поражающего элемента  $V_y = 655 \text{ м/с}$ .

Тогда

$$\begin{aligned} I_{уб} &= 145 \cdot \frac{m^{0,333}}{C_x \cdot \Phi} \cdot \lg \frac{V_0}{V_y} = \\ &= 145 \frac{0,77^{0,333}}{1,21 \cdot 1,38} \times \lg \frac{1200}{655} = 20,9 \text{ м.} \end{aligned}$$

Исходя из массы гранаты в 600 г, веса ТНТ в 110 и 40 г, которые отводятся на вес УЗРГМ и связующий материал для фиксации поражающих элементов или тонкостенный внешний корпус, количество ГПЭ в виде цилиндров диаметром 5 мм составит 584 шт.

### Определение вероятности поражения ростовой мишени на дистанции в 5 м при взрыве оборонительной гранаты с ГПЭ в виде цилиндров диаметром 5 мм в количестве 584 шт.

Исходные параметры:

- площадь ростовой мишени  $1,5 \times 0,5 \text{ м}$ ,  $S_m = 0,75 \text{ м}^2$ ;
- количество осколков гранаты с ГПЭ — 584 шт.;
- расстояние от центра взрыва до мишени — 5 м;
- площадь сферы с радиусом в 5 м,  $S_{сф} = 314 \text{ м}^2$ ;

Допущение. Считаем форму гранаты сферической с равномерным осколочным полем.

Плотность осколочного поля для оборонительной гранаты с ГПЭ,  $\text{м}^2$ ,

$$\text{Пл} = \frac{S_{сф}}{\text{кол.оскл.}} = \frac{314}{584} = 0,538 \text{ м}^2,$$

то есть в площадь ростовой мишени гарантированно попадет

$$K_{оск} = \frac{S_m}{\text{Пл}} = \frac{0,75}{0,538} = 1,4 \text{ ГПЭ.}$$

### Выводы

Проведенные расчеты показали, что использование отечественных боеприпасов с ГПЭ в виде цилиндров в габаритах и весовых параметрах гранат РГД-5 и Ф-1 повышает их эффективность применения и экономически выгодно по следующим причинам.

1. Использование гранат с ГПЭ в виде цилиндров в классе РГД-5 повышает частоту поражения цели в радиусе 4 м в 7 раз.

2. Использование гранат с ГПЭ в виде цилиндров в классе Ф-1 повышает частоту поражения цели в радиусе 4 м в 1,25 раза, при этом радиус поражения для гранаты при расчете увеличивали на 1 м (то есть он становится равным 5 м).

3. Изготовление ГПЭ в виде нарубки цилиндров из проволоки Ст.3 диаметром 3 или 5 мм не меняет кардинально технологии производства гранат, может быть легко организовано в промышленных масштабах. Стоимость

ГПЭ в виде цилиндров не может быть больше стоимости дроби соответствующего диаметра, которая в настоящее время стоит около 26–30 руб. за 1 кг [10].

Для ускорения внедрения боеприпасов с ГПЭ возможно изготовление поражающих элементов в виде дроби с использованием уже развращенного производства, при этом боевые характеристики боеприпасов только улучшатся.

#### Список источников

1. Ручные гранаты ARGES (АВСТРИЯ). URL: [https://vk.com/wall-5058831\\_404446](https://vk.com/wall-5058831_404446) (дата обращения: 18.6.2024).

2. 22 опасных разреза: подборка оружия в необычном ракурсе. URL: <https://fishki.net/4156733-22-opasnyh-razreza-podborka-oruzhija-v-neobychnom-rakurse.html> (дата обращения: 18.6.2024).

3. Ручная осколочная граната DRM 75. URL: [https://armsdata.net.military-club.com/strelkovoe/ugo\\_brm75.html](https://armsdata.net.military-club.com/strelkovoe/ugo_brm75.html) (дата обращения: 18.6.2024).

4. Граната RGO-88 // Оружие и боеприпасы. URL: [https://weaponland.ru/board/granata\\_rgo\\_88/22-1-0-490](https://weaponland.ru/board/granata_rgo_88/22-1-0-490) (дата обращения: 18.6.2024).

5. Критерии относимости самодельного стреляющего устройства к огнестрельному оружию. URL: <http://abckrim.ru/rabota/samodel.htm> (дата обращения: 18.6.2024).

6. Балаганский И.А., Мерзиевский Л.А. Действие средств поражения и боеприпасов: учебник. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2004. 253 с.

7. Описание гранаты РГД-5 // Warbook военный портал. URL: <https://war-time.ru/item/rgd-5> (дата обращения: 18.6.2024).

8. Про ужасную гранату Ф-1 и дебилов. URL: <https://ohotnik1975.livejournal.com/232654.html> (дата обращения: 18.6.2024).

9. Описание ручных гранат РГО и РГН // Warbook военный портал. URL: <https://war-time.ru/item/granaty-rgo-i-rgn> (дата обращения: 18.6.2024).

10. Дробь стальная. URL: <https://pkf-m.ru/drob/> (дата обращения: 18.6.2024).

#### References

1. ARGES hand grenades (AUSTRIA). URL: [https://vk.com/wall-5058831\\_404446](https://vk.com/wall-5058831_404446) (date of access: 18.6.2024).

2. 22 dangerous cuts: a selection of weapons from an unusual angle. URL: <https://fishki.net/4156733-22-opasnyh-razreza-podborka-oruzhija-v-neobychnom-rakurse.html> (date of access: 18.6.2024).

3. DRM 75 hand fragmentation grenade. URL: [https://armsdata.net.military-club.com/strelkovoe/ugo\\_brm75.html](https://armsdata.net.military-club.com/strelkovoe/ugo_brm75.html) (date of access: 18.6.2024).

4. RGO-88 grenade // Arms and Ammunition. URL: [https://weaponland.ru/board/granata\\_rgo\\_88/22-1-0-490](https://weaponland.ru/board/granata_rgo_88/22-1-0-490) (date of access: 18.6.2024).

5. Criteria for attributing an improvised firing device to a firearm. URL: <http://abckrim.ru/rabota/samodel.htm> (date of access: 18.6.2024).

6. Balaganskiy I.A., Merzhievskiy L.A. Action of means of destruction and ammunition: textbook. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2004. 253 p.

7. Description of the RGD-5 grenade // Warbook military portal. URL: <https://war-time.ru/item/rgd-5> (date of access: 18.6.2024).

8. About the dreaded F-1 grenade and morons. URL: <https://ohotnik1975.livejournal.com/232654.html> (date of access: 18.6.2024).

9. Description of RGO and RGN hand grenades // Warbook military portal. URL: <https://war-time.ru/item/granaty-rgo-i-rgn> (date of access: 18.6.2024).

10. Steel shot. URL: <https://pkf-m.ru/drob/> (date of access: 18.6.2024).

УДК 53.07:53.09:53.043

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_71

## УДАРНАЯ ТРУБА — ИНСТРУМЕНТ ИЗУЧЕНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ. ОБЗОР

### SHOCK TUBE IS A TOOL FOR STUDYING SHOCK WAVE PROCESSES. A REVIEW

*С.Н. Васильева, канд. техн. наук И.В. Гук*

*S.N. Vasilieva, Ph.D. I.V. Guk*

*НПО Спецматериалов*

В статье представлен обзор конструкций ударных труб, позволяющих генерировать ударные волны с различными параметрами фазы сжатия. Описаны различные способы генерации ударной волны в ударных трубах. Отмечены преимущества и недостатки использования клапанов и разрывных диафрагм для разделения камеры высокого давления и камеры низкого давления. Показано, что форма сечения камеры низкого давления влияет на форму фронта генерируемой ударной волны. Описаны способы и методы регистрации данных, получаемых при проведении экспериментальных исследований. Представленная информация позволяет сделать вывод, что ударные трубы — незаменимый инструмент изучения ударно-волновых процессов, позволяющий не только качественно, но и количественно оценивать картину высокоскоростного течения газа и сопутствующие явления.

**Ключевые слова:** ударная труба, ударная волна, эксперименты, исследования, датчики.

The article presents an overview of shock tube designs that allow generating shock waves with different compression phase parameters. Various methods of shock wave generation in shock tubes are described. The advantages and disadvantages of using valves and bursting diaphragms to separate the high-pressure chamber and the low-pressure chamber are noted. It is shown that the shape of the section of the low-pressure chamber affects the shape of the front of the generated shock wave. The methods and methods of recording data obtained during experimental studies are described. The presented information allows us to conclude that shock tubes are an indispensable tool for studying shock wave processes, which allows not only qualitatively but also quantitatively assessing the picture of high-speed gas flow and related phenomena.

**Keywords:** shock tube, shock wave, experiments, research, sensors.

#### Введение

Применение ударных труб для экспериментальных исследований процессов в ударных волнах (УВ) и ударно-волновых взаимодействиях находит практику в течение многих лет.

УВ возможно изучать при взрывах в свободном пространстве, однако УВ, распространяющаяся в ударной трубе, гораздо более удобный объект исследования, так как ее распространение заключено в замкнутом объеме, а вторичные эффекты взрыва не влияют на параметры УВ, что

значительно упрощает картину газодинамического течения, позволяя сосредоточить внимание на конкретных аспектах ударно-волнового взаимодействия.

Разнообразие ударных труб позволяет проводить широкий спектр исследований начиная от поведения материалов в экстремальных условиях (ударно-волновая нагрузка) до разработки методик испытаний взрывозащитных образцов [1]. Правильная постановка эксперимента в ударных трубах позволяет получить достоверные и точные результаты, которые могут быть использованы для проверки теоретических моделей и разработки новых технологий или материалов.

### Конструкция ударных труб

Основной принцип действия ударных труб довольно прост: УВ образуется при движении того или иного вида поршня или разрыва диафрагмы [2]. В классических конструкциях ударных труб (рис. 1), где давление во фронте УВ обеспечивается стандартной подкачкой газа в камеру высокого давления (КВД) до определенного давления [4], существуют двухдиафрагменные схемы (рис. 2) [3].

В двухдиафрагменной схеме (рис. 2) последовательно соединены КВД с толкающим газом, камера промежуточного давления (КПД) с толкающим газом, камера низкого давления (КНД). Двухдиафрагменные ударные трубы бывают различных видов в зависимости от толщины диафрагмы между КПД и КНД. Например, ударные трубы, использующие эффект отраженной УВ, имеют следующий принцип действия: УВ, возникающая в КВД, испытыва-

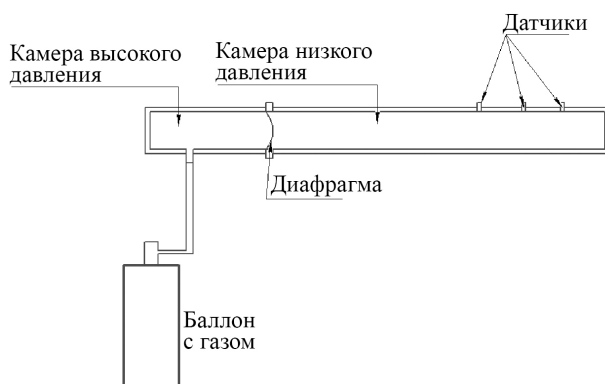


Рис. 1. Схема простейшей цилиндрической ударной трубы

ет нормальное отражение от диафрагмы, установленной между КПД и КНД, давление в КПД возрастает и происходит разрыв диафрагмы. Двухдиафрагменная ударная труба с нестационарным расширением потока имеет довольно тонкую диафрагму между КПД и КНД, при подходе УВ от КВД она разрывается, в результате чего образуется сильная УВ. Принцип действия ударной трубы двухдиафрагменной конструкции также осуществлен в многодиафрагменных ударных трубах [3].

Для генерации сильных УВ можно увеличить отношение внутренних энергий и давлений газов, разделенных диафрагмой. Для получения наиболее сильных УВ используется толкающий газ с минимальным молекулярным весом (водород или гелий) при максимальных практически доступных температурах и давлениях, обеспечиваемых с помощью газодинамического, химического, электрического способов подогрева [5]. Например, в электромагнитных/магнитных ударных трубах для создания УВ используются эффекты нагревания газа при электрическом разряде и ускорения его под действием магнитных сил (Т-образная трубка Фаулера).

Принцип работы трубки Фаулера: трубка наполняется исследуемым газом под низким давлением. В перекладину «буквы Т» введены электроды и через газ разряжается конденсаторная батарея. Газ в разряде быстро нагревается до высокой температуры и под действием высокого давления с большой скоростью переходит в «вертикальную» трубку, толкая перед собой УВ [6].

Помимо описанной трубки Фаулера, для обеспечения нагрева газа в КВД и получения более сильных УВ используются:

1. Внешнее нагревание. Например, способ подогрева газа извне с помощью пламени, электрического подогрева или другого источника тепла. Стоит отметить, что из-за зависимости метода от теплопроводности через стенки КВД количество тепла, которое можно подвести внешним нагреванием, ограничено;

2. Внутреннее нагревание с помощью твердых нагревательных элементов. Подогрев газа происходит с помощью твердых нагревательных элементов, помещенных в КВД;

3. Внутреннее нагревание с помощью электрического разряда. Газ высокого давления мож-

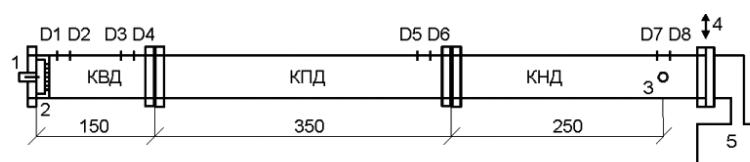


Рис. 2. Схема двухдиафрагменной ударной трубы: 1 — свеча зажигания; 2 — форкамера; 3 — кварцевое окно; 4 — вентильная заслонка; 5 — демпферный бак; 6 — D1...D8 датчики давления

но быстро нагреть до высокой температуры путем непосредственного пропускания через него электрического тока;

4. Нагревание с помощью внутреннего горения.

Между камерами высокого и низкого давления помещается либо пропускной быстродействующий клапан, либо диафрагма. Быстродействие клапана будет влиять на параметры воздушной УВ. Одним из несомненных преимуществ использования клапанов является отсутствие осколков (в отличие от использования диафрагм). Помимо этого, при использовании клапанов достигается:

- точная повторяемость результатов;
- повышение производительности исследований, так как ударную установку не требуется разбирать после предыдущего опыта, в отличие от ударных труб с диафрагмами, которые требуется менять после каждого эксперимента;
- автоматизация экспериментального процесса.

Одним из главных недостатков использования клапана является некоторое время задержки до его полного открытия.

Для диафрагм в ударных трубах могут применяться различные материалы, например: майлар, целлофан, полиэтилен, медь, алюминий или сталь. В зависимости от выбора материала, можно также устранить осколочные потоки от разорванных диафрагм. Каждый материал в зависимости от своей толщины имеет различное давление разрыва, что позволяет легко варьировать давление при проведении экспериментальных исследований. Подобные диафрагмы могут применяться для начальных давлений в КВД вплоть до 100 атм [7].

Выбор формы сечения ударной трубы зависит от вида и объекта исследования. Например, различие использования труб постоянного и переменного сечения состоит в том, что в трубах постоянного сечения формируется УВ с прямо-

угольным профилем, а в трубах переменного сечения — с треугольным профилем (рис. 3).

С помощью ударной трубы с постоянным сечением возможно моделировать гидроудары, а с помощью ударной трубы с расширяющимся сечением — УВ, возникающие при взрывах сосудов высокого давления или подрывах взрывчатых веществ.

Помимо формы постоянного или расширяющегося сечения, ударные трубы также могут быть круглого или прямоугольного сечения. Выбор конкретной формы — основывается на целях исследования и методе, используемом для регистрации результатов. Например, для измерений с использованием оптических методов (таких как шпирен-метод — в котором используются изменения показателей преломления, чтобы увидеть и сфотографировать воздушный поток) требуется применение точнообработанных плоскопараллельных смотровых стекол, поэтому предпочтительнее использовать ударные трубы прямоугольного сечения. Однако же для спектроскопических исследований будет предпочтительнее труба круглого сечения с небольшими вмонтированными плоскими стеклами, так как из-за геометрических особенностей данную трубу менее трудоемко отчищать от продуктов горения и ионизации.

Внутренние размеры КНД у ударных труб могут быть различны, диаметр сечения влияет на характер потока газа: влияние стенок и пограничного слоя в узкой трубе будет значительно больше, чем в трубе большого сечения. Например, для исследований процессов ударно-волнового взаимодействия с объектами (задача аэродинамики) рекомендуется использовать ударные трубы большого сечения для размещения объектов в центре ударной трубы, так как при больших числах Рейнольдса влияние вязкости существенно будет проявляться в области течения, непосредственно прилегающей к стенке канала.

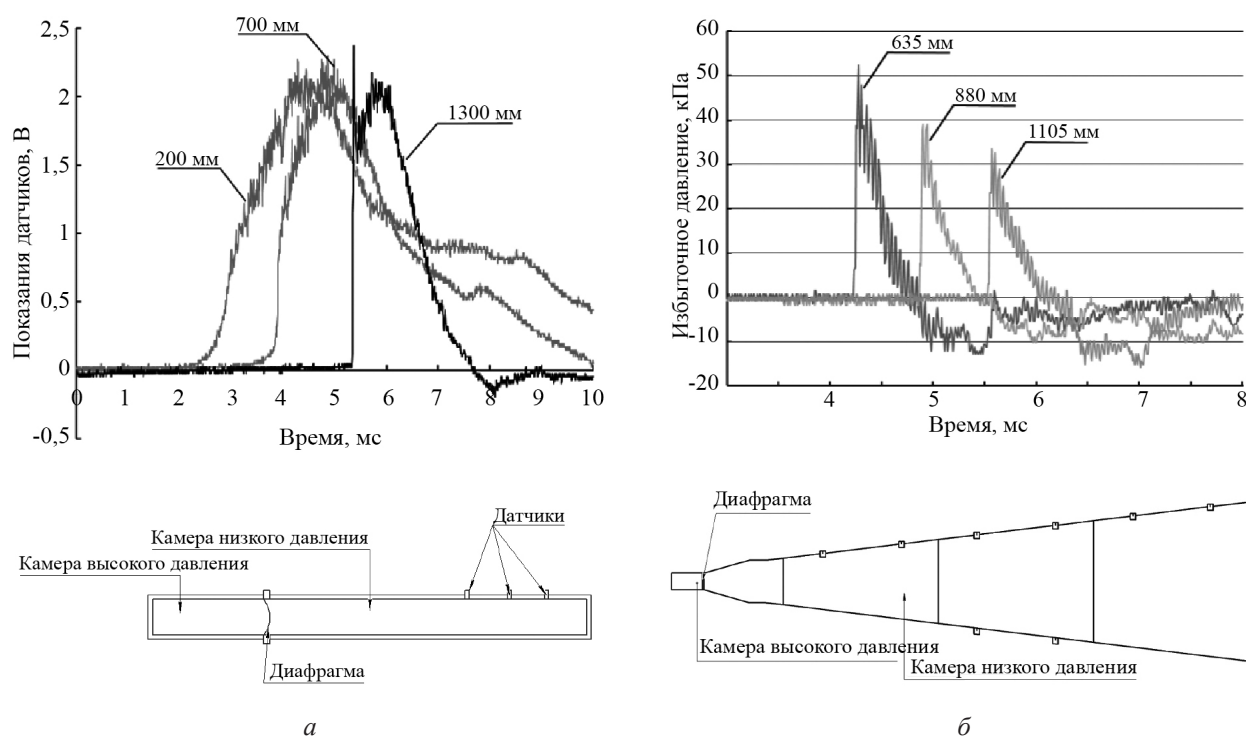


Рис. 3. Различия в форме фронта: а — ударная труба с постоянным сечением; б — ударная труба с равномерно расширяющимся сечением (коническая ударная труба)

Помимо ударных труб постоянного и переменного сечения, существуют ударные трубы со скачкообразно изменяющейся площадью поперечного сечения [8]. Такие ударные трубы создают более высокое давление по сравнению с обычными, так как стационарное течение разрежения в них ускоряет толкающий газ. Виды ударных труб со скачкообразным сечением приведены на рис. 4.

На рис. 5 приведено сравнение максимальных чисел Маха УВ в зависимости от началь-

ного давления в КВД, достижимых в ударных трубах.

Ударные трубы могут различаться также материалом стенок. Подробное изучение материалов, используемых для изготовления стенок ударных труб, показало, что основными материалами являются: медь, стекло, сталь [2, 9, 12]. Для проведения спектрографических исследований наиболее предпочтительны медные и стеклянные стенки ударных труб. Это объясняется тем, что при спектрографических иссле-

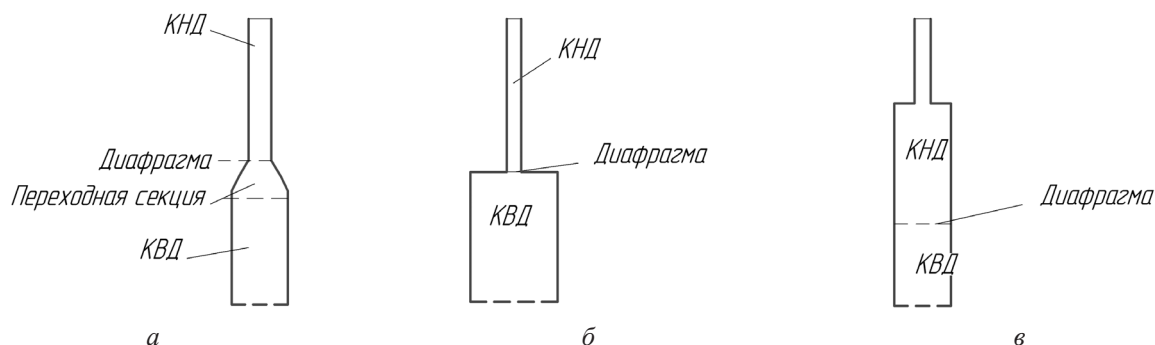


Рис. 4. Ударные трубы со скачкообразными изменением площади поперечного сечения: а — изменение сечения в месте расположения диафрагмы, КВД с конечной площадью поперечного сечения; б — то же, камера с бесконечной площадью поперечного сечения; в — изменение сечения в некотором месте КНД

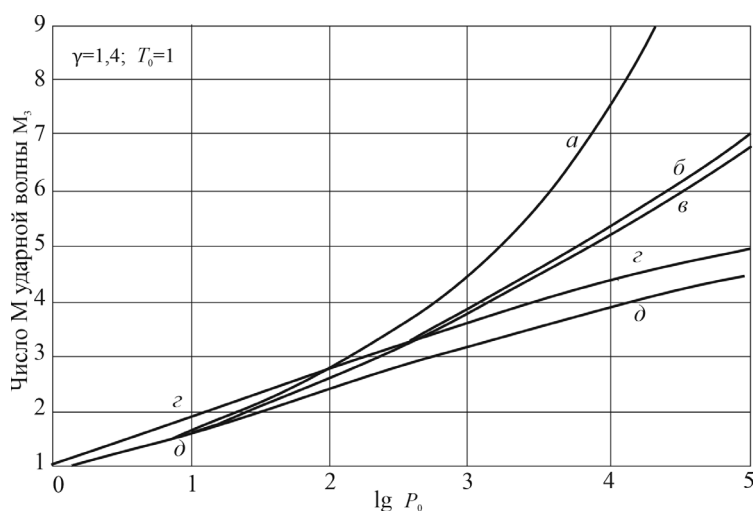


Рис. 5. Сравнение максимальных чисел Маха УВ в зависимости от начального давления в КВД, достижимых в ударных трубах: а — многодиафрагменная ударная труба; б — двухдиафрагменная ударная труба, использующая эффект отражения ударной волны; в — двухдиафрагменная ударная труба с нестационарным расширением потока; г — ударная труба со скачкообразным изменением сечения; д — простейшая ударная труба

дованиях в общем спектре присутствуют линии материала стенок трубы. Помимо указанных параметров, данные материалы обладают рядом преимуществ по сравнению со стальными ударными трубами.

Медь позволяет наименее трудоемко устанавливать дополнительные детали и системы регистрации данных, так как дополнительные элементы возможно впаять с внешней стороны.

Выполненные из стекла стенки ударной трубы подходят для изучения оптического излучения углеводородов и химических процессов при ударно-волновых процессах.

Одним из главных недостатков медных и стеклянных ударных труб является невозможность работы с высокими давлениями, так как данные материалы выдерживают лишь несколько атмосфер. Для работы с высокими давлениями обычно используются ударные трубы из нержавеющей стали либо выполненные из оружейных стволов.

Разнообразие конструкций ударных труб (материалы, формы сечения и пр.) позволяет проводить множество исследований с различными скоростями УВ, профилями давления. Стоит отметить, что в зависимости от целей, задач и объектов исследования каждый из описанных ранее параметров должен быть подобран так, чтобы обеспечивать возможность установки регистрирующих систем.

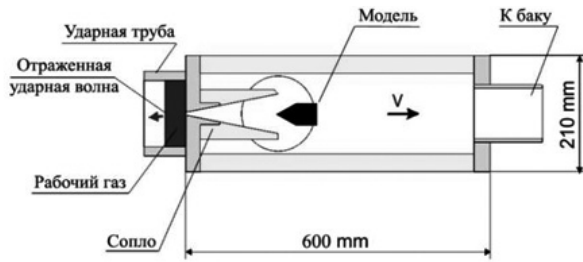
## Методы регистрации данных

На ударных трубах возможно проводить различные по направлениям исследования, которые требуют определенной постановки эксперимента и методов регистрации данных [6, 10–11]. В данной части статьи будут представлены лишь некоторые исследования и способы регистрации данных, использованные при проведении экспериментов, которые возможно проводить в ударных трубах.

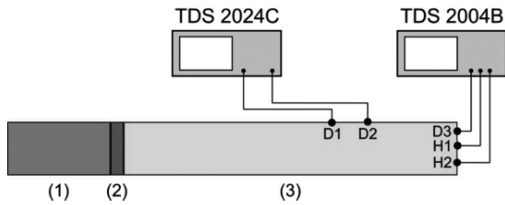
В работе [12] целью исследования является изучение тепловых потоков, возникающих при внешнем обтекании модели сверхзвуковым потоком газа. Для проведения исследования были использованы две ударные трубы, отличающиеся геометрией каналов (рис. 6, а, б) и диапазоном достижимых газодинамических параметров.

В качестве метода регистрации теплового потока были использованы два различных типа датчиков. В качестве основного использовался датчик на анизотропных термоэлементах из висмута, обладающий временем отклика 10 нс, и тонкопленочный датчик сопротивления, который применялся в качестве контрольного, со временем отклика 1 мкс (рис. 7).

Одновременное измерение теплового потока с помощью двух датчиков с различным принципом действия в исследовании [13] позволило повысить достоверность полученных результатов.



а



б

Рис. 6. Схемы ударных труб, использованных в исследовании [12]: а — схема рабочей камеры ударной трубы с соплом — большой ударной трубы; б — схема экспериментальной установки — малой ударной трубы: 1 и 2 — камера высокого и низкого давления; 3 — блок диафрагм; D1–D3 — датчики давления; H1 — датчик на анизотропных термoeлементах; H2 — тонкопленочный датчик сопротивления



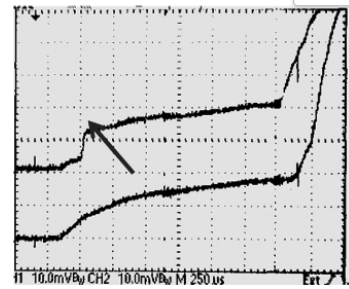
а



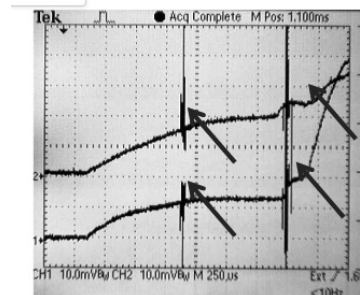
б

Рис. 7. Метод регистрации теплового потока: а — пластиковая модель с 6 тепловыми датчиками; б — металлическая модель с 2 тепловыми датчиками

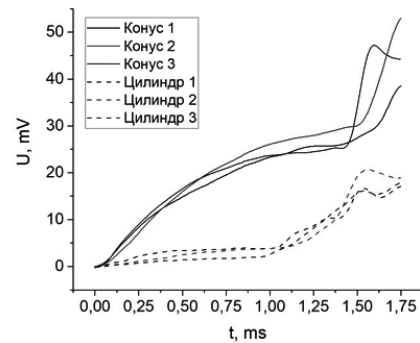
После регистрации параметров теплового потока с помощью датчиков впоследствии требовалось не только перевести их в требуемые величины, но также и наладить функцию сглаживания посторонних шумов (рис. 8).



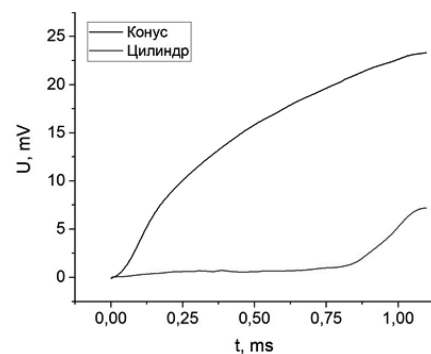
а



б



в



г

Рис. 8. Типичный сигнал теплового датчика: а — необработанный сигнал с датчиков на пластиковой модели, искаженный импульсными помехами; б — необработанный сигнал с датчиков на металлической модели, искаженный импульсными помехами; в — обработанный сигнал с датчиков на пластиковой модели; г — обработанный сигнал с датчиков на металлической модели

Заметные колебания температуры поверхности, пропорциональные электрическому сигналу, привели к существенным колебаниям рассчитанного теплового потока. По этой причине было уделено особое внимание подготовке исходного электрического сигнала при низком соотношении сигнал/шум.

Несмотря на трудоемкий процесс постобработки данных, полученных при регистрации, верифицированная с помощью двух способов измерения система является довольно точным методом измерения тепловых потоков при сверхзвуковом обтекании тел.

Исследование [14] показывает возможность использования ударных труб для изучения радиационных процессов в высокотемпературных газовых потоках. В данном случае регистрировалось испускание и поглощение света в тепловом потоке спектральными измерениями. Схема установки представлена на рис. 9.

Помимо использования спектрографического метода для регистрации излучения ударно-нагретого газа, через оптические окна из плавленого кварца, также регистрировались скорость и давление во фронте ударной волны с помощью пьезодатчиков P8–P7, установленных на стенке ударной трубы.

Для измерения эволюции излучения во времени в ударно-сжатом слое в системе регистрации предусмотрены два канала, где первый постоянно измеряет излучение в диапазоне 200–850 нм, а второй канал используется для регистрации измерений в выделенном

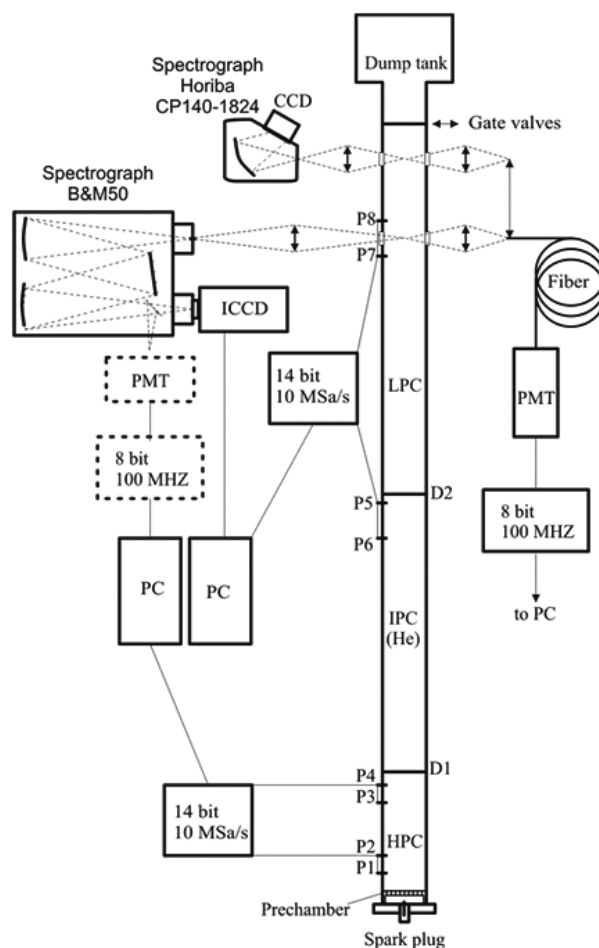


Рис. 9. Схема установки двухдиафрагменной ударной трубы

спектральном интервале. Результаты, полученные при проведении данного исследования, представлены на рис. 10.

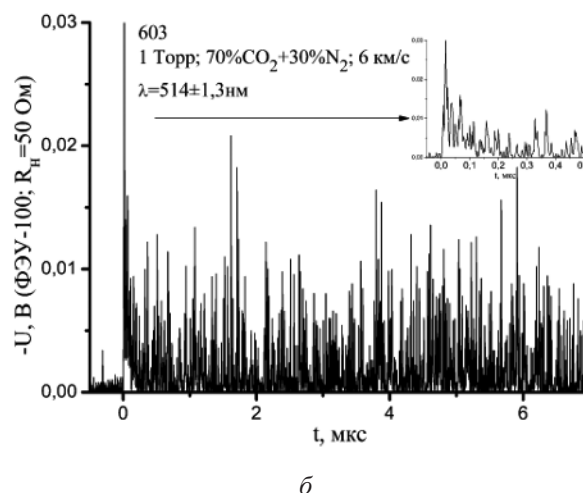
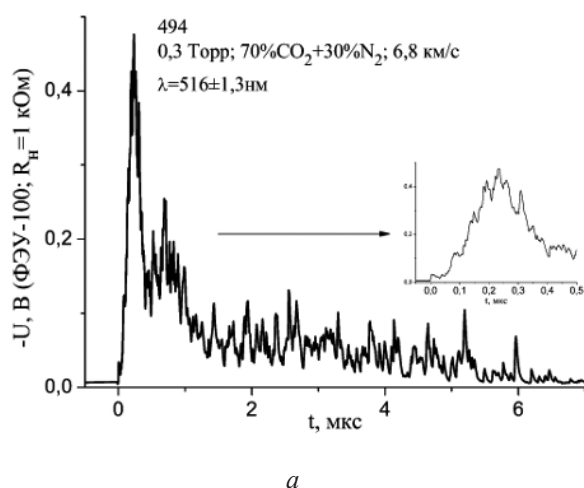


Рис. 10. Эволюции во времени излучения различных молекулярных полос в смеси 70 %  $\text{CO}_2$  + 30 %  $\text{N}_2$ : полосы Свана молекулы  $\text{C}_2$

В потоке газа, формирующемся в сверхзвуковых аэродинамических трубах, присутствуют различные фоновые возмущения, в исследовании [15] утверждается, что фон определяется в основном звуком, который излучает турбулентный пограничный слой, образующийся на стенках сопла и рабочей части. Влияние трубного фона на некоторые исследуемые характеристики (например, в исследовании [13]) создает значительные трудности при постобработке результатов экспериментов. Исследование [15] было направлено на изучение пульсаций давления в сверхзвуковых аэродинамических трубах кратковременного и длительного действия при числе Маха, равным 6. Схема аэродинамической ударной трубы, использованной в эксперименте, представлена на рис. 11.

В ходе выполнения данной работы решалась и методическая задача. Она связана с кратковременностью квазистационарного процесса в ударной трубе и со стохастическим характером возмущений, генерируемых в аэродинамической трубе, а также необходимостью большого числа реализаций для получения надежных результатов. Для этого градуировка датчиков осуществлялась статическим методом и проводилась как в ходе эксперимента, так и после него. Полученные результаты представлены на рис. 12.

Для исследований турбулентного перемешивания в экспериментах на ударных трубах применяются различные методы визуализации. Например, в исследовании [16] использовались:

- а) визуализация теньвым методом с регистрацией скоростной кинокамерой СФР;
- б) визуализация зоны турбулентного перемешивания методом лазерного ножа с регистрацией течения в однокадровом режиме.

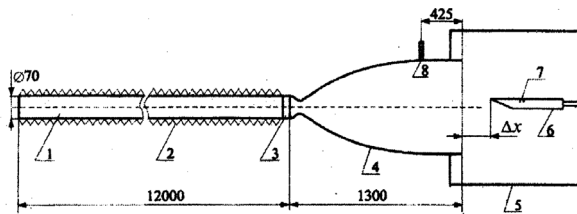


Рис. 11. Схема аэродинамической трубы [10]:  
1 — канал трубы; 2 — омический подогреватель;  
3 — диафрагменный отсек; 4 — профилированное сопло; 5 — рабочая часть; 6 — модель; 7 — датчик пульсации давления Kulite на модели; 8 — датчик пульсации давления Kulite

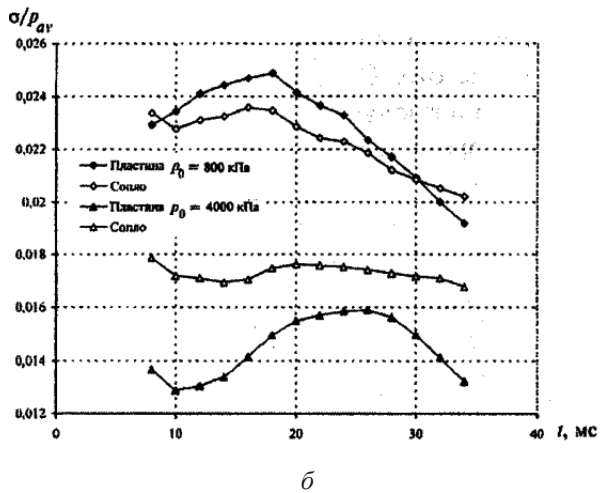
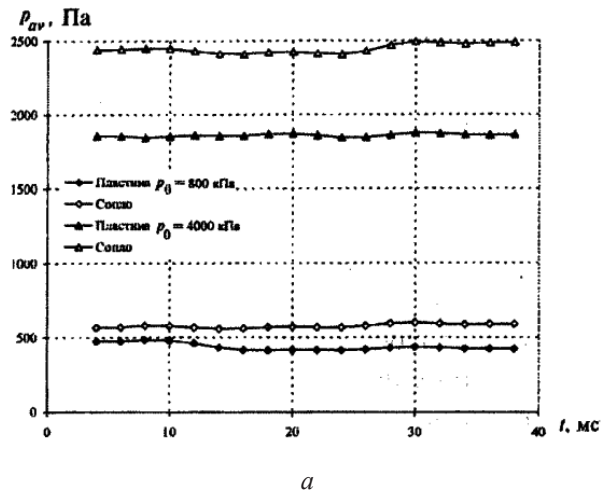


Рис. 12. Измерение среднего давления и среднеквадратичных уровней пульсационной составляющей

Для изучения турбулентных течений исследователями [16] использовалась цилиндрическая ударная труба, схема измерительной секции представлена на рис. 13.

Картина течения, полученная при визуализации теньвым методом показана на рис. 14, а фотографии, полученные методом лазерного ножа, на рис. 15.

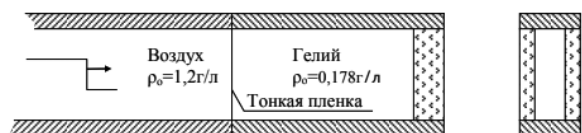


Рис. 13. Схема измерительной секции ударной трубы в экспериментах по исследованию развития зоны турбулентного перемешивания на плоской границе воздух — гелий, ускоряемой ударными волнами

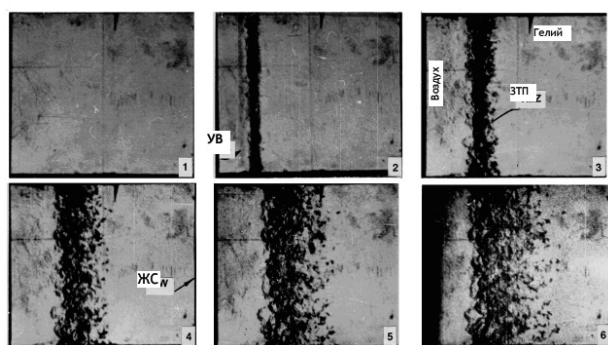


Рис. 14. Развитие зоны турбулентного перемешивания (ЗТП) на границе воздух — гелий: УВ — ударная волна; ЖС — жесткая стенка

Авторы отмечают, что характер изображения зоны перемешивания в рассеянном свете (рис. 15) существенно отличается от ее изображения, полученного теньвым методом (рис. 14). Характерной особенностью изображения (рис. 15) является наличие достаточно четко выраженной границы между воздухом («тяжелый» газ) и зоной перемешивания, в то же время такая граница между зоной перемешивания и гелием («легкий» газ) не наблюдается. Приведенная на рис. 15 фотография раскрывает механизмы зоны турбулентного перемешивания на сравнительно поздней стадии, когда фрагменты пленки, первоначально разделявшей газы, в основной массе сместили к краю зоны, и их влияние на развитие зоны свелось к минимуму.

С помощью фотометрии в работе [16] были получены данные об изменении концентрации воздуха на границе турбулентного течения (рис. 16).

Методы цифрового анализа также применялись в работе [7], исследование в которой на-

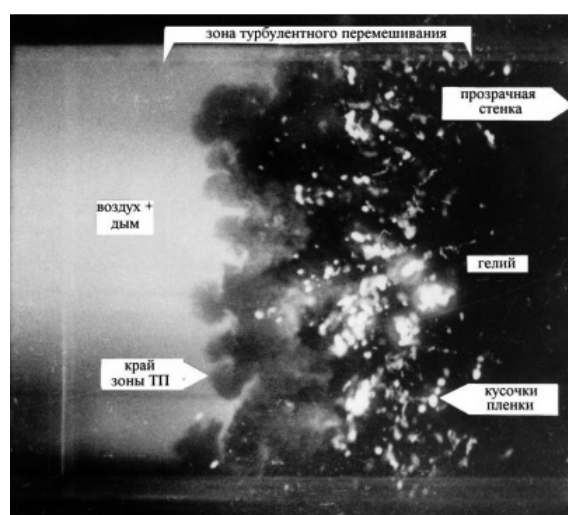


Рис. 15. Фотография зоны турбулентного перемешивания, полученная методом лазерного ножа на границе воздух (с примесью дыма) — гелий на момент времени  $t \approx 900$  мкс

правлено на изучение методов цифрового анализа изображений жидких и газоплазменных потоков на основе кросс-корреляционной обработки. В работе исследовались поля плотности прозрачных сред теньвым фоновым методом (ТФМ) и поля скоростей газоплазменных жидких потоков, полученных с использованием как засевого, так и беззасевого трассирования. В физике и механике жидкости, газа и плазмы цифровые технологии дали возможность получения количественной информации о параметрах потока через компьютерную обработку цифровых изображений. Первоначально для определения смещений частиц в засеянном потоке жидкости

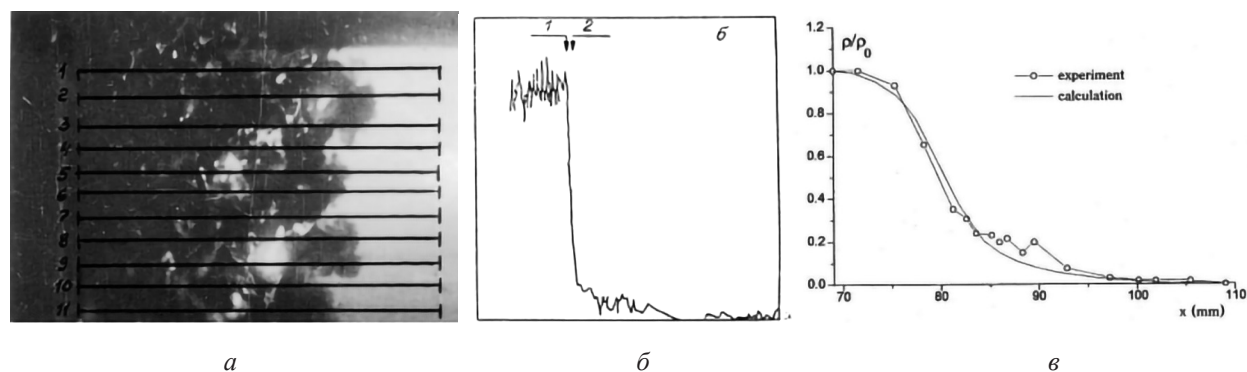


Рис. 16. Фотометрия: а — фрагмент фотографии ( $t \approx 800$  мкс), подвергнутой фотометрированию по линиям, нанесенным на фотографии, б — распределение концентрации воздуха по результатам фотометрирования фотографии по линии № 5 (после обработки), в — усредненное распределение концентрации воздуха в зоне турбулентного перемешивания на границе воздух — гелий. Сравнение с расчетом

или газа широко использовался базовый кросс-корреляционный алгоритм. Пример обработки кросс-корреляционным алгоритмом газоплазменного течения с разрывами представлен на рис. 17, а, б, а метод цифрового трассирования — на рис. 18, а–в.

Обобщая рассмотренные работы, можно сказать, что основными методами регистрации данных при различных исследованиях являются:

1. Высокоскоростная фотографическая съемка. Газодинамический процесс можно сфотографировать либо благодаря собственному свечению газа, нагретого до высокой температуры, либо в свете постоянного источника. Также широко применяется метод фоторазвертки, благодаря которому можно определить скорость движения скачков уплотнения;

2. Измерение плотности. Для измерения распределения плотности газа при ударно-волновых процессах в основном применяется интерференционный метод, шпирен-метод и теневой. В слабых УВ возможно зарегистрировать изменение плотности по отражению света от поверхности фронта. Распределение плотности также можно измерить по рассеянию электронного пучка, по поглощению рентгеновских лучей;

3. Измерение концентрации компонент газа. В случае когда в неравновесном слое за скачком уплотнения протекает диссоциация молекул или химическая реакция, можно следить за изменением концентрации определенных частиц. Это возможно если частицы обладают резко выраженным поглощением света;

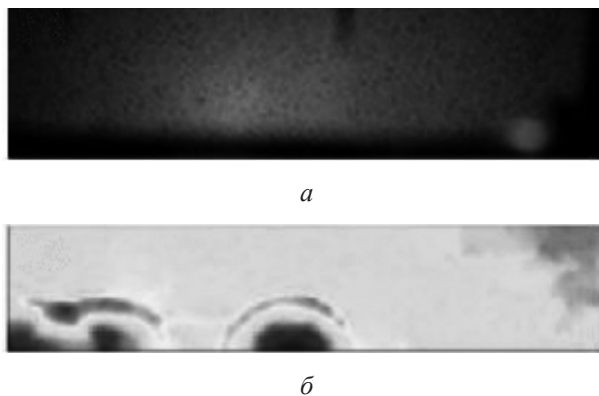


Рис. 17. Теневой фоновый метод. Исходный снимок (а) и результат обработки (б) поля течения, индуцированного импульсными поверхностными разрядами

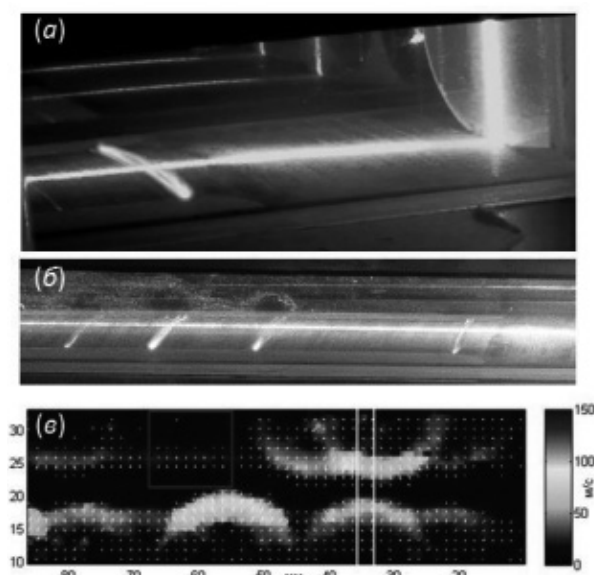


Рис. 18. Метод цифрового трассирования. Вид области регистрации (а–б) и результат обработки (в) поля течения через 21 мкс после инициирования импульсных поверхностных разрядов

4. Измерение испускания и поглощения света. Подобное изучение возможно производить спектральными измерениями интенсивности испускания света газом, нагретым УВ. Зная плотность газа и температуру, можно определить лучеиспускательную способность при разных температурах и в разных участках спектра;

5. Измерение температуры. Для измерения высоких температур чаще всего применяют оптические методы;

6. Измерение концентрации электронов и электропроводности. Для измерения степени ионизации газа и концентрации электронов в УВ часто используют метод зондов Лэнгмюра, метод поглощения и отражения микрорадиоволн;

7. Измерение давления. Для измерения давления используют пьезоэлектрические датчики с чувствительным элементом из титаната бария;

8. Измерение скорости фронта УВ. Проще всего измерять скорость, регистрируя тем или иным методом моменты прохождения УВ определенных сечений в трубе, отстоящих друг от друга на известных расстояниях. Для регистрации используются пьезодатчики давления, ионизационные датчики, различные электроконтактные датчики и пр. Очень большие скорости принято измерять при помощи фоторазвертки.

Ударно-волновые процессы — быстропротекающие процессы с высокими перепадами температур и давлений, по этой причине невозможно создание универсальной программы для обработки полученных данных и для каждого эксперимента требуется создание уникальной программы, учитывающей особенности протекающих процессов.

### Выводы

Разнообразие конструкций ударных труб дает возможность исследовать УВ различной формы, интенсивности и прочих параметров в лабораторных условиях. Описанные фундаментальные исследования показывают, что ударные трубы широко применяются в различных областях науки и техники, включая аэродинамику, физику плазмы, физику горения и взрыва, химическую кинетику и материаловедение. Они используются для исследования процессов, происходящих в гиперзвуковых потоках, таких как нагрев, обтекание тел и взаимодействие УВ с различными препятствиями. Обобщая все перечисленное, можно утверждать, что ударные трубы — универсальный инструмент изучения ударно-волновых процессов.

### Список источников

1. Сильников М.В., Гельфанд Б.Е. Фугасные эффекты взрывов. СПб.: Полигон, 2002. 272 с.
2. Гейдон А., Герл И. Ударная труба в химической физике высоких температур / пер. с англ. М.: Мир, 1966. 428 с.
3. Козлов П.В., Романенко Ю.В. Экспериментальное исследование излучения ударно-нагретого воздуха на двухдиафрагменной ударной трубе // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2011. Т. 11. № 1. С. 1–4.
4. Васильева С.Н., Гук И.В. Создание и эксплуатация газодинамической установки «коническая ударная труба» // XIII Всероссийский Съезд по теоретической и прикладной механике; сб. тез. и докл. В 4-х томах, Санкт-Петербург, 21–25 августа 2023 года. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. С. 568–569.
5. Ударные трубы: сборник [переводных] статей; под ред. Х.А. Рахматуллина и С.С. Семёнова. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 699 с.

6. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений: изд. 2-е, доп. М.: Наука, 1966. 688 с.

7. Знаменская И.А., Коротева Е.Ю., Глазырин Ф.Н. Методы цифрового анализа изображений жидких и газоплазменных потоков на основе кросс-корреляционной обработки // Научная визуализация. 2018. Т. 10. № 4. С. 111–119.

8. Хэншел Б. Использование многодиафрагменной схемы в ударной трубе. В кн.: Ударные трубы. М.: ИЛ, 1962. С. 190–217.

9. Mével, R. & Shepherd, J.E.. (2014). Ignition Delay-Time behind Reflected Shock Waves of Small Hydrocarbons-Nitrous Oxide(Oxygen) Mixtures. Shock Waves. In press. 10.1007/s00193-014-0509-4.

10. Silnikov M.V., Khomik S.V., Guk I.V. et al. Simulation of Interaction between a Spherical Shock Wave and a Layer of Granular Material in a Conical Shock Tube // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2021. Vol. 15. No 4. Pp. 685–690.

11. Сильников М.В., Хомик С.В., Иванцов А.Н. Ослабление сферической ударной волны перфорированной перегородкой в конической ударной трубе // Химическая физика. 2022. Т. 41. № 8. С. 88–82.

12. Saxena, Saumitra et al. A shock tube study of ignition delay in the combustion of ethylene. Combustion and Flame 158, 2011. Pp. 1019–1031.

13. Попов П.А., Сахаров В.А., Лапушкина Т.А. и др. Измерение тепловых потоков датчиками на анизотропных термоэлементах в газодинамическом эксперименте на ударных трубах // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2021. Т. 22. № 3. С. 31–41.

14. Козлов П.В., Романенко Ю.В. Ударная труба института механики МГУ для исследования радиационных процессов в высокотемпературных газовых потоках // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2013. Т. 14. № 4. С. 1–5.

15. Боровой В.Я., Скуратов А.С., Столяров Е.П. Пульсации давления в сверхзвуковых аэродинамических трубах кратковременного и длительного действия // Ученые записки ЦАГИ. 2001. № 3–4. С. 1–14.

16. Мешков Е.Е. Применение различных методов визуализации при исследовании турбулентного перемешивания в экспериментах на ударных трубах / Доклад на 15-й Международный симпозиум по визуализации течений

(ISFV15). СарФТИ НИЯУ МИФИ. Минск, Беларусь, 25–28 июня 2012 г. 11 с.

# References

1. Silnikov M.V., Gelfand B.E. High explosive effects of explosions. SPb.: Polygon, 2002. 272 p.
2. Heydon A., Gerl I. Shock tube in the chemical physics of high temperatures: trans. from English. M.: Mir, 1966. 428 p.
3. Kozlov P. V., Romanenko Yu. V. Experimental study of radiation of shock-heated air on a two-diaphragm shock tube // Physico-chemical kinetics in gas dynamics. 2011. Vol. 11. № 1. Pp. 1–4.
4. Vasilyeva S.N., Guk I.V. Creation and operation of the gas-dynamic installation «conical shock tube» // XIII All-Russian Congress on theoretical and applied Mechanics: Collection of abstracts. In 4 vol., St. Petersburg, August 21–25, 2023. St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2023. Pp. 568–569.
5. Percussion pipes: Collection of [translated] articles / Ed. [and with an introductory article] by H.A. Rakhmatullina and S.S. Semenov. Moscow: Publishing House of Foreign Literature, 1962. 699 p.
6. Zeldovich Ya.B., Raizer Yu.P. Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena – ed. the second, augmented. M.: Nauka Publishing House, 1966. 688 p.
7. Znamenskaya I.A., Koroteeva E.Y., Glazyrin F.N. (2018) Methods of digital image analysis of liquid and gas plasma flows based on cross-correlation processing // Scientific visualization, Vol. 10. No 4. Pp. 111–119.
8. Hanshel B. The use of a multi-fragment circuit in a shock tube. In the book: Percussion pipes. M.: IL, 1962. Pp. 190–217.
9. Mével, R. & Shepherd, J.E. (2014). Ignition Delay-Time behind Reflected Shock Waves of Small Hydrocarbons-Nitrous Oxide(-Oxygen) Mixtures. Shock Waves. In press. 10.1007/s00193-014-0509-4.
10. Silnikov M.V., Khomik S.V., Guk I.V. et al. Simulation of Interaction between a Spherical Shock Wave and a Layer of Granular Material in a Conical Shock Tube // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2021. Vol. 15. No 4. Pp. 685–690.
11. Silnikov M.V., Khomik S.V., Ivantsov A.N. et al. Attenuation of a spherical shock wave by a perforated partition in a conical shock tube // Chemical Physics, 2022. Vol. 41. No 8. Pp. 88–82.
12. Saxena, Saumitra et al. A shock tube study of ignition delay in the combustion of ethylene. Combustion and Flame 158. 2011. Pp. 1019–1031.
13. Popov P.A., Sakharov V.A., Lapushkina T.A. et al. Measurement of heat fluxes by sensors on anisotropic thermoelements in a gas-dynamic experiment on impact pipes // Physico-chemical kinetics in gas dynamics. 2021. Vol. 22. No 3. Pp. 31–41.
14. Kozlov P.V., Romanenko Yu.V. Shock tube of the Institute of Mechanics of Moscow State University for the study of radiation processes in high-temperature gas flows // Physico-chemical kinetics in gas dynamics. 2013. Vol. 14. No 4. Pp. 1–5.
15. Borovoy V.Ya., Skuratov A.S., Stolyarov E.P. Pressure pulsations in supersonic wind tunnels of short-term and long-term action // Scientific notes of TsAGI. 2001. No. 3–4. Pp. 3–14.
16. Meshkov E.E.. The use of various visualization methods in the study of turbulent mixing in experiments on impact pipes. Report to the 15th International Symposium on Flow Visualization (ISFV15). SarFTI NIYAU MEPI. Minsk, Belarus, June 25–28, 2012. 11 p.

УДК 623.09

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_83

**ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ  
СЛОЖНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ  
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**ESTIMATION OF RELIABILITY INDICATORS IN THE DESIGN OF COMPLEX  
RADIO-ELECTRONIC SYSTEMS ON THE BASIS OF SIMULATION MODELLING**

*Канд. техн. наук И.Б. Загер, Д.А. Петров, В.А. Панкратов, Р.С. Шафир*

*Ph.D. I.B. Zager, D.A. Petrov, V.A. Pankratov, R.S. Shafir*

*МГУ им. М.В. Ломоносова*

В работе рассмотрены существующие методы определения показателей надежности при проектировании сложных радиоэлектронных систем. Показано, что классические расчетные методы позволяют получить лишь предварительные результаты и зачастую являются грубыми. Предложен способ, позволяющий повысить достоверность расчета показателей надежности сложной радиоэлектронной системы на этапах проектирования. В основе способа лежит применение методов имитационного моделирования, учитывающего взаимное влияние отказов элементов на работоспособность системы. Проведены демонстрационные вычислительные эксперименты, подтвердившие эффективность предложенного способа имитационного моделирования отказов системы. Разработанный способ целесообразно применять для определения показателей надежности сложных технических систем.

**Ключевые слова:** показатели надежности, коэффициент готовности, техническая система, радиоэлектронная аппаратура.

The paper considers the existing methods of determining reliability indices in the design of complex radio-electronic systems. It is shown that classical design methods allow to obtain only preliminary results and are often of an evaluative nature.

The method allowing to increase the reliability assessment of reliability indicators of a complex radio-electronic system at the design stages is proposed. The method is based on the application of simulation modelling methods, taking into account the mutual influence of element failures on the system operability. Demonstration computational experiments were carried out, which confirmed the effectiveness of the proposed method of simulation modelling of system failures. The developed method is expedient to apply for determination of reliability indicators of complex technical systems.

**Keywords:** reliability indicators, availability factor, technical system, radio-electronic equipment.

**Введение**

Для обеспечения заданных требований по надежности сложных радиоэлектронных систем (РЭС) различного назначения крайне важно

своевременно и достоверно оценивать показатели надежности (ПН) уже на ранних этапах их проектирования.

Примечание: согласно ОСТ Р 52003–2003 понятие «РЭС» трактуется как радиоэлектрон-

ное средство. В настоящей работе мы отходим от общепринятого сокращения.

Наибольшее распространение в практике проектирования РЭС получили статические методы расчетов ПН по структурным схемам надежности с учетом конкретных типов отказов системы, а также выбранного типа резервирования аппаратуры [1].

Одним из вариантов анализа возможных факторов и причин, которые могут привести к отказу РЭС, является разработка дерева отказов (либо его аналога — дерева неисправностей). Согласно [2] цель разработки дерева неисправностей заключается в определении и анализе условий и факторов, которые приводят или могут привести к возникновению негативных завершающих событий — полной или частичной утрате функций, деградации рабочих характеристик изделия, ухудшению безопасности или других важных рабочих свойств.

Методы определения ПН согласно структурным схемам надежности или на основе деревьев неисправностей относятся к классу статических методов, в которых состояния системы определяются наборами работоспособных и неработоспособных элементов в заданный момент времени.

Альтернативой статическим методам расчета ПН являются динамические методы, в которых происходящие события (отказы) рассматриваются как процессы, развивающиеся во времени. Согласно работе [3] особенностями динамических моделей являются:

- моделирование поведения РЭС с помощью марковских, полумарковских, либо многомерных марковских процессов [4];
- применение методов теории восстановления, полумарковских и регенерирующих процессов (в основном, используются асимптотические результаты либо для системы в целом, либо для отдельных резервированных звеньев) [5];
- использование статистического имитационного моделирования (Монте Карло).

Применение имитационного моделирования для определения ПН сложной технической системы подробно описано, например, в работах [6–8]. При этом в предложенных авторами моделях существует ряд ограничений, таких как:

- не учет структуры технической системы;
- не учет различных типов отказов РЭС;

– не учет влияния динамических физических процессов на надежность системы.

Как статические, так и динамические методы расчета ПН сложных РЭС, как правило, применяются при следующих допущениях:

- наработка до отказа радиоэлектронных блоков аппаратуры имеет экспоненциальное распределение;
- значения интенсивностей отказов аппаратуры определяются на основе аналогов, либо расчетным методом;
- типовые элементы замены представляются на структурной схеме надежности равнонадежными, из-за чего не учитываются различные физические условия их функционирования, обусловленные, например, разным тепловым режимом.

В этой связи, выдвинем гипотезу о том, что повысить достоверность определения оценки ПН при проектировании сложных РЭС возможно за счет разработки динамической имитационной модели отказов РЭС, которая учитывает:

- детальную структуру РЭС;
- различные критерии отказа РЭС;
- взаимное влияние состояния элементов РЭС, что может приводить к зависимым отказам;
- нестационарности показателей надежности элементов РЭС.

Как отмечено в работе [3], имитационное моделирование является наиболее эффективным, а в ряде случаев даже единственно возможным для оценки показателей надежности уникальных или малосерийных технических систем, однако оно также имеет свои ограничения, связанные со значительными затратами машинного времени для вычислений ПН с высокой степенью точности.

### **Разработка динамической имитационной модели отказов РЭС**

Рассмотрим РЭС, которая имеет многоуровневую структуру, как показано на рис. 1.

Иерархия уровней радиоэлектронной аппаратуры подробно рассмотрена в работе [9]. Типовыми элементами замены рассматриваемой РЭС являются радиоэлектронные блоки. Будем полагать, что рассматриваемая РЭС является восстанавливаемой с точки зрения надежности. В качестве основного показателя надежности будем рассматривать коэффициент готовности сис-

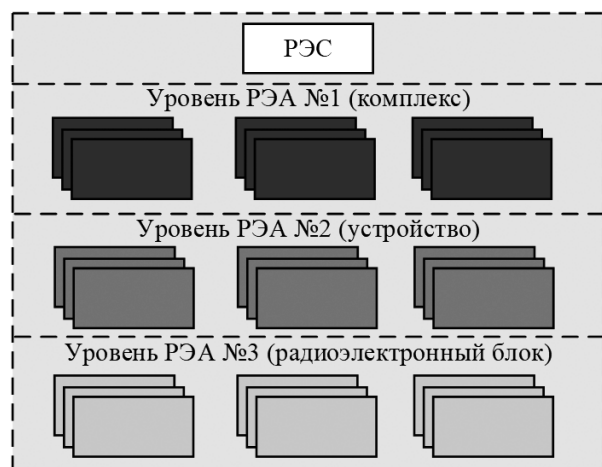


Рис. 1. Многоуровневая структура РЭС

темы, определяемый в стационарном случае по формуле:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_0}{T_0 + T_B},$$

где  $T_0$  — средняя наработка РЭС между отказами;

$T_B$  — среднее время восстановления РЭС.

Основной трудностью для анализа многоуровневой РЭС с точки зрения надежности является взаимное влияние элементов РЭС друг на друга (зависимые отказы), различные типы отказов РЭС.

Для получения достоверных оценок ПН сложной РЭС на этапах ее проектирования в настоящей работе был разработан способ оценки коэффициента готовности РЭС на основе имитационного моделирования. Структурная схема данного способа представлена на рис. 2.

Раскроем более подробно каждую операцию способа.

1. Формирование базы данных по аппаратуре РЭС.

В зависимости от этапа проектирования РЭС набор исходных данных может быть различным. На каждом последующем этапе набор данных увеличивается, что позволяет более достоверно определять ПН РЭС. Основными исходными данными для оценки ПН всей РЭС, как правило, выступают значения средних наработок до отказа (либо интенсивностей отказа) типовых элементов замены. Данные значения, в свою очередь, при проектировании РЭС либо берутся по аналогам, либо определяются расчетным методом с

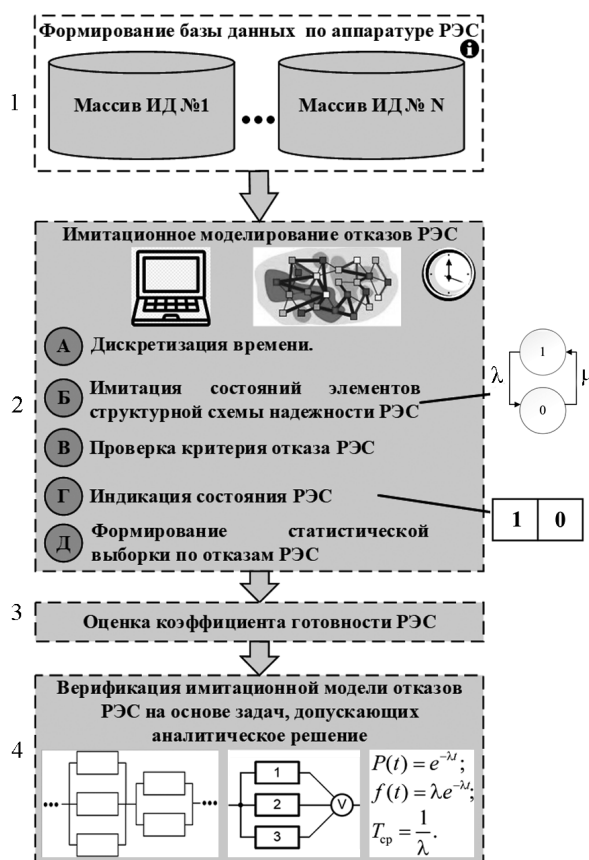


Рис. 2. Структурная схема способа оценки коэффициента готовности при проектировании РЭС

учетом баз данных и справочников [10], условий эксплуатации, комплекта карт рабочих режимов, исходных данных по моделированию физических процессов в специализированных системах автоматизированного проектирования (САПР).

2. Имитационное моделирование отказов РЭС.

Опишем последовательность операций при имитационном моделировании отказов РЭС:

А. Дискретизация времени, которая подразумевает задание времени моделирования, а также выбора шага по времени. Как правило, шаг по времени подбирается эмпирически в зависимости от специфики рассматриваемой задачи. Применительно к задаче имитации отказов РЭС и аппаратуры из ее состава, степень временной дискретизации целесообразно выбирать в соответствии с частотой опроса встроенных средств контроля технического состояния элементов РЭС.

Б. Имитация состояния элементов структурной схемы надежности РЭС. Будем полагать, что

каждый элемент РЭС может находиться только в двух состояниях: работоспособном и неработоспособном, как показано на рис. 3.

При этом, в том случае, если для наработки элемента справедливо экспоненциальное распределение, имеют место следующие соотношения:

$$\lambda = \frac{1}{T_{\text{сп}}}; \mu = \frac{1}{T_{\text{в}}}.$$

Пусть в дискретный момент времени  $t_i$  элемент находится в состоянии  $S_0$ . Тогда в момент времени  $t_i + dt$  ( $dt$  — шаг по времени) необходимо смоделировать либо событие «переход в состояние  $S_0$ », либо событие «остаться в состоянии  $S_0$ ».

Переходы между состояниями элемента технической системы при переходе от одного момента времени к другому реализуются с помощью датчика случайных чисел. Каждому событию отводится своя область, совпадающая с вероятностью данного события. При переходе между дискретными моментами времени  $t_i$  и  $t_i + dt$  генерируется случайное число  $\text{rand}$ , имеющее равномерное распределение на отрезке  $[0,1]$ .

Если случайное число  $\text{rand}$  попадает в диапазон  $[0, \lambda \cdot dt]$ , то произойдет переход элемента в состояние  $\bar{S}_0$ . Если же число  $\text{rand}$  попадает в диапазон  $[\lambda \cdot dt, 1]$ , элемент останется в состоянии  $S_0$ .

Для формализации условия «элемент находится в состоянии  $S_0$ » (либо  $\bar{S}_0$ ) введем бинар-

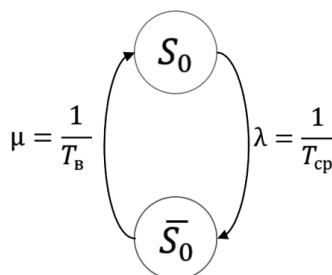


Рис. 3. Модель отказа и восстановления элемента системы:  $S_0$  — работоспособное состояние элемента;  $\bar{S}_0$  — неработоспособное состояние элемента;  $\lambda$  — интенсивность отказов элемента;  $T_{\text{сп}}$  — средняя продолжительность безотказной работы элемента;  $\mu$  — интенсивность восстановления элемента;  $T_{\text{в}}$  — среднее время восстановления элемента

ную переменную condition. Определим ее следующим образом: если элемент находится в состоянии  $S_0$ , то переменная condition принимает значение 1. В состоянии  $\bar{S}_0$  переменная condition равна нулю.

Также определим переменные  $n_1, n_0$  — частоты нахождения системы в работоспособном и неработоспособном состояниях. Если элемент начиная с момента времени  $t_i$  до момента времени  $t_i + dt$  находился в состоянии  $S_0$ , то значение  $n_1$  должно быть увеличено на единицу.

Дополнительно реализуем в программе расчет нестационарного коэффициента готовности элемента в момент времени  $t$ , который определяется выражением:

$$K_{\text{г}}(t) = \frac{n_1(t)}{n_1(t) + n_0(t)}.$$

Алгоритм работы программы, реализующей имитацию состояния элемента структурной схемы надежности и расчет его нестационарного коэффициента готовности представлен на рис. 4.

В. Проверка критерия отказа РЭС, то есть набора условий, по которым можно определить, что РЭС больше не функционирует должным образом или не может выполнять свои задачи.

Г. Индикация состояния РЭС, которая подразумевает запись текущего состояния РЭС в специальную переменную (значения данной переменной выбираются по правилу: 1 — РЭС работоспособна, 0 — РЭС неработоспособна).

Д. Формирование статистической выборки по отказам РЭС.

3. Оценка коэффициента готовности РЭС.

При проведении имитационного моделирования отказов системы в каждый дискретный момент времени производится индикация функции работоспособности системы  $S$ , принимающей значения 1 или 0 ( $S = 1$  — система работоспособна,  $S = 0$  — система неработоспособна).

Закон распределения дискретной величины  $S$  имеет следующий вид:

$$P(S = 1) = p, \quad P(S = 0) = 1 - p,$$

где  $P(A)$  — вероятность события  $A$ ;

$p$  — неизвестное число, подлежащее оценке, которое и выражает стационарный коэффициент готовности РЭС.

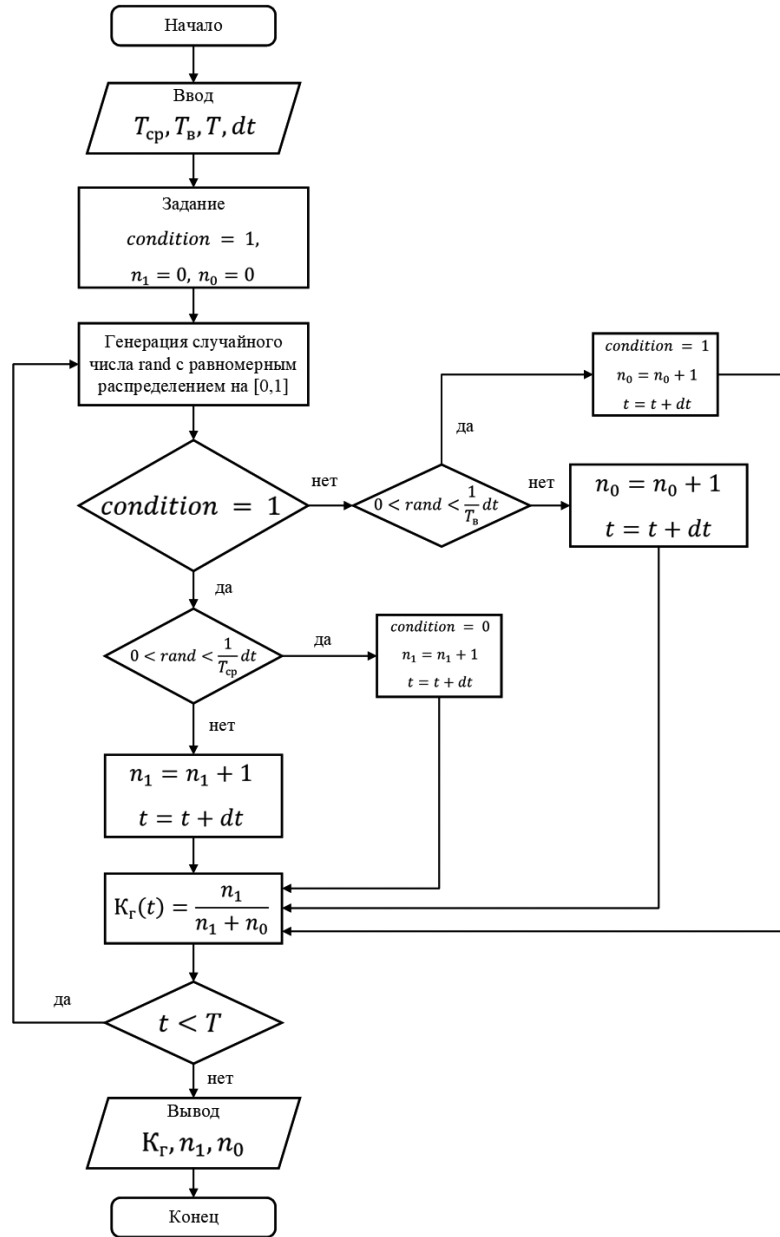


Рис. 4. Алгоритм работы программы, реализующей имитацию состояния элемента системы

Выразим математическое ожидание и дисперсию случайной величины  $S$  через вероятность  $p$ :

$$M[S] = 1 \cdot p + 0 \cdot (1 - p) = p;$$

$$D[S] = (1 - p)^2 \cdot p + (0 - p)^2 \cdot (1 - p) = p(1 - p).$$

Вычислим математическое ожидание и дисперсию абсолютной частоты:

$$y = \sum_{i=1}^n S_i,$$

где  $S_i$  — реализация  $S$  в  $i$ -м опыте. Справедливы следующие выражения:

$$M[y] = M\left[\sum_{i=1}^n S_i\right] = \sum_{i=1}^n M[S_i] = np;$$

$$D[y] = \sum_{i=1}^n D[S_i] = np(1 - p).$$

Таким образом, случайная величина  $y$  имеет биномиальное распределение, которое при достаточно больших  $n$  по теореме Лапласа стремится к нормальному с теми же параметрами.

Запишем оценку как относительную частоту:

$$p^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i = \frac{y}{n}.$$

Закон распределения  $p^*$  как линейной функции  $y$  также является асимптотически нормальным. Математическое ожидание и дисперсия случайной величины определяются выражениями:

$$M[p^*] = \frac{1}{n} M[y] = p;$$

$$D[p^*] = \frac{1}{n^2} D[y] = \frac{p(1-p)}{n}.$$

Оценка  $p^*$  является несмещенной, поскольку  $p^*$  имеет математическое ожидание  $p$  и состоятельной, поскольку дисперсия стремится к нулю при увеличении  $n$ .

4. Верификация имитационной модели отказов РЭС.

Имитационная модель отказов РЭС должна быть верифицирована на основе задач, которые допускают аналитическое решение. К таким задачам относятся, например, расчеты ПН по из-

вестным структурным схемам надежности при допущении об экспоненциальном распределении наработки до отказа. Верификация модели необходима для проверки ее адекватности, а также отладки различных программных ошибок.

### Демонстрационный вычислительный эксперимент

Для оценки эффективности разработанного способа проведем демонстрационный вычислительный эксперимент в Matlab Simulink. При этом сначала рассмотрим те задачи, которые допускают аналитическое решение.

В первом вычислительном эксперименте рассмотрим РЭС без деления ее на составные части. Зададим следующие параметры моделирования:

$T_0 = 100$  ч — средняя наработка РЭС между отказами;

$T_B = 2$  ч — среднее время восстановления РЭС;

$dt = \frac{1}{60}$  ч — шаг по времени;

$T = 10^5$  ч — время моделирования.

Программная реализация имитационной модели отказов РЭС без учета ее структуры показана на рис. 5.

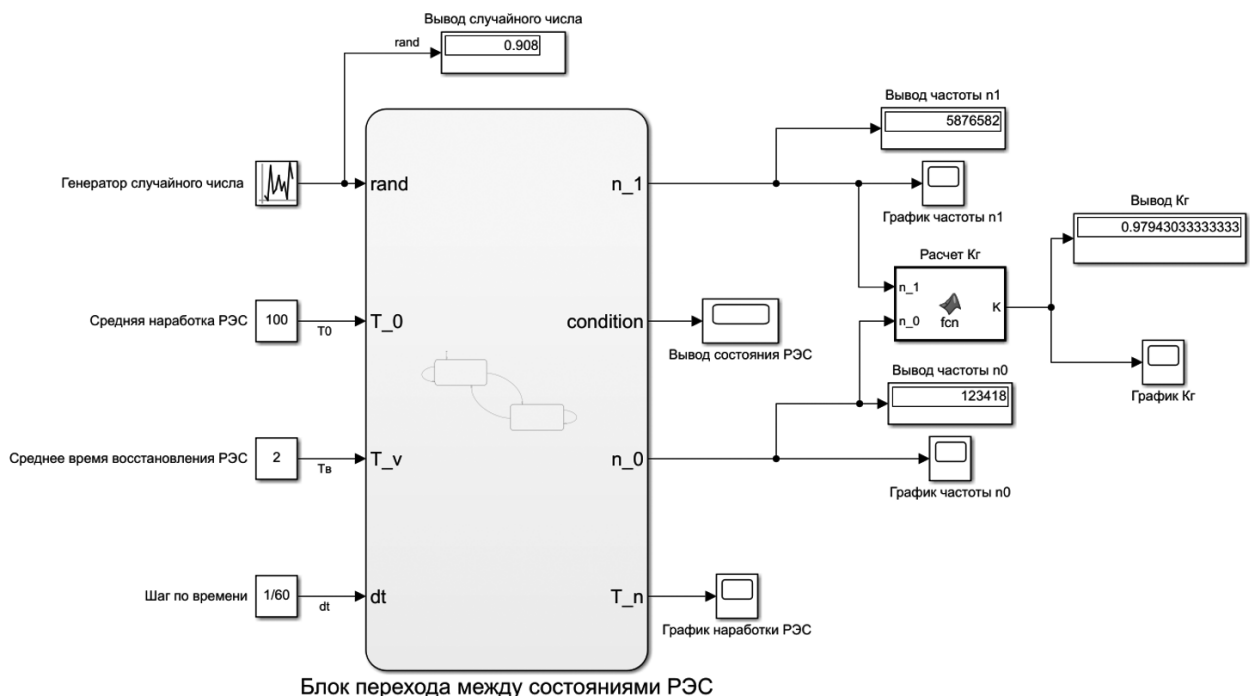


Рис. 5. Программная реализация имитационной модели отказов РЭС без учета ее структуры

Зависимость нестационарного коэффициента готовности РЭС (в одном из запусков программы) от времени представлена на рис. 6.

На рис. 6 видно, что спустя некоторое время моделирования (равное примерно  $10^4$  ч), коэффициент готовности выходит на стационарное значение. Значение коэффициента готовности в конце моделирования равно примерно 0,97943. При этом теоретическое значение равно 0,98039. Расхождение составляет около 0,0979 %.

Во втором вычислительном эксперименте рассмотрим систему, состоящую из трех элементов. Систему будем считать работоспособной в том случае, если работоспособны хотя бы два элемента из трех. Данной системе соответствует следующий граф состояний и переходов (рис. 7).

На рис. 7 состояние № 1 соответствует случаю, когда все элементы работоспособны. Состояние 2 соответствует состоянию с одним неработоспособным элементом. Состояние 3 — два элемента вышли из строя. Система является работоспособной в состояниях 1 и 2. Граф, представленный на рис. 7, составлен из предположения о неограниченном числе бригад для восстановления элементов, одинаковой надежности элементов системы, а также невозможности одновременного отказа сразу двух элементов.

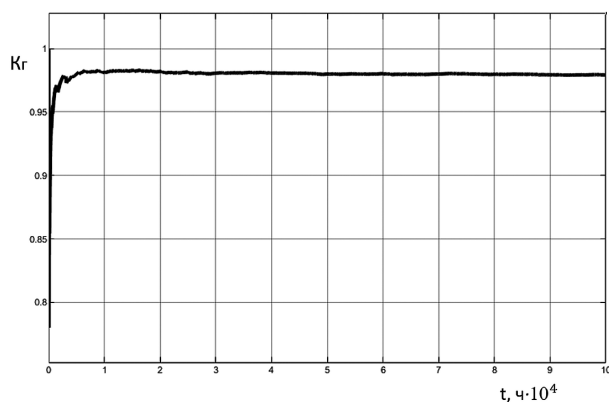


Рис. 6. Зависимость нестационарного коэффициента готовности от времени в первом вычислительном эксперименте

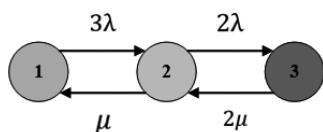


Рис. 7. Граф состояний и переходов

Вероятности нахождения системы в каждом из состояний обозначим как  $P_1(t), P_2(t), P_3(t)$ . Данные вероятности являются функциями от времени и находятся с помощью решения следующей задачи Коши [4]:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -3\lambda P_1(t) + \mu P_2(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = 3\lambda P_1(t) - 2\lambda P_2(t) + 2\mu P_3(t) - \mu P_2(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = 2\lambda P_2(t) - 2\mu P_3(t), \\ P_1(0) = 1, P_2(0) = 0, P_3(0) = 0. \end{cases}$$

Стационарные вероятности (значения  $P_1(t), P_2(t), P_3(t)$  при  $t \rightarrow +\infty$ ) нахождения в состояниях 1, 2 и 3 обозначим соответственно  $P_1, P_2, P_3$ . Значения данных вероятностей определяются следующей системой алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} -3\lambda P_1 + \mu P_2 = 0, \\ 3\lambda P_1 - 2\lambda P_2 + 2\mu P_3 - \mu P_2 = 0, \\ P_1 + P_2 + P_3 = 1. \end{cases} \quad (1)$$

Последнее уравнение обеспечивает условие нормировки вероятностей. Из вероятностного смысла коэффициента готовности следует, что:

$$K_{\Gamma} = P_1 + P_2.$$

Решая приведенную выше систему алгебраических уравнений (1), получим следующее выражение для коэффициента готовности:

$$K_{\Gamma} = \frac{2\mu^2 + 6\lambda\mu}{6\lambda^2 + 2\mu^2 + 6\lambda\mu}.$$

Для расчета возьмем следующие параметры:

$$\lambda = \frac{1}{100} \text{ ч}^{-1}, \mu = \frac{1}{2} \text{ ч}^{-1}.$$

В этом случае  $K_{\Gamma} = 0,9989$ . Имитационное моделирование будем проводить при тех же параметрах и допущениях за исключением одного: при имитации состояний элементов не будем учитывать «обратную связь» между системой и элементами. Будем полагать, что состояние эле-

ментов влияет на состояние системы, а состояние системы не влияет на состояние элементов.

Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 8.

Расчетное значение коэффициента готовности в конце моделирования составляет 0,9915, что примерно на 0,74 % меньше, чем значение 0,9989, полученное аналитически. Полученное расхождение, по-видимому, связано с не учетом «обратной связи» между системой и ее элементами, о чем было изложено.

В третьем вычислительном эксперименте рассмотрим систему, представленную на рис. 9.

Система состоит из блоков двух типов. Отказ блока 1 (первый тип) приводит к отказу трех блоков второго типа, как показано на рис. 9. Система считается работоспособной, если работает не менее двух из шести блоков 2 (блоки второго типа). Время восстановления возьмем таким же, как в предыдущих вычислительных экспериментах. Нарботка блоков первого типа — 100 часов, блоков второго типа — 50 часов. Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 10.

Значение коэффициента готовности в конце моделирования равно примерно 0,9900.

### Выводы

В работе рассмотрены классические методы расчета показателей надежности сложных радиоэлектронных систем при их проектировании. Как показывает анализ, данные методы не всегда являются эффективными при определении пока-

зателей надежности сложных многоуровневых систем, содержащих большое число элементов, при большом числе зависимых отказов и т.д.

В качестве альтернативы разработан способ оценки показателей надежности РЭС на основе имитационного моделирования, который по мнению авторов, позволит более достоверно определить ПН РЭС за счет учета структуры РЭС, взаимного влияния элементов РЭС (зависимые отказы).

Проведены демонстрационные вычислительные эксперименты. Первые два эксперимента показали совпадение результатов расчета коэффициента готовности с помощью модели с высокой степенью точности с расчетами по аналитическим методам. В третьем вычислительном эксперименте рассмотрен случай, когда в системе имеют место зависимые отказы.

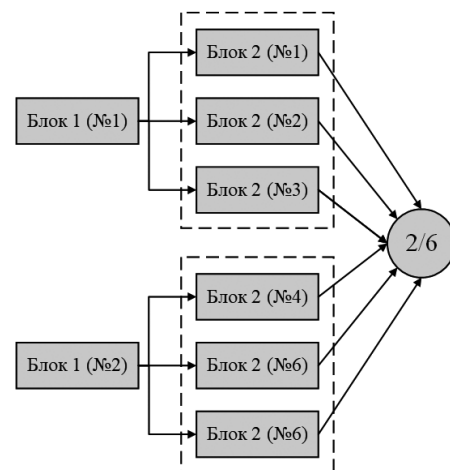


Рис. 9. Вид системы в третьем вычислительном эксперименте

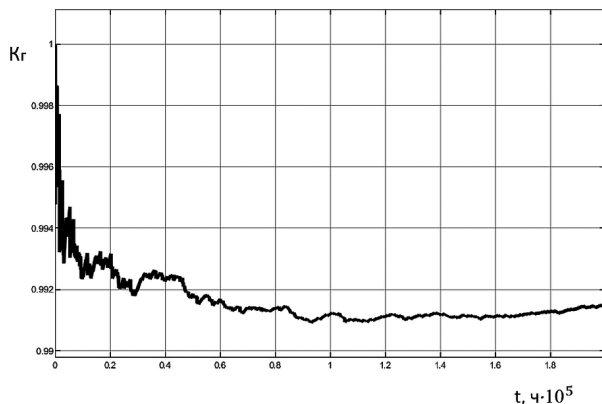


Рис. 8. Зависимость нестационарного коэффициента готовности от времени во втором вычислительном эксперименте

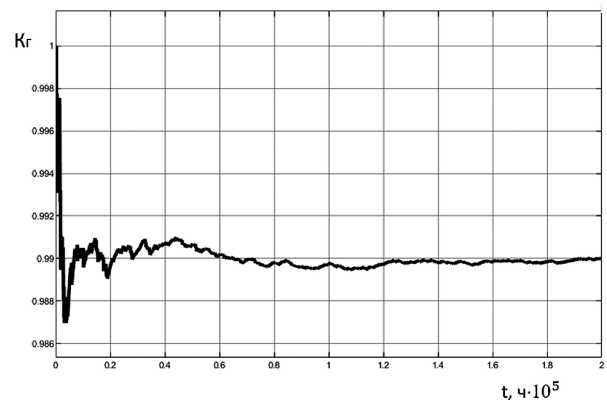


Рис. 10. Зависимость нестационарного коэффициента готовности от времени во втором и третьем вычислительном эксперименте

Наиболее целесообразным, по мнению авторов, является применение разработанного в статье способа в тех ситуациях, когда расчет показателей надежности согласно классическим методам с применением структурных схем надежности, деревьев отказов, графов и пр. является трудоемким, либо получение аналитических решений невозможно в принципе.

Особенностью имитационного моделирования является требование значительных вычислительных затрат в случае большого количества надежных элементов в системе, что требует либо увеличения шага по времени, что может негативно сказаться на точности расчетов, либо выбора мощной вычислительной системы.

Работа выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 24-Ш01-04.

#### Список источников

1. Рябинин И.А. Надежность и безопасность сложных систем. СПб.: Политехника, 2000. 248 с.
2. ГОСТ Р 27.302–2009. Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей. М.: Стандартинформ, 2011. 25 с.
3. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Методы оценки показателей надежности сложных компонентов и систем // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. С. 57.
4. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. 2 изд. перер. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.
5. Коваленко И.Н., Кузнецов Н.Ю. Методы расчета высоконадежных систем. М.: Радио и связь, 1988. 176 с.
6. Дорожко И.В., Копейка А.Л., Захарова Е.А. Имитационная модель для оценивания показателей надежности сложных технических комплексов с учетом показателей контроля и диагностирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 10. С. 490–498.
7. Дорожко И.В., Копейка А.Л. Исследование коэффициента готовности сложных технических комплексов с помощью имитационной модели, разработанной в среде Stateflow пакета MatLab // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2018. № 3(15). С. 18–26.
8. Дорожко И.В., Мусиенко А.С., Сундиев Д.С. Имитационная модель, связывающая по-

казатели надежности с показателями тестового и функционального контроля технических систем // Труды МАИ. 2023. № 130. 27 с.

9. Мадера А.Г. Концепция математического и компьютерного моделирования тепловых процессов в электронных системах // Программные продукты и системы. 2015. № 4 (112). С. 79–86.

10. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.: Сов. радио, 1975. 471 с.

#### References

1. Ryabinin I.A. Reliability and safety of complex systems. St.Petersburg: Politehnika, 2000. 248 p.
2. GOST R 27.302–2009 Reliability in engineering. Fault tree analysis. Moscow: Standartinform, 2011. 25 p.
3. Konesev S.G., Khazieva R.T. Methods for evaluating reliability indicators of complex components and systems // Modern problems of science and education. 2015. No 1–1. Pp. 57.
4. Polovko A.M., Gurov S.V. Fundamentals of reliability theory. St.P.: BHV-Petersburg, 2006. 704 p.
5. Kovalenko I.N., Kuznetsov N.Yu. Methods of calculating highly reliable systems. M.: Radio and Communications, 1988. 176 p.
6. Dorozhko I.V., Kopeyka A.L., Zakharova E.A. Simulation model for evaluating reliability indicators of complex technical complexes taking into account control and diagnosis indicators // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. 2018. No 10. Pp. 490–498.
7. Dorozhko I.V., Kopeyka A.L. Investigation of the readiness coefficient of complex technical complexes using a simulation model developed in the Stateflow environment of the MatLab package // Intelligent technologies in transport. 2018. № 3(15). Pp. 18–26.
8. Dorozhko I.V., Musienko A.S., Sundiev D.S. Simulation model linking reliability indicators with indicators of test and functional control of technical systems // Proceedings of MAI. 2023. No 130. 27 p.
9. Madera A.G. The concept of mathematical and computer modeling of thermal processes in electronic systems // Software products and systems. 2015. No 4 (112). Pp. 79–86.
10. Kozlov B.A., Ushakov I.A. Handbook on calculating the reliability of radio electronics and automation equipment. M.: Soviet Radio, 1975. 471 p.

УДК 355/359

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_92

# МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ НАХОЖДЕНИЯ БОЕВОГО ОХРАНЕНИЯ АВТОКОЛОННЫ В СОСТОЯНИЯХ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ С ДИВЕРСИОННО-РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНОЙ ГРУППОЙ

## A MODEL FOR DETERMINING THE PROBABILITIES OF FINDING COMBAT CONVOY GUARDS IN STATES OF COUNTERACTION WITH A SABOTAGE AND RECONNAISSANCE GROUP

*Д-р техн. наук С.Н. Курков<sup>1</sup>, д-р техн. наук Д.В. Искоркин<sup>1</sup>, Д.В. Моргунов<sup>2</sup>*

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

<sup>1</sup>*Пензенский артиллерийский инженерный институт (филиал) ВА МТО,*

<sup>2</sup>*Вольский военный институт материального обеспечения (филиал) ВА МТО*

Предложена модель определения вероятностей нахождения боевого охранения (БО) в состояниях противодействия диверсионно-разведывательной группе (ДРГ) при ее нападении на автоколонну на основе использования марковского процесса с дискретным числом состояний и непрерывным временем. Получены уравнения связи для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ). Система уравнений решена численным методом Рунге — Кутты 4-го порядка точности в среде Mathcad. При условии стационарности процесса боевого противодействия БО автоколонны ДРГ и преобразования СОДУ получены аналитические зависимости по определению вероятностей нахождения БО в рассматриваемых состояниях в условиях противодействия противнику.

**Ключевые слова:** автоколонна, боевое охранение, диверсионно-разведывательная группа, система обыкновенных дифференциальных уравнений, математическое ожидание (МОЖ), среднеквадратическое отклонение (СКО).

A model for determining the probabilities of finding a combat guard (CG) in the states of countering a sabotage and reconnaissance group (SRG) during its attack on a convoy is proposed on the basis of using a Markov process with a discrete number of states and continuous time. The coupling equations for solving the system of ordinary differential equations (SODE) are obtained. The system of equations is solved by numerical Runge-Kutta method of the 4th order of accuracy in Mathcad environment. Under the condition of stationarity of the process of combat countermeasures against the BW of the SRG convoy and the transformation of the SODE, analytical dependencies for determining the probabilities of finding the CG in the considered states in the conditions of countermeasures against the enemy are obtained.

**Keywords:** convoy, combat guard, sabotage and reconnaissance group, system of ordinary differential equations, mathematical expectation (MOG), standard deviation (RMS), probability density of the transition from the  $i$ -th to the  $j$ -th state.

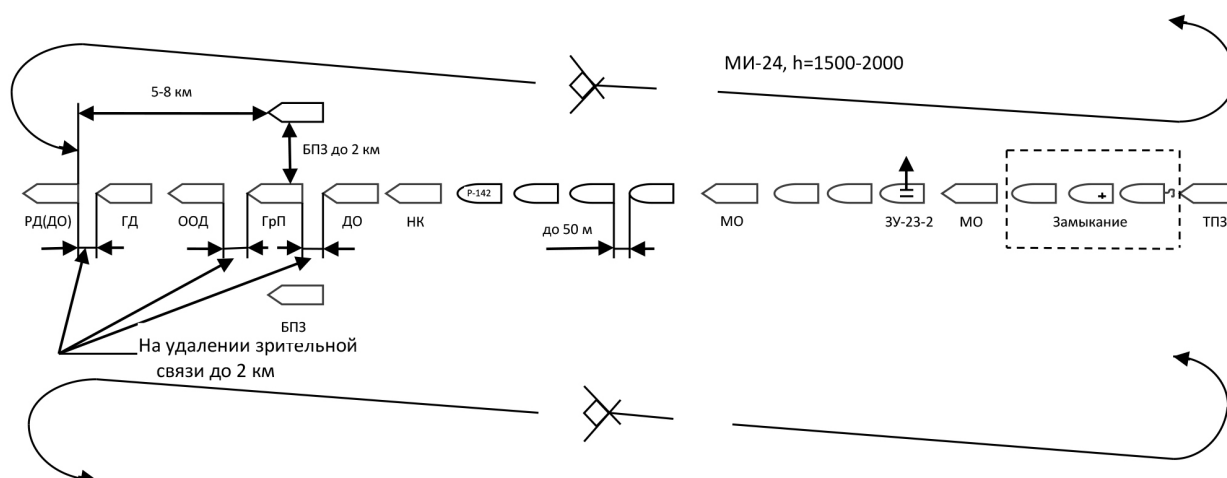


Рис. 1. Вариант схемы построения автомобильной колонны с приданными силами и средствами БО:  
 РД (ДО) — разведывательный дозор (дозорное отделение) (ро или мсо); ГД — головной дозор (мсв);  
 ООД — отряд обеспечения движения (исо); ГрП — группа поддержки (расчет миномета, отделение АГС,  
 расчет ЗУ-23-2); НК — начальник колонны; МО — машина охранения (мсо);  
 БПЗ — боковая походная застава (мсо); ТПЗ — тыльная походная застава (мсо)

Доставка материально-технических средств (МТС) войскам в район ведения боевых действий может осуществляться автомобильными колоннами с боевым охранением (БО) от штатных мотострелковых подразделений, силы и средства которых распределяются по колонне из расчета (рис. 1) не менее одного БТР (БМП) на каждые десять автомобилей [1].

При совершении марша весь личный состав ведет непрерывное круговое наблюдение в указанных секторах (рис. 2) в готовности к спешиванию, занятию огневой позиции и отражению возможного нападения диверсионно-разведывательной группы (ДРГ). Штатные огневые средства БО распределены для ведения огня впереди движущейся колонны, влево, вправо и назад.

Задача дозорного отделения БО заключается в наблюдении за дорогой, прилегающей

местностью с целью предотвращения внезапного нападения ДРГ на колонну, своевременного выявления ее засад, определения их состава, вооружения и возможного характера действий, а также выявления заминированных участков дорог и местности, поиска путей их обхода.

Задача определения вероятностей нахождения БО в состояниях противодействия с ДРГ противника при ее нападении на колонну является актуальной в условиях функционирования системы материально-технического обеспечения (СМТО) войск, участвующих в проведении специальной военной операции (СВО).

Решение этой задачи должно определяться в зависимости от характеристик функционирования системы открытого типа, состоящей из колонны с МТС, ее БО и нападающей ДРГ. Расчет вероятностей состояний рассматриваемой системы имеет и самостоятельное значение.

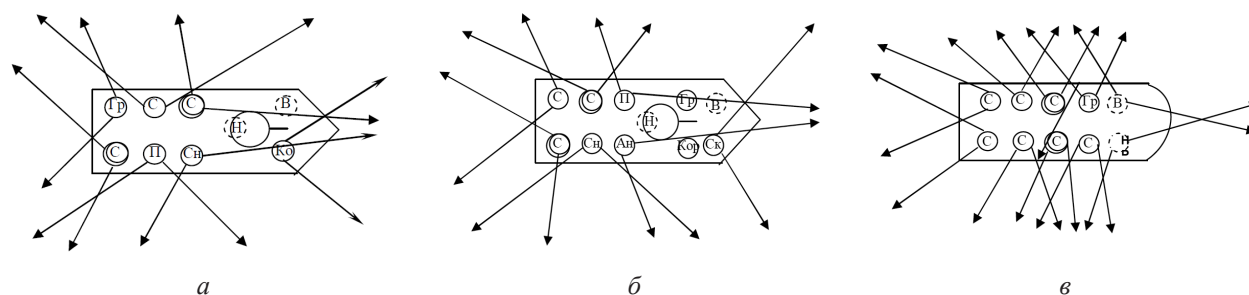


Рис. 2. Схема размещения личного состава и организация наблюдения: а — отделение (на БТР) подразделения охранения; б — на БТР старшего колонны; в — в грузовых автомобилях

Для формирования расчетной схемы и математической модели поставленной задачи будем считать, что функционирование БО по противодействию ДРГ представляет собой случайный процесс и включает следующие состояния:

- ведения стрельбы по ДРГ в течение некоторого случайного периода времени  $t_c$ ;
- нахождения под обстрелом ДРГ противника продолжительностью  $t_o$ ;
- нахождения в подавленном состоянии и восстановления боеспособности в течение времени  $t_b = \tau$ ;
- ожидания выполнения очередной боевой задачи в течение времени  $t_{ож}$ ;
- выдвижения к месту назначения по безопасному участку местности без противодействия противника в течение среднего времени  $t_{дв}$ .

Указанные состояния могут повторяться, образуя цикл функционирования исследуемой системы.

Примем допущение, что стрельба ДРГ по колонне и БО начинается через время  $t$  после ее обнаружения.

В принятых условиях возможны следующие состояния колонны с МТС и ее БО.

I. Колонна с МТС и ее БО обстреливается ДРГ. Это происходит при выполнении следующего условия

$$t_c > t_n + t_p,$$

где  $t_p$  — время разведки противником колонны;

$t_n$  — время подготовки противником мероприятий по противодействию выдвижению колонны.

В принятых обозначениях время обстрела противником колонны с МТС и ее БО составит:

$$t_o = t_c - (t_n + t_p).$$

II. Колонна с МТС и ее БО не находится под обстрелом противника. Это возможно при следующих зависимых условиях:

$$\begin{aligned} t_c &< t_n; \\ t_c &< t_n + t_p. \end{aligned}$$

Полная группа состояний элементов системы, состоящей из колонны с МТС и ее БО, включает:

1. Состояние  $S_1$  — колонна с МТС и ее БО находятся в неразведанном состоянии. Из этого состояния рассматриваемая система может перейти либо в состояние  $S_2$  при  $t_c > t_p$ , либо в состояние  $S_5$  при  $t_c \leq t_p$ ;

2. Состояние  $S_2$  — колонна с МТС и ее БО разведаны противником, идет подготовка мероприятий по воспрепятствованию их дальнейшего перемещения. В это состояние система переходит из состояния  $S_1$ , если  $t_c > t_p$ . Из этого состояния система может перейти либо в состояние  $S_3$  при  $t_c > t_n + t_p$ , либо в состояние  $S_5$  в противном случае, то есть при  $t_c \leq t_n + t_p$ ;

3. Состояние  $S_3$  — нахождение колонны с МТС и ее БО под огнем противника. В это состояние система переходит из состояния  $S_2$  при  $t_c > t_n + t_p$ . Колонна с МТС и ее БО подвергается обстрелу в течение времени

$$t_o = t_c - (t_n + t_p).$$

Если при этом  $t_o > t_k$ , то БО переходит в подавленное состояние  $S_4$ . В противном случае при  $t_o < t_k$  система переходит в состояние  $S_5$ ;

4. Состояние  $S_4$  — колонна с МТС и ее БО подавлены на некоторое время  $t_b = \tau$ , если  $t_o > t_k$ . Из данного состояния через среднее время  $t_b = \tau$  система переходит в состояние  $S_5$ .

5. Состояние  $S_5$  — колонна с МТО и ее БО боеспособны и осуществляют подготовку к выполнению следующей задачи. В это состояние система может перейти из всех перечисленных состояний при указанных в пунктах 1–4 условиях. Из состояния  $S_5$  система может перейти только в состояние  $S_1$ .

Перечисленные состояния БО автоколонны на марше при нападении ДРГ иллюстрирует размеченный граф состояний, приведенный на рис. 3.

Боевое охранение функционирует не изолированно, а внутри рассматриваемой системы, являясь, наряду с другими такими же подразделениями, ее элементом. Взаимодействие элементов в ходе боевых действий между собой и с ДРГ позволяет, выделив из массы подразделений определенным образом одно из них, рассматривать процесс его функционирования как случайный. Поскольку в таких условиях времена обнаружения, подготовки, ведения стрельбы, движения и ожидания являются случайными, то событие на-

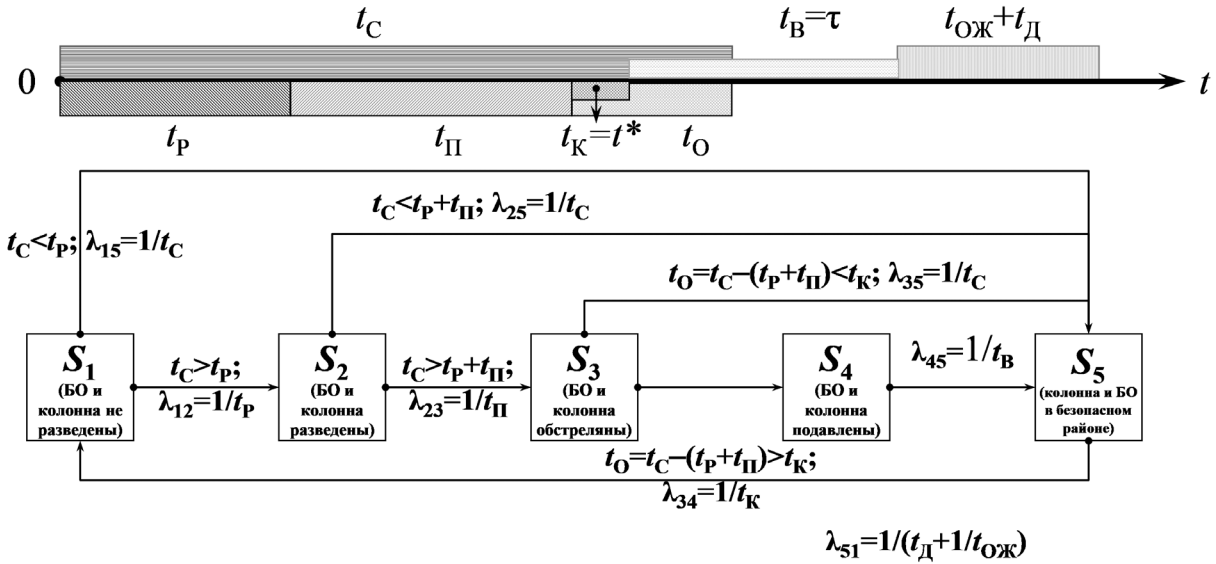


Рис. 3. Граф состояний колонны с МТС на марше и ее БО при нападении ДРГ

хождения БО в каждом из состояний носит вероятностный характер. При этом потоки событий, переводящие БО из одного состояния в другое, могут быть приняты простейшими, то есть законы распределения всех времен цикла функционирования являются показательными [6].

Рассматривая исследуемый процесс как непрерывный марковский, для определения вероятностей указанных состояний могут быть использованы уравнения Колмогорова А.Н. [2, 4] вида

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} &= -(\lambda_{12} + \lambda_{15})P_1 + \lambda_{51}P_5; \\ \frac{dP_2}{dt} &= \lambda_{12}P_1 - (\lambda_{23} + \lambda_{25})P_2; \\ \frac{dP_3}{dt} &= \lambda_{23}P_2 - (\lambda_{34} + \lambda_{35})P_3; \\ \frac{dP_4}{dt} &= \lambda_{34}P_3 - \lambda_{45}P_4; \\ \frac{dP_5}{dt} &= \lambda_{15}P_1 + \lambda_{25}P_2 + \lambda_{35}P_3 + \lambda_{45}P_4 - \lambda_{51}P_5; \\ \sum_{i=1}^5 P_i &= 1, \text{ при } t=1; P_1=1; i=1, 2, 3, 5 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $P_i$  — вероятность нахождения БО в  $i$ -м состоянии;

$\lambda_{ij}$  — плотность вероятности перехода БО из  $i$ -го в  $j$ -е состояние.

В свою очередь, плотность вероятности перехода БО из  $i$ -го в  $j$ -е состояние находится по формуле

$$\lambda_{ij} = \tilde{\lambda}_{ij} p_{ij}, \quad (2)$$

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

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

Учитывая взаимосвязь состояний БО и допущение о показательных законах распределения составляющих времени цикла функционирования системы [3], определим величины  $\tilde{\lambda}_{ij}$  — интенсивности перехода БО из  $i$ -го в  $j$ -е состояние соответственно, а именно:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\lambda}_{12} &= \frac{1}{t_P}; \quad \tilde{\lambda}_{25} = \frac{1}{t_C}; \quad \tilde{\lambda}_{23} = \frac{1}{t_{\Pi}}; \quad \tilde{\lambda}_{35} = \frac{1}{t_O}; \\ \tilde{\lambda}_{34} &= \frac{1}{t_K}; \quad \tilde{\lambda}_{45} = \frac{1}{t_B}; \quad \tilde{\lambda}_{51} = \frac{1}{t_D + t_{OЖ}} \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

В формулах (3) черта над переменными означает математическое ожидание (МОЖ) соответствующих случайных величин (СВ):

$\bar{t}_P$  — МОЖ времени разведки противником колонны с МТС и ее БО;

$\bar{t}_{\Pi}$  — МОЖ времени подготовки противника к мероприятиям воспрещения дальнейшего выдвигения колонны с МТС и ее БО;

$\bar{t}_C$  — МОЖ времени стрельбы БО;

$\bar{t}_O$  — МОЖ времени нахождения колонны с МТС и ее БО под обстрелом ДРГ;

$\bar{t}_K$  — МОЖ времени, после которого колонна с МТС и ее БО становятся не боеготовыми;

$\bar{t}_b = \bar{\tau}$  — МОЖ времени восстановления боеготовности колонны с МТС и ее БО.

Вероятности перехода  $p_{ij}$  вычисляются аналитически. Например, для  $p_{12}$  имеем:

$$p_{12} = P(t_p < t_c) = \int_0^{\infty} f(t_c) F(t_p / t_c) dt_c = \int_0^{\infty} \frac{1}{\bar{t}_c} e^{-\frac{1}{\bar{t}_c} t_c} \left( 1 - e^{-\frac{1}{\bar{t}_p} t_c} \right) dt_c = \frac{\bar{t}_c}{\bar{t}_p + \bar{t}_c}. \quad (4)$$

Учитывая, что  $p_{15} = 1 - P(t_p \geq t_c)$ , находим

$$p_{15} = 1 - P(t_p \geq t_c) = 1 - p_{12} = \frac{\bar{t}_p}{\bar{t}_p + \bar{t}_c}. \quad (5)$$

Аналогичным образом определяем вероятности других переходов:

$$\left. \begin{aligned} p_{23} &= P(t_p + t_n < t_c) = \frac{\bar{t}_c^2}{(\bar{t}_c + \bar{t}_p)(\bar{t}_c + \bar{t}_n)}; \\ p_{25} &= 1 - p_{23} = 1 - \frac{\bar{t}_c^2}{(\bar{t}_c + \bar{t}_p)(\bar{t}_c + \bar{t}_n)}; \\ p_{34} &= P(t_o < t_k) = 1 - \frac{\bar{t}_c^3}{(\bar{t}_c + \bar{t}_p)(\bar{t}_c + \bar{t}_n)(\bar{t}_c + \bar{t}_k)}; \\ p_{35} &= 1 - p_{34} = \frac{\bar{t}_c^3}{(\bar{t}_c + \bar{t}_p)(\bar{t}_c + \bar{t}_n)(\bar{t}_c + \bar{t}_k)}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Подставляя выражения (3), (4), (5) и (6) в зависимость (2), получим уравнения связи для решения системы уравнений (1), представляющую собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ) [5, 6].

Заметим, что из-за однозначности переходов  $3 \rightarrow 4$ ;  $4 \rightarrow 1$  имеем

$$P_{45} = P_{51} = 1. \quad (7)$$

Начальные условия СОДУ (1) при  $t = 0$  имеют вид:  $P_1 = 1, P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = 0$ .

Система уравнений (1) может быть решена численным методом, например, методом Рунге — Кутты 4-го порядка точности в среде Mathcad.

Результаты решения СОДУ (1) приведены на рис. 4.

Анализ полученных результатов показывает, что при противодействии ДРГ вероятности нахождения БО составят:

- вероятность нахождения автоколонны с БО в неразведанном состоянии изменяется от 100 % до 20 %;
- вероятность обстрела автоколонны с БО более 30 %;
- вероятность нахождения БО автоколонны в подавленном состоянии не превышает 10 %;
- вероятность нахождения БО автоколонны в боеспособном состоянии и возможности осу-

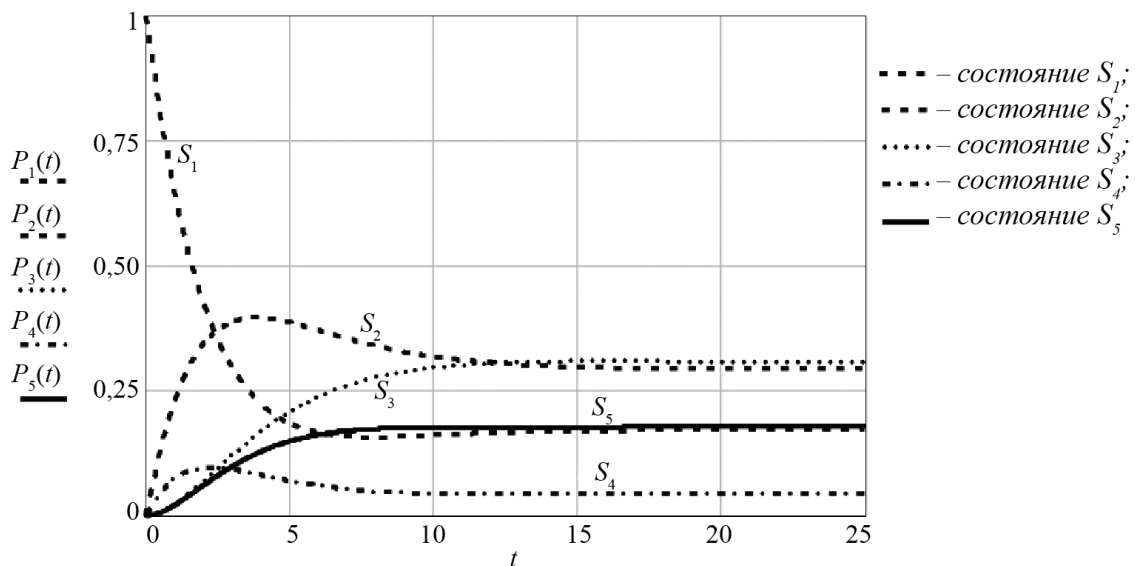


Рис. 4. Результаты решения СОДУ (1) численным методом

существлять подготовку к выполнению следующей огневой задачи составляет только 20 %.

Исходя из этого, можно сделать вывод о возможности обеспечения сохранности автоколонны с МТС и доставки груза войскам в район ведения боевых действий.

Однако необходимо принять превентивные управленческие решения и провести организационно-технические мероприятия, направленные на повышение вероятности нахождения БО в боеспособном состоянии с возможностью осуществлять подготовку к выполнению следующей огневой задачи [7, 8].

Решим СОДУ (1) для стационарного режима ( $P_i = 0, i = 1, 2, \dots, 5$ ). Тогда исходная система уравнений (1) будет иметь вид

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{51}P_5 - (\lambda_{12} + \lambda_{15})P_1 &= 0; \\ \lambda_{12}P_1 - (\lambda_{23} + \lambda_{25})P_2 &= 0; \\ \lambda_{23}P_2 - (\lambda_{24} + \lambda_{35})P_3 &= 0; \\ \lambda_{34}P_3 - \lambda_{45}P_4 &= 0; \\ \lambda_{15}P_1 + \lambda_{25}P_2 + \lambda_{35}P_3 + \lambda_{45}P_4 - \lambda_{51}P_5 &= 0; \\ \sum_{i=1}^5 P_i &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

В результате ее решения получим аналитические зависимости по определению вероятностей нахождения БО автоколонны в условиях противодействия противника в рассматриваемых состояниях, имеющие вид:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \left\{ 1 + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{23} + \lambda_{25}} \left[ 1 + \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{34} + \lambda_{35}} \left( 1 + \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{45}} \right) \right] \right\}^{-1} \cdot \left\{ \frac{\lambda_{12} + \lambda_{01}}{\lambda_{51}} \right\}; \\ P_2 &= \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{12} + \lambda_{25}} P_1; \\ P_3 &= \frac{\lambda_{12}\lambda_{12}}{(\lambda_{23} + \lambda_{25})(\lambda_{34} + \lambda_{35})} P_1; \\ P_4 &= \frac{\lambda_{12}\lambda_{23}\lambda_{34}}{(\lambda_{23} + \lambda_{25})(\lambda_{34} + \lambda_{35})\lambda_{45}} P_1; \\ P_5 &= \frac{\lambda_{12} + \lambda_{15}}{\lambda_{51}} P_1. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Таким образом, разработаны модели определения вероятностей нахождения БО в состояниях противодействия с ДРГ при ее нападении на автоколонну [9, 10].

Получены уравнения связи для решения СОДУ (1), которая может быть решена численным методом Рунге — Кутты 4-го порядка точности при следующих начальных условиях:  $t = 0, P_1 = 1, P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = 0$ .

Для стационарного режима ( $P_i = 0, i = 1, 2, \dots, 5$ ) СОДУ (1) принимает вид (8) и позволяет получить аналитические выражения (9) для расчета вероятностей нахождения БО автоколонны в рассматриваемых состояниях.

Анализ полученных результатов показывает, что для успешного противодействия ДРГ необходимо принять управленческие решения и провести организационно-технические мероприятия, направленные на повышение вероятности нахождения БО в боеспособном состоянии и возможности осуществлять подготовку к выполнению огневых задач. Необходимо обеспечить воздушное прикрытие автоколонны от несанкционированного воздействия беспилотных летательных аппаратов.

#### Список источников

1. Батюшкин С.А. Общая тактика: батальон, рота: учебник. М.: КНОРУС, 2019. 416 с.
2. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Сов. радио, 1972. 192 с.
3. Фендриков Н.М., Яковлев В.И. Методы расчета боевой эффективности вооружения. М.: Воениздат, 1971. 223 с.
4. Курков С.Н., Голованов О.А., Курков Д.С., Плющ А.А. Применение марковских случайных процессов в решении военно-технических задач: монография. Пенза: Изд-во ПГУ, 2018. 400 с.
5. Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1980. 208 с.
6. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Высшая школа, 2000. 383 с.
7. Логвин А.М., Мнацаканов Ю.Н., Паршин Ж.П. Теория вероятностей в применении к артиллерийской инженерной практике. Сборник задач. Ч. II. Пенза: ВАИУ, 1986. 95 с.
8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник. 9-е изд. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 576 с.
9. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения: учебное

пособие. 3-е изд. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 464 с.

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

### References

1. Batyushkin S.A. General tactics: battalion, company: textbook. Moscow: KNORUS, 2019. 416 p.

2. Wentzel E.C. Operations research. M.: «Soviet Radio», 1972. 192 p.

3. Fendrikov N.M., Yakovlev V.I. Methods of calculating the combat effectiveness of weapons. M.: Voenizdat, 1971. 223 p.

4. Kurkov S.N., Golovanov O.A., Kurkov D.S., Plyushch A.A. Application of Markov random processes in solving military-technical problems:

monograph. Penza: Publishing House of PSU, 2018. 400 p.

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

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

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

8. Wentzel E.S. Probability theory. Textbook. 9th ed. Moscow: Publishing center «Academy», 2003. 576 p.

9. Ventzel E.S., Ovcharov L.A. Probability Theory and Its Engineering Applications. Study Guide. 3rd ed. M.: Publishing Center «Academy», 2003. 464 p.

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

УДК 623.76

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_99

## ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗДЕРЖЕК РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ГРУППЫ БПЛА

## OPTIMIZATION OF THE COSTS OF THE UAV GROUP'S INTELLIGENCE ACTIVITIES

*Гусейнов Омар Анар оглы*

*Huseynov Omar Anar ogly*

*Национальное аэрокосмическое агентство (г. Баку, Азербайджанская Республика)*

Беспилотные разведывательные летательные аппараты в отличие от спутниковых средств разведки характеризуются ограниченностью исследуемого поля за некоторый короткий промежуток времени, что может быть скомпенсировано высокой разрешающей способностью и запуском множества БПЛА с разведывательной миссией. Такое множество БПЛА, выполняющих разведывательную миссию, составляют распределенную систему сбора информации, условия и издержки функционирования которых могут сильно отличаться друг от друга. Проанализирована функция издержек для группы БПЛА, коллективно выполняющих разведывательную миссию. Составлена и решена задача поиска оптимальной функциональной зависимости между параметром логистической функции и показателем функции вероятности, при которой дифференциальная функция суммарных издержек группы разведывательных дронов достигает минимума.

**Ключевые слова:** функция издержек, разведывательная миссия, логистическая функция, оптимизация, БПЛА.

Unmanned reconnaissance aircraft, unlike satellite reconnaissance vehicles, are characterized by the limitations of the field under study for a certain short period of time, which can be compensated by high resolution and the launch of many UAVs with a reconnaissance mission. Such a multitude of UAVs performing an intelligence mission constitute a distributed information collection system, the conditions and costs of which can vary greatly from each other. The cost function for a group of UAVs collectively performing a reconnaissance mission is analyzed, the problem of finding the optimal functional relationship between the parameter of the logistic function and the indicator of the probability function at which the differential function of the total costs of a group of reconnaissance drones reaches a minimum is formulated and solved.

**Keywords:** cost function, reconnaissance mission, logistic function, optimization, UAV.

### Введение

Воздушная разведка является важнейшей деятельностью при проведении различных операций с привлечением авиасредств. Такие операции могут иметь военное, гражданское или ис-

следовательское назначение. В настоящее время в этих целях широко используются беспилотные летательные средства (БПЛА) [1–5]. Главное отличие БПЛА от спутниковых средств разведки в плане производительности состоит в ограниченности исследуемого поля за некоторый

короткий промежуток времени  $\Delta t$ , что может быть компенсировано высокой разрешающей способностью на поверхности земли, запуском и использованием множества БПЛА с разведывательной миссией. При этом множество БПЛА, выполняющих разведывательную миссию, составляют распределенную систему сбора информации, условия функционирования которых могут сильно отличаться друг от друга. Согласно [6], если один БПЛА не заметил какое-либо событие, плотность вероятности которого  $P(t)$ , то издержки из-за невыполнения миссии  $ECI$  могут быть вычислены как

$$ECI = \int_{t_1}^{t_2} P(t) \text{cost}(t_2 - t_1) dt, \quad (1)$$

где  $(t_2 - t_1)$  — временной интервал действия этого события;

$P(t)$  — плотность;

$\text{cost}(t_2 - t_1)$  — издержки из-за пропуска этого события.

Вместе с тем всякое опасное событие, которое может быть пропущено соответствующей аппаратурой БПЛА, может иметь случайный характер. Если допустить, что вероятность возникновения такого события равна

$$P = 1 - e^{-at}, \quad (2)$$

то функция плотности вероятности будет иметь вид

$$P(t) = ae^{-at}. \quad (3)$$

Далее, если моделировать функцию  $\text{cost}$ , следуя работам [7–10], логистической функцией, то с учетом (1) и (3) получим выражение, приведенное в работах

$$ECI = \int_{t_1}^{t_2} ae^{-at} m \left( \frac{2}{1 + e^{-k(t_2 - t)}} - 1 \right) dt. \quad (4)$$

Модель (4) содержит три основных параметра:  $a$ ,  $k$  и  $m$ , где  $m$  — максимальное значение издержек события;

$a$  — степень вероятности появления события;

$k$  — параметр, показывающий степень (скорость) издержек события.

В целом модель (4) удовлетворительно описывает издержки из-за невыполнения миссии одним разведывательным БПЛА.

Что касается коллективного (группового) использования БПЛА в количестве  $n$  штук, то с учетом их разнесенного функционирования условия их работы могут серьезным образом отличаться. Это приводит к тому, что показатели  $a$ ,  $m$ ,  $t_2$  оказываются существенно различными. В таких условиях имеет смысл осуществить поиск оптимальных связей показателей  $a$ ,  $m$ ,  $t_2$ , при которых можно было бы достичь минимальной величины  $ECI$ .

## Материалы и методы

В общем случае, рассматривая выражение (4) как определенный интеграл можно применить к нему следующее свойство определенного интеграла:

$$\int_{S_1}^{S_2} f(S) dS = f(S_0)(S_2 - S_1), \quad (5)$$

где  $S_0$  — некоторая точка в интервале  $(S_2 - S_1)$ .

С учетом выражений (4) и (5) получим

$$ECI = ae^{-at_0} m \left( \frac{2}{1 + e^{-k(t_2 - t_0)}} - 1 \right) (t_2 - t_1), \quad (6)$$

где  $t_0$  — некоторая точка в интервале  $(t_2 - t_1)$ .

Далее, приняв  $\Delta t_1 = t_2 - t_1$ , выражение (6) запишем как

$$ECI = ae^{-at_0} m \left( \frac{2}{1 + e^{-k(t_2 - t_0)}} - 1 \right) \Delta t_1. \quad (7)$$

С учетом  $\Delta t_2 = t_2 - t_0$  выражение (7) запишем в компактной форме:

$$ECI = ae^{-at_0} m \left( \frac{2}{1 + e^{-k\Delta t_2}} - 1 \right) \Delta t_1. \quad (8)$$

Допустим, что каждый БПЛА, входящий в группу разведывательных беспилотников, работает на отдельном участке и исходно адаптирован к условиям своего участка, тогда можно рассмотреть два множества параметров  $A$  и  $K$ , определяемые следующим образом [11–15]:

$$K\{k_i\}; i = \overline{1, n}; \quad (9)$$

где  $k_i = k_{i-1} + \Delta k; \Delta k = \text{const}; k_0 = 0; \quad (10)$

$$A = \{a_j\}; j = \overline{1, n}; \quad (11)$$

$$a_j = a_{j-1} + \Delta a; \Delta a = \text{const}; a_0 = 0. \quad (12)$$

С учетом выражения (8) для всей группы БПЛА в количестве  $n$  штук суммарную величину  $ECI$  определим следующим образом:

$$ECI_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n a_i e^{a_i t_0} m \left( \frac{2}{1 + e^{-k_i \Delta t_2}} - 1 \right) \Delta t_1. \quad (13)$$

Для поиска оптимального соотношения между  $k$  и  $a$  имеет смысл использовать не интегральную величину  $ECI$ , определяемую по выражению (4), а дифференциальное представление  $ECI$ , которое применительно к выражению (12) получим путем сближения  $t_2$  к значению  $t_0$ . В этом случае, приняв

$$a \Delta t_2 \ll 1, \quad (14)$$

получим

$$e^{-k \Delta t_2} = 1 - k \Delta t_2. \quad (15)$$

С учетом выражений (12) и (14) запишем

$$ECI_{\Sigma, d} = \sum_{i=1}^n a_i e^{-a_i t_0} m \left( \frac{2}{2 - k_i \Delta t_2} - 1 \right) \Delta t_1. \quad (16)$$

Далее введем в рассмотрение функцию связи

$$k_i = k_i(a_i) \quad (17)$$

и запишем выражение (16) в непрерывной форме:

$$ECI_{in, d} = \int_0^{a \max} a e^{-at_0} m \left( \frac{2}{2 - k(a) \Delta t_2} - 1 \right) \Delta t_1 da. \quad (18)$$

Для поиска и определения оптимальной функции  $k(a)$  есть, следующее интегральное ограничительное условие:

$$\int_0^{a \max} k(a) da = C_1; C_1 = \text{const}. \quad (19)$$

С учетом выражений (18) и (19) составим целевой функционал  $F_0$  безусловной вариационной оптимизации:

$$F_0 = \int_0^{a \max} a e^{-at_0} m \left( \frac{2}{2 - k(a) \Delta t_2} - 1 \right) \Delta t_1 - \lambda \left[ \int_0^{a \max} k(a) da - C_1 \right], \quad (20)$$

где  $\lambda$  — множитель Лагранжа.

Решение задачи (20) согласно [11] удовлетворяет следующему условию:

$$\frac{d \left\{ e^{-at_0} m \left( \frac{2}{2 - k(a) \Delta t_2} - 1 \right) \Delta t_1 - \lambda k(a) \right\}}{dk(a)} = 0. \quad (21)$$

Из условия (21) получим

$$2a e^{-at_0} m \left( \frac{2 \Delta t_2}{[2 - k(a) \Delta t_2]^2} - 1 \right) \Delta t_1 - \lambda = 0. \quad (22)$$

Из выражения (22) находим

$$\left( \frac{2 \Delta t_2}{[2 - k(a) \Delta t_2]^2} - 1 \right) = - \frac{\lambda}{2a e^{-at_0} m \Delta t_1}. \quad (23)$$

Из выражения (23) получим

$$\frac{2 \Delta t_2}{[2 - k(a) \Delta t_2]^2} = 1 + \frac{\lambda}{2a e^{-at_0} m \Delta t_1}. \quad (24)$$

Из выражения (24) находим

$$k(a) = \frac{2 \Delta t_2}{\Delta t_0 \left( 1 + \frac{\lambda}{2a e^{-at_0} m \Delta t_1} \right)} - \frac{2}{\Delta t_0}. \quad (25)$$

При решении выражения (25) функционал (20) достигает минимума, так как производная выражения (22) по искомой функции оказывается всегда положительной величиной. Для вычисления множителя  $\lambda$  можно воспользоваться выражениями (25) и (19). Данное вычисление здесь не приводится.

## Обсуждение

На базе результатов функции издержек из-за невыполнения миссии одним разведывательным БПЛА проанализирована аналогичная функция для группы БПЛА, коллективно выполняющих разведывательную миссию. Отмечается, что условия функционирования членов группы БПЛА могут быть существенно различными. Составлена и решена задача поиска оптимальной функциональной зависимости между  $k$  (параметром логистической функции) и  $a$  (показателем функции вероятности), при которой дифференциальная функция суммарных издержек группы разведывательных дронов достигает минимума.

## Заключение

Разработана методика вычисления суммарной функции издержек при невыполнении миссии со стороны группы разведывательных дронов.

С учетом различных условий функционирования группы дронов на обширной местности, и как следствие различных условий функционирования, определена оптимальная функциональная связь между  $k$  и  $a$ , при которой суммарная функция издержек в дифференциальном вычислении достигает минимума.

## Список источников

1. Nguyen M.T., Nguyen C.V., Truong L.H. et al. Electromagnetic field based WPT technologies for UAVs: a comprehensive survey // *Electronics*. 2020. Vol. 9. No. 3. 461 p.
2. Truong L.H., Quyen T.V., Nguyen C.V., Nguyen M.T. wireless power transfer near-field technologies for unmanned aerial vehicles (UAVs): a review // *EAI Endorsed transactions on industrial networks and intelligent systems*. 2020. Vol. 7. No 22.
3. Nguyen H.T., Nguyen M.T., Do H.T., Hua T., Nguyen C.V. DRL-based intelligent resource allocation for diverse QoS in 5G and toward 6G vehicular networks: a comprehensive survey // *Wireless communications and mobile computing*. Vol. 2021.
4. Xu C., Liao X., Tan J., Ye H., Lu H. Recent research progress of unmanned aerial vehicle regulation on policies and technologies in urban low altitude // *IEEE access*. 2020. Vol. 8. Pp. 74175–74194.
5. Liu J., Li H. Artificial potential function safety and obstacle avoidance guidance for autonomous rendezvous and docking with noncooperative target // *Mathematical problems in engineering*. Vol. 2019.
6. Freed M., Harris R., Shafto M. Comparing methods for UAV-based autonomous surveillance// 2004 National conference on artificial intelligence. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20040068395/downloads/20040068395.pdf>. (дата обращения: 27.06.2024).
7. Freed M., Harris R., Shafto M.G. Human vs autonomous control of UAV surveillance URL: [https://www.researchgate.net/publication/229091495\\_Human\\_vs\\_Autonomous\\_Control\\_of\\_UAV\\_S](https://www.researchgate.net/publication/229091495_Human_vs_Autonomous_Control_of_UAV_S). (дата обращения: 27.06.2024).
8. Engblom J., Solakivi T., Toyli J., Ojala L. Multiple-method analysis of logistics costs // *Int. J. production economics* 137. 2012. Pp. 29–35.
9. Minken H., Johansen B.G. A logistic cost function with explicit transport costs // *Economics of transportation* 19. 2019.
10. Zaidi A., Saleh A., Luhayb M. Two statistical approaches to justify the use of the logistic function in binary logistic regression // *Mathematical problems in engineering*. Vol. 2023.
11. Абдулов Р.Н., Абдуллаев Н.А., Асадов Х.Г. Вопросы оптимизации применения беспилотных летательных аппаратов для поиска и слежения объектов // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2013. № 1 (83). С. 45–49.
12. Мамедов И.Э., Сулейманов Т.И., Исмаилов К.Х., Асадов Х.Г. Развитие метода киберфизической оптимизации функционирования разведывательных беспилотных летательных аппаратов // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. 2018. № 4 (42). С. 77–79.
13. Моисеев В.С. Основы теории эффективного применения беспилотных летательных аппаратов: монография. Казань: Редакционно-издательский центр «Школа», 2015. 444 с. (Серия «Современная прикладная математика и информатика»).
14. Молоденков С.А., Пашкин М.С. Анализ современных беспилотных летательных аппаратов // *Современные научные исследования и инновации*. 2023. № 9 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2023/09/100804> (дата обращения: 01.12.2024).

15. Бугаков И.А., Сорокин А.Д., Хомяков А.В. Показатели эффективности применения группы беспилотных летательных аппаратов при решении задачи воздушной разведки в условиях противодействия противника // Известия Института инженерной физики. 2019 № 1(51). С. 65–68.

## References

1. Nguyen M.T., Nguyen C.V., Truong L.H. et al. Electromagnetic field based WPT technologies for UAVs: a comprehensive survey // Electronics. 2020. Vol. 9. No. 3. P. 461.

2. Truong L.H., Quyen T.V., Nguyen C.V., Nguyen M.T. wireless power transfer near-field technologies for unmanned aerial vehicles (UAVs): a review // EAI Endorsed transactions on industrial networks and intelligent systems. 2020. Vol. 7. No 22.

3. Nguyen H.T., Nguyen M.T., Do H.T., Hua T., Nguyen C. V. DRL-based intelligent resource allocation for diverse QoS in 5G and toward 6G vehicular networks: a comprehensive survey // Wireless communications and mobile computing. Vol. 2021.

4. Xu C., Liao X., Tan J., Ye H., Lu H. Recent research progress of unmanned aerial vehicle regulation policies and technologies in urban low altitude // IEEE access. 2020. Vol. 8. Pp. 74175–74194.

5. Liu J., Li H. Artificial potential function safety and obstacle avoidance guidance for autonomous rendezvous and docking with noncooperative target // Mathematical problems in engineering. Vol. 2019.

6. Freed M., Harris R., Shafto M. Comparing methods for UAV-based autonomous surveillance// 2004 National conference on artificial intelligence. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20040068395/downloads/20040068395.pdf>. (date of reference: 01.12.2024)

7. Freed M., Harris R., Shafto M. G. Human vs autonomous control of UAV surveillance // <https://>

[www.researchgate.net/publication/229091495\\_Human\\_vs\\_Autonomous\\_Control\\_of\\_UAV\\_S](https://www.researchgate.net/publication/229091495_Human_vs_Autonomous_Control_of_UAV_S). (date of reference: 01.12.2024).

8. Engblom J., Solakivi T., Toyli J., Ojala L. Multiple-method analysis of logistics costs // Int. J. production economics 137. 2012. Pp. 29–35.

9. Minken H., Johansen B. G. A logistic cost function with explicit transport costs // Economics of transportation. 19. 2019.

10. Zaidi A., Saleh A., Luhayb M. Two statistical approaches to justify the use of the logistic function in binary logistic regression // Mathematical problems in engineering. Vol. 2023.

11. Abdulov R.N., Abdullaev N.A., Asadov H.G. Issues of optimization of the use of unmanned aerial vehicles for search and tracking of objects // Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2013. № 1(83). Pp. 45–49.

12. Mamedov I.E., Suleymanov T.I., Ismailov K.H., Asadov H.G. Development of the method of cyberphysical optimization of reconnaissance unmanned aerial vehicles // Bulletin of S.A. Lavochkin NPO. 2018. № 4(42). Pp. 77–79.

13. Moiseev V.S. Fundamentals of the theory of effective application of unmanned aerial vehicles: a monograph. Kazan: Editorial and Publishing Center «Shkola», 2015. 444 p. (Series «Modern Applied Mathematics and Informatics»).

14. Molodenkov S.A., Pashkin M.S. Analysis of modern drones // Modern scientific research and innovations. 2023. № 9 [Electronic resource]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2023/09/100804> (date of reference: 01.12.2024).

15. Bugakov I.A., Sorokin A.D., Khomyakov A.V. Efficiency indicators of the use of a group of unmanned aerial vehicles when solving the task of aerial reconnaissance in the conditions of enemy countermeasures // Izvestia Institute of Engineering Physics. 2019. № 1(51). Pp. 65–68.

УДК 614.8; 623

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_104

## ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

## WAYS TO IMPROVE THE ORGANIZATION OF PROTECTION OF OBJECTS OF THE MANAGEMENT SYSTEM

*Д-р техн. наук В.А. Седнев<sup>1</sup>, канд. техн. наук И.А. Лысенко<sup>1</sup>, канд. техн. наук Е.И. Кошечкина<sup>1</sup>,  
А.В. Седнев<sup>2</sup>*

*D.Sc. V.A. Sednev, Ph.D. I.A. Lysenko, Ph.D. E.I. Koshevaya, A.V. Sednev*

<sup>1</sup>*Академия государственной противопожарной службы МЧС России,*

<sup>2</sup>*МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)*

Рассмотрены основные требования к объектам системы управления и основные зоны для их защиты, способы и средства обеспечения защищенности объектов системы управления. Показано, что значительный вклад в обеспечение устойчивости управления вносит применение приемов и средств маскировки, которые направлены на реализацию основных способов противодействия средствам разведки — скрытия и имитации. При этом применение инженерных приемов и средств маскировки не рассматривалось ранее в комплексе с другими мероприятиями для обеспечения защищенности объектов системы управления. В статье рассмотрены предложения по обеспечению устойчивости управления за счет совершенствования и применения средств скрытия объектов системы управления, которые можно использовать при организации их защиты и других важных объектов.

**Ключевые слова:** объект системы управления, защищенность, устойчивость функционирования, скрытие, маскировка.

The basic requirements for the objects of the control system and the main zones for their protection, methods and means of ensuring the security of the objects of the control system are considered. It is shown that a significant contribution to ensuring the stability of management is made by the use of techniques and means of disguise, which are aimed at implementing the main ways to counter intelligence means — concealment and imitation. At the same time, the use of engineering techniques and means of camouflage was not previously considered in conjunction with other measures to ensure the security of control system facilities. The article considers proposals to ensure the sustainability of management by improving and applying means of hiding objects of the management system, which can be used in the organization of their protection and other important objects.

**Keywords:** object of the control system, security, stability of functioning, concealment, masking.

## Введение

Объекты системы управления должны [1–14]:

- обеспечивать размещение должностных лиц;

- обеспечивать устойчивую связь согласно схеме ее организации;

- находиться вне зон химического, биологического заражения, опасного радиоактивного загрязнения, катастрофического затопления и размещаться вне районов повышенного риска возникновения землетрясений, наводнений, сейсмических и т.п.;

- обеспечивать заданный уровень защищенности и др.

Различают следующие зоны для защиты объектов системы управления:

- техническая, где размещаются ее элементы;

- локальная, где размещаются наиболее важные ее элементы;

- основное защитное сооружение.

Защищенность объектов системы управления от действия средств поражения могут обеспечить следующие способы и средства:

- поражение боеприпасов, средств разведки, управления, связи и навигации высокоточного оружия и его носителей;

- маскировка объектов управления и ориентиров вокруг них, которые при воздушно-ракетном нападении могут быть использованы как точки прицеливания при бомбометании и пуске ракет, при этом использование средств маскировки снижает вероятность обнаружения и поражения в 3–4 раза и более;

- радиоэлектронное подавление систем наведения управляемых боеприпасов, систем разведки, навигации и связи носителей высокоточного оружия путем создания радиоэлектронных помех, применением ложных целей, воздействием на среду распространения электромагнитных волн;

- подрыв управляемых боеприпасов разрушителя на безопасном удалении от объекта управления или отвод головных частей ракет и авиабомб;

- создание инженерных заграждений, фортификационное оборудование местности, реализация других инженерных мероприятий.

Противодействие средствам разведки заключается в скрытии информативных элементов

объекта управления и их имитации, а также в легендировании одних типов объектов под другие.

При скрытии обеспечивается создание условий, затрудняющих нарушителю получение данных об объекте управления путем устранения или ослабления демаскирующих признаков, а при имитации разворачиваются ложные объекты, которые искажают обстановку в районе цели.

Целью легендирования является обеспечение возможности принятия одного элемента объекта управления или объекта управления в целом за другой, менее важный, что может вынудить нарушителя выделить для поражения его наряд меньших средств и приведет к уменьшению ущерба, а также введение в заблуждение нарушителя.

Таким образом, обеспечение защищенности объектов системы управления может быть достигнуто противодействием средствам разведки (космической и воздушной), срывом работы системы наведения, их комплексным инженерным оборудованием.

## Содержание основных способов противодействия средствам разведки и обеспечения устойчивости управления

Для противодействия оптическим средствам разведки могут использоваться инженерные приемы и средства маскировки: аэрозольные завесы; искусственные оптические маски; маскировочное окрашивание; макеты и ложные сооружения; маскировочная обработка местности и др.

Применение приемов и средств маскировки направлено на реализацию основных способов противодействия: скрытия и имитации. Наибольший эффект их применения может быть достигнут при всестороннем учете: местности, на которой размещается объект управления; особенностей его размещения; тактико-технических характеристик средств разведки и др.

Снижение качества формируемых изображений объекта управления достигается изменением яркости, контраста, цветовых различий между фоном и объектом управления за счет уменьшения различий между коэффициентом яркости их поверхностей; экранированием элементов и др.

Для затруднения опознавания объекта системы управления могут искажаться его формы,

для чего могут использоваться различные способы распятия местности, придания элементам объекта вида местных предметов и пятен, подобных по своим размерам, форме и цвету элементам фона.

Тепловые средства разведки обеспечивают получение характерного контраста, создаваемого местностью и размещенными на ней объектами. Наряду с контурами объектов просматриваются нагретые места и имеющиеся на них источники интенсивного теплового излучения. При этом распространение, отражение и поглощение коротковолновых тепловых излучений и видимого света подчиняются одним и тем же закономерностям, поскольку имеют одинаковую природу и отличаются лишь длинами волн электромагнитных колебаний. Поэтому способы противодействия тепловым средствам разведки будут такими же, как и для противодействия оптическим средствам разведки.

Противодействие тепловым средствам разведки достигается изменением тепловых контрастов, создаваемых теплоизлучающими элементами, путем экранирования объекта преградами; снижения температуры нагретых поверхностей; применения крупногабаритных масок; изменения формы и контуров объектов.

Для кратковременного снижения теплоизлучения используются теплоизолирующие накидки, для нагрева которых требуется длительное время, а продолжительное их применение приводит к перегреву объекта и нежелательному изменению температурного режима. Радикальным средством уменьшения интенсивности теплового излучения критических элементов объекта управления в верхнюю полусферу является их размещение в укрытиях, закрытых сверху.

Для имитации объектов, не имеющих источников интенсивного излучения или находящихся длительное время с неработающими энергетическими установками или двигателями, можно использовать обычные макеты или каркасные сооружения, которые изготавливают из тех же материалов, из которых изготовлен реальный объект, или применять тепловые имитаторы.

Тепловое излучение не воспринимается глазом человека. Датчики, принимающие это излучение, пассивны, поэтому тепловые системы наведения имеют преимущества перед радиолокационными системами.

Тепловым излучением обладают все нагретые предметы, поэтому использование теплового излучения находит широкое применение в приемниках этого излучения — в головке самонаведения, которая предназначена для коррекции снарядов, ракет на конечном участке траектории для поражения целей, обладающих тепловым контрастом. Снижение теплового излучения возможно уменьшением температуры объектов и элементов местности, например, путем их экранирования и теплоизоляции.

Для создания помех тепловым системам наведения могут использоваться аэрозоли, ослабляющие тепловое излучение и обеспечивающие противодействие им.

Скрытие личного состава, техники и объектов системы управления обеспечивается применением аэрозольных завес, масок из табельных средств маскировки, местных материалов, маскировочного окрашивания, уменьшением видимых размеров объекта за счет его заглупления.

Для обеспечения защищенности объекта системы управления целесообразно применять способ площадной расстановки аэрозольных средств. Объекты системы управления целесообразно защищать с использованием систем дистанционного управления аэрозолепуском, позволяющих управлять рубежами в определенном радиусе и проводить защиту как всего объекта, так и отдельных его элементов очаговым способом. Предполагается, что в распоряжении объекта системы управления могут быть, например, дымовые шашки ШД-Б. На основе исходных данных определяются:

- тип аэрозолеобразующих средств, производительность, время выхода на режим и продолжительность аэрозолеобразования технического средства;
- значения величин маскирующей способности, необходимые при проведении расчетов маскирующей массы;
- удаление первого рубежа расположения дымовых шашек от объекта;
- параметры аэрозольной завесы от точечного источника с целью сгруппировать линейную аэрозольную завесу;
- непросматриваемая длина зоны вероятного скрытия аэрозольной завесы и ее максимальная ширина;

– исходя из заданного критерия эффективности: интегральная концентрация аэрозоля на линии визирования на расстоянии  $R$ ; величина производительности точечного источника;

– количество: источников на рубеже, основных и дополнительных рубежей и общее количество дымовых шашек на рубежах. Расчет параметров зависит, главным образом, от размеров объекта системы управления и необходимой продолжительности защиты.

Аналогичным образом проводятся расчеты для других объектов, высот расположения источника, вида технических средств постановки аэрозольных завес и степени вертикальной устойчивости атмосферы.

Требования по постановке аэрозольных завес шашками приведены в табл. 1 и установлено, что при определении дистанций между рубежами или интервалов между источниками можно исходить из двух вариантов:

– в первом для заданного критерия эффективности устанавливать аэрозольные средства непосредственно на поверхности земли при защите объекта заданной высоты, с увеличением значения критерия эффективности поднимать источники на требуемую высоту;

– во втором — при выбранном расположении средств на некоторой высоте увеличивать или уменьшать производительность источников.

Если направление ветра к моменту постановки аэрозольных завес:

– перпендикулярно фронту объекта, то приводятся в действие аэрозольные источники на основных рубежах;

– изменяется на  $180^\circ$  — задействуются источники на дополнительных рубежах;

– около  $45^\circ$ , то источники включаются через один на всех рубежах, а также дополнительные аэрозольные средства по диагонали в угловых квадратах.

Такое размещение аэрозольных средств позволяет заранее выбрать схему размещения дымовых шашек и в случае изменения метеоусловий достигать требуемой эффективности защиты регулированием производительности источников и порядка их приведения в действие без изменения схемы размещения.

Рекомендации по размещению аэрозольных средств даны для неблагоприятного случая, когда линия визирования проходит со стороны рубежа по направлению распространения аэрозольных завес, при этом происходит экранирование и наложение отдельных аэрозольных завес на направление линии визирования.

Рекомендации по использованию аэрозольных завес для противодействия оптико-электронным системам высокоточного оружия могут быть использованы при организации защиты объектов системы управления.

В случае налета нарушителей целесообразно применять аэрозольную завесу в начальный момент налета, а постановка ее должна осуществляться в течение первых 30–60 с и обеспечивать выход подразделений охраны на позиции в течение 3–3,5 мин. При этом возможны 3 основных способа постановки с использованием: средств дымопуска (табл. 2), аэрозольных снарядов, искусственных пылевых облаков.

Таблица 1

Требования к постановке площадных аэрозольных завес с использованием шашек ШД-Б

| Высота элемента, м | Параметры постановки аэрозольных завес |                             |                                                                                  |                              |
|--------------------|----------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
|                    | интервалы между источниками, м         | дистанции между рубежами, м | количество средств, приводимых в действие в точечном источнике одновременно, шт. | высота поднятия источника, м |
| 10                 | 46                                     | 756                         | 4                                                                                | $h_{\text{ист}} = 1$         |
|                    | 46                                     | 756                         | 2                                                                                | $h_{\text{ист}} = 10$        |
| 20                 | 25                                     | 188                         | 4                                                                                | $h_{\text{ист}} = 1$         |
|                    | 25                                     | 188                         | 2                                                                                | $h_{\text{ист}} = 10$        |
|                    | 25                                     | 188                         | 2                                                                                | $h_{\text{ист}} = 20$        |
| 30                 | 0                                      | 0                           | –                                                                                | $h_{\text{ист}} = 1$         |
|                    | 25                                     | 343                         | 4                                                                                | $h_{\text{ист}} = 10$        |
|                    | 25                                     | 343                         | 3                                                                                | $h_{\text{ист}} = 30$        |

Таблица 2

*Характеристики рекомендуемых к применению средств дымопуска*

| Средство | Непросматриваемая длина, м | Время работы, мин | Время разгорания, с | Масса, кг |
|----------|----------------------------|-------------------|---------------------|-----------|
| ДМ-11    | 50                         | 5...7             | 30...40             | 2,2...2,4 |
| ДМ-11м   | 70... 100                  | 5                 | 10                  | 2,5       |
| ДМХ-5    | 70                         | 5...7             | 30                  | 2,6...2,7 |
| ДСХ-15   | 70                         | 13...15           | 30                  | 7...7,5   |
| РДГ-П    | 35                         | 1...2             | 3...5               | 0,5       |
| РДГ-2    | 20...25                    | 1...1,5           | 5...10              | 0,5...0,6 |
| РДГ-2ч   | 10...15                    | 1...1,5           | 10...15             | 0,5...0,6 |
| РДГ-2-х  | 25...30                    | 1...1,5           | 5                   | 0,5...0,6 |

Дальность установки дымовых шашек от объекта должна составлять 200–250 м, а средства дымопуска должны устанавливаться заранее на опасных направлениях вероятного действия нарушителя.

Для установки аэрозольных завес целесообразно применять (табл. 2) следующие средства: дымовые шашки (мины) ДМ-11, ДМ-11м, ДМХ-5, а на контрольно-пропускных пунктах — ручные дымовые гранаты РДГ-П, РДГ-2, РДГ-2ч. Так как время действия ручных дымовых гранат 1,25–1,5 мин, то для обеспечения требуемого времени действия аэрозольных завес, после окончания действия первой партии ручных дымовых гранат должна приводиться в действие вторая. При наличии перед объектом системы управления минного поля средства пуска должны устанавливаться в той его части, которая лежит ближе к нарушителю, повышая эффективность его применения.

Учитывая возможный вывод нарушителем из строя заранее установленных средств дымопуска, рекомендуется использовать средства дистанционной установки аэрозольных завес, позволяющие забрасывать аэрозольный снаряд в нужный сектор путем отстрела снарядов и поддерживать время действия завесы с применением установки мортирного типа.

Если отсутствуют рассмотренные средства, можно использовать пылевые завесы на основе порошкообразных материалов (ПОМ): дорожной пыли, цемента, алебастра, мела, сажи, которые распыляются вышибным пороховым зарядом или зарядом взрывчатых веществ, для чего

требуется 200–400 г тротила, 10–20 кг ПОМ и емкости на 15–20 л. Подрыв заряда осуществляется электродетонатором.

Для постановки аэрозольных завес и прикрытия объекта системы управления требуется: один комплект управляемого противопехотного минного поля; тротилевые шашки — 40 шт. по 200 г; электродетонаторы — 40 шт.; емкости для заряда взрывчатого вещества и пылеобразующего вещества (ПОВ) — 40 шт.; саперный провод — 2 км; пакет с 5...7 кг ПОВ — 40 шт.

Для создания пылевого облака на 3–5 мин. целесообразно использование многоствольной установки мортирного типа [13], которая может приводиться в действие при помощи комплекта управляемого противопехотного минного поля, при этом каждые 25–30 с должны воспламеняться огнепроводные шнуры взрывпакетов, которые с пороховым зарядом являются вышибным зарядом для ПОВ весом 1,5...2 кг. Например, для поддержания действия аэрозольных завес в течение 3 мин необходима многоствольная установка мортирного типа, выстреливающая каждые 30 с, рисунок.

При включении установки ПОВ при помощи шнекового механизма подается в аэрозолеобразующую трубу, под действием вентилятора воздух поступает в нее, смешивается с ПОВ, и готовый аэрозоль под напором потока поднимается и образует облако. В качестве ПОВ целесообразно использовать мелкодисперсные порошки (сажа и т.п.).

Установка включается в момент непосредственной угрозы удара с воздуха, при получении соответствующего сигнала, и создает аэрозоль-

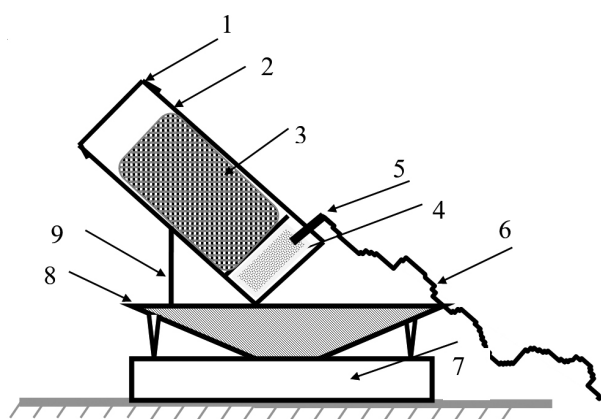


Рис. Установка для отстрела пылеобразующего вещества: 1 — корпус боеприпаса; 2 — крышка; 3 — взрывпакет; 4 — корпус установки; 5 — пакет с пылеобразующим веществом; 6 — огнепроводный шнур длиной 25–30 см; 7 — электровоспламенитель; 8 — установочная платформа; 9 — поворотный механизм

ную завесу по прикрытие объекта на время нанесения удара (от 10 до 15 мин). При этом целесообразно применять по 4 аэрозольных установки с целью прикрытия объекта со всех сторон. Если объекты расположены близко друг от друга, то установки должны прикрывать группу наиболее важных элементов, тогда количество установок может быть больше чем 4, при этом их целесообразно ставить на удалении 80–120 м от элемента, объекта, группы элементов.

Правильное применение установок для постановки пыледипольных завес и обычных средств постановки дымовых завес позволяет добиться требуемого маскирующего эффекта и обеспечить коэффициент прозрачности аэрозольных завес в границах непросматриваемой зоны.

Для скрытия заглубленных и подземных элементов объекта системы управления по земляному покрову можно производить посадку деревьев и кустарника с неглубоким залеганием их корней во избежание порчи гидроизоляции убежищ.

Для скрытия элементов объекта необходимо применять штатные маскировочные комплекты и местные маскировочные материалы. При этом для скрытия открытых элементов можно применять маски из маскировочных комплектов с пенополимерным покрытием, которое наносится пеногенераторами на основе канистр 15Ц43, при этом достигается выраженный маскирующий эф-

фект в инфракрасном диапазоне от средств тепловизионной разведки и тепловизионных систем наведения оружия, а также в видимом диапазоне.

Для маскировки траншей и ходов сообщения под фон местности бруствер можно обкладывать или присыпать местным маскировочным материалом, соответствующим окружающему фону. Ячейки для стрелков можно маскировать устройством перекрытий из сетчатой ткани или хворостяных решеток с вплетением в них подручного материала.

Для скрытия передвижения личного состава охраны по траншеям и ходам сообщения маски необходимо устанавливать на высоте до 1 м из маскировочных комплектов и местных материалов.

Для скрытия техники от обнаружения ее в тепловизионные прицелы необходимо применение теплоизолирующих матов из местных материалов, маскировочных покрытий типа накидок, теплоизолирующих пенополимерных покрытий, применение которых с маскировочными комплектами тканевыми летними обеспечивает маскирующий эффект в ночное и дневное время.

Пенополимерное покрытие толщиной от 10 мм способно снизить разницу температур между поверхностью техники и фоном до 0,3–0,1 °С, что обеспечивает необнаружение целей в тепловизионный прицел и тепловыми головками самонаведения высокоточных боеприпасов.

Вертикальные и наклонные маски из маскировочных комплектов тканевых для прикрытия позиций устанавливаются на высоту до 2 м, обеспечивая скрытие передвижения людей при наблюдении с расстояния более 100–150 м.

Скрытие техники достигается расположением ее под прикрытием растительности, а также применением табельных маскировочных комплектов и местных материалов.

Скрытие заграждений достигается правильным выбором места их расположения; применением искусственных масок; устранением следов установки. Проволочные заграждения целесообразно располагать по межам, по границам контрастных пятен, вдоль дорог, канав, посадок.

## Заключение

Реализация предлагаемых мероприятий позволяет обосновать состав средств тактической маскировки, в частности средств скрытия, для

обеспечения защищенности объектов системы управления и на этой основе обеспечить устойчивость управления.

Разработанные предложения по обеспечению устойчивости управления за счет совершенствования и применения средств скрытия объектов системы управления могут быть использованы при организации защиты объектов системы управления и других важных объектов инфраструктуры.

### Список источников

1. Безопасность России. Безопасность и защищенность критически важных объектов. Ч. 1: Научные основы безопасности и защищенности критически важных для национальной безопасности объектов / Махутов Н.А. [и др.]. М.: МГОФ «Знание», 2012. 896 с.

2. Чуев Ю.В. Исследование операций в военном деле. М.: Воениздат, 1970. 256 с.

3. Седнев В.А., Лысенко И.А. Теоретические основы управления защищенностью и обеспечения устойчивости функционирования объектов системы управления субъектом Российской Федерации: монография. М.: Академия ГПС МЧС России, 2023. 241 с.

4. Седнев В.А., Копнышев С.Л., Седнев Ан.В. Оценка поля скоростей в сплошной упругопластической среде при камуфлетном взрыве // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, 2023. № 2. С. 384–393.

5. Седнев В.А., Копнышев С.Л., Седнев Ан.В. Определение параметров камуфлетного взрыва // Прикладная механика и техническая физика. 2023. Т. 64. № 6 (382). С. 36–43.

6. Седнев В.А., Копнышев С.Л., Сергеевкова Н.А., Седнев Ал.В. Модель управления эффективностью задачи по устройству инженерных заграждений в интересах физической защиты гидротехнического сооружения // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2023. № 5. С. 17–31.

7. Седнев В.А., Копнышев С.Л., Сергеевкова Н.А., Седнев Ал.В. Модели управления эффективностью фортификационного оборудования позиций подразделений охраны и оценки его влияния на защиту гидротехнического сооружения // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2023. № 5. С. 49–63.

8. Седнев В.А., Лысенко И.А., Сергеевкова Н.А., Седнев Ал.В. Методика управления защищенностью и безопасностью объектов системы управления субъекта Российской Федерации // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2024. № 1. С. 27–39.

9. Седнев В.А., Лысенко И.А., Сергеевкова Н.А., Седнев Ал.В. Научно-методические подходы оценки эффективности применения мероприятий инженерного оборудования для управления защищенностью и безопасностью объектов системы управления // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2024. № 1. С. 56–70.

10. Седнев В.А., Копнышев С.Л., Сергеевкова Н.А. Проблемные вопросы обеспечения защищенности и устойчивости функционирования гидротехнических сооружений // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2023. № 2. С. 23–45.

11. Седнев В.А., Копнышев С.Л., Седнев Ан.В. Решение центрально-симметричной задачи о распространении возмущений в горных породах при камуфлетном взрыве // Горный журнал. 2024. № 4. С. 24–29.

12. Седнев В.А., Копнышев С.Л., Седнев Ан.В. Методика выбора рационального состава защитной конструкции критических элементов гидротехнических сооружений // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2024. № 3–4 (189–190). С. 45–54.

13. СП 264.1325800.2016. Свод правил. Световая маскировка населенных пунктов и объектов народного хозяйства / Актуализированная редакция СНиП 2.01.53-84 (утв. Приказом Минстроя России от 03.12.2016 № 880/пр).

14. Устройство для создания пылевых облаков на поворотной платформе: патент 110830 Рос. Федерация № 2011117077/11; заявл. 03.05.2011, опубл. 27.11.2011. Бюл. № 33. 6 с.

### References

1. Makhutov N.A. et al. The security of Russia. Safety and security of critically important facilities. Part 1: Scientific foundations of safety and security of facilities critical to national security. Moscow: Moscow State Educational Institution «Znanie», 2012. 896 p.

2. Chuev Yu.V. Research of operations in military affairs. M.: Voenizdat, 1970. 256 p.
3. Sednev V.A., Lysenko I.A. Theoretical foundations of security management and ensuring the stability of the functioning of objects of the management system of the subject of the Russian Federation. Monograph, Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2023. 241 p.
4. Sednev V.A., Kopnyshev S.L., Sednev An.V. Estimation of the velocity field in a continuous elastoplastic medium during a camouflage explosion // Vestn. Sam. state tech. Univ. Ser. Physical and Mathematical Sciences, 2023. No 2. Pp. 384–393.
5. Sednev V.A., Kopnyshev S.L., Sednev An.V. Determination of parameters of a camouflage explosion // Applied mechanics and technical physics. 2023. Vol. 64. No 6 (382). Pp. 36–43.
6. Sednev V.A., Kopnyshev S.L., Sergeenkova N.A., Sednev Al.V. Efficiency management model of the task of engineering barriers in the interests of physical protection of a hydraulic structure // Security and emergency issues. No 5. 2023. Pp. 17–31.
7. Sednev V.A., Kopnyshev S.L., Sergeenkova N.A., Sednev Al.V. Models for managing the effectiveness of fortification equipment for security units and assessing its impact on the protection of hydraulic structures // Security and emergency issues. No 5. 2023. Pp. 49–63.
8. Sednev V.A., Lysenko I.A., Sergeenkova N.A., Sednev Al.V. Methods of managing the security and safety of objects of the management system of the subject of the Russian Federation // Security and emergency issues. No 1. 2024. Pp. 27–39.
9. Sednev V.A., Lysenko I.A., Sergeenkova N.A., Sednev Al.V. Scientific and methodological approaches to evaluating the effectiveness of the use of engineering equipment measures to manage the security and safety of control system facilities // Security and emergency issues. 2024. No 1. Pp. 56–70.
10. Sednev V.A., Kopnyshev S.L., Sergeenkova N.A. Problematic issues of ensuring the safety and stability of the functioning of hydraulic structures // Security and emergency issues. 2023. No 2. Pp. 23–45.
11. Sednev V.A., Kopnyshev S.L., Sednev An.V. Solution of the centrally symmetric problem of propagation of disturbances in rocks during a camouflage explosion // Mining Journal. 2024. No 4. Pp. 24–29.
12. Sednev V.A., Kopnyshev S.L., Sednev An.V. The method of choosing the rational composition of the protective structure of critical elements of hydraulic structures // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2024. No 3–4 (189–190). Pp. 45–54.
13. SP 264.1325800.2016. A set of rules. Light masking of settlements and objects of the national economy. Updated version of SNiP 2.01.53-84 (approved by the Order of the Ministry of Construction of the Russian Federation dated 03.12.2016 No. 880/pr).
14. A device for creating dust clouds on a rotary platform: Pat. RU, № 2011117077/11, app. 03.05.2011, publ. 27.11.11, Bull. 33. 6 p.

УДК 621.391

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_112

**ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО СПУТНИКОВОГО  
ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ С ОБРАТНЫМ КАНАЛОМ В УСЛОВИЯХ  
ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОМЕХ**

**NOISE IMMUNITY OF A DIGITAL SATELLITE TELEVISION BROADCASTING  
SYSTEM WITH A RETURN CHANNEL UNDER THE INFLUENCE  
OF UNINTENTIONAL NON-STATIONARY INTERFERENCE**

*Канд. техн. наук П.А. Маслаков, канд. воен. наук М.В. Гриднев, Ф.И. Агеев*

*Ph.D. P.A. Maslakov, Ph.D. M.V. Gridnev, F.I. Ageev*

*Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского*

В статье рассматривается модель воздействия нестационарных помех (НСП) на канал спутниковой связи стандарта DVB-RCS. Предложенная модель позволяет исследовать помехоустойчивость канала с разными видами модуляции и помехоустойчивого кодирования. Проведено сравнение результатов воздействия непреднамеренных помех на канал спутниковой связи, возникающих от стационарных и нестационарных источников помех с одинаковой средней мощностью. В качестве показателя помехоустойчивости каналов спутниковой связи используется вероятность битовой ошибки. Показано, что при высоких соотношениях средних мощностей сигнал/помеха нестационарные помехи могут оказывать более негативное влияние на канал связи по сравнению со стационарными, увеличивая вероятность битовой ошибки. Особо опасное воздействие НСП оказывает на передаваемые видео и фото данные, что связано с особенностями сжатия информации.

**Ключевые слова:** нестационарная помеха, помехоустойчивость, DVB-RCS, коэффициент заполнения импульса помехи, MF-TDMA.

The paper considers the model of non-stationary interference (NSE) impact on the DVB-RCS standard satellite communication channel. The proposed model allows to study the noise immunity of the channel with different types of modulation and noise-immune coding. The comparison of the results of the impact of unintentional interference on the satellite communication channel, arising from stationary and non-stationary sources of interference with the same average power is carried out. The bit error probability is used as an indicator of noise immunity of satellite communication channels. It is shown that at high ratios of average signal-to-interference power non-stationary interference can have a more negative impact on the communication channel compared to stationary, increasing the probability of bit error. Particularly dangerous impact NRS has on transmitted video and photo data, which is associated with the peculiarities of data compression.

**Keywords:** non-stationary interference, noise immunity, DVB-RCS, duty cycle of the interference pulse, MF-TDMA.

## Введение

В 2019 году завершился переход России к цифровому телевизионному вещанию (в том числе спутниковому), поскольку оно обладает несомненными преимуществами перед аналоговым: более высокой помехоустойчивостью и качеством воспроизведения, широкими возможностями частотного мультиплексирования. Ввиду огромной территории нашей страны и ограниченности частотного ресурса ретранслятора возникает потребность в его эффективном использовании за счет передачи разнородного трафика. Данная задача является одной из главных в организации спутниковой связи (СПС), что дает возможность применять единую сетевую инфраструктуру и общие стандарты в процедуре сигналообразования, а также уменьшить разнообразие типов оборудования. Одной из передовых технологий, позволяющих организовывать такие мультисервисные сети, в настоящее время стал режим многочастотного множественного доступа с разделением во времени (MF-TDMA — Multi-Frequency Time-Devision Multiple Access) и базирующийся на нем стандарт спутниковой связи DVB-RCS (Digital Video Broadcasting — Return Channel Satellite) [1–4].

Вместе с тем земные станции СПС, в том числе использующие технологию DVB-RCS, зачастую вынуждены функционировать в условиях воздействия непреднамеренных как непрерывных стационарных, так и нестационарных (в том числе импульсных) помех, той же средней мощности. При этом, несмотря на отличия в эффекте воздействия таких помех на приемное устройство, при оценивании их параметров анализатор спектра, имеющий достаточно большие интервалы осреднения накапливаемых сигналов, покажет одинаковый уровень средней мощности помехи. Данное обстоятельство затрудняет оценивание степени влияния нестационарных помех (НСП) на функционирование земных станций СПС и должно быть учтено как в ходе решения задачи обеспечения электромагнитной совместимости, так и в процессе проектирования и поддержания условий их устойчивого функционирования.

Целью статьи является оценивание помехоустойчивости цифрового спутникового вещания с обратным каналом, использующего стандарт DVB-RCS при воздействии нестационарных помех.

## Аналитико-имитационная модель функционирования канала спутниковой связи стандарта DVB-RCS в условиях воздействия нестационарных помех

Топология сети на базе мультисервисной DVB-RCS, как правило, строится по типу «звезда» и предусматривает наличие прямого канала — от Центральной земной станции (ЦЗС) до удаленных спутниковых терминалов, и обратного канала, — от терминала до ЦЗС, использующего стандарт DVB-RCS на основе MF-TDMA (рис. 1). Стандарт DVB-RCS, применяемый на обратной линии, реализует многостанционный доступ с частотным и временным разделением каналов и адаптивное кодирование. Обратный канал MF-TDMA позволяет использовать двумерное кадрирование, в котором каждое частотно-временное окно разделено на несущие, суперкадры, кадры и интервалы. Задача организации вхождения в связь поддерживает соединение в течение всего сеанса связи и осуществляет передачу данных в прямом канале на земную станцию, а также осуществляет разрыв соединения по запросу одного из пользователей.

Состояние частотно-временного ресурса сети может быть описано таблицей частотно-временного плана, представляющей собой формализованную запись закрепления части общего частотно-временного ресурса на заданном интервале за конкретными терминалами. Такая таблица может быть записана матрицей следующего вида [2]:

$$\mathbf{E}_{[L,K]} = \begin{bmatrix} e_{1,1} & \dots & e_{1,K} \\ \dots & \dots & \dots \\ e_{L,1} & \dots & e_{L,K} \end{bmatrix},$$

где  $e_{l,k}$  — условный положительный номер терминала сети связи, занимающего  $k$ -й по времени и  $l$ -й по частоте частотно-временной интервал (ЧВИ),  $l = 1, \dots, L$ ;  $k = 1, \dots, K$ . При этом  $e_{l,k} = 0$  если ЧВИ не используется для передачи.

Одним из вариантов представления частотно-временной структуры сигнала по стандарту DVB-RCS, является частотно-временная матрица, являющаяся совокупностью частотно-временных посылок (ЧВП)  $\gamma_{L,K}$ . При этом каждая ЧВП образована из временных интервалов работы отдельных терминалов связи длительностью  $\Delta t^{\text{ЧВИ}}$  и частотных интервалов шириной  $\Delta f^{\text{ЧВИ}}$ :

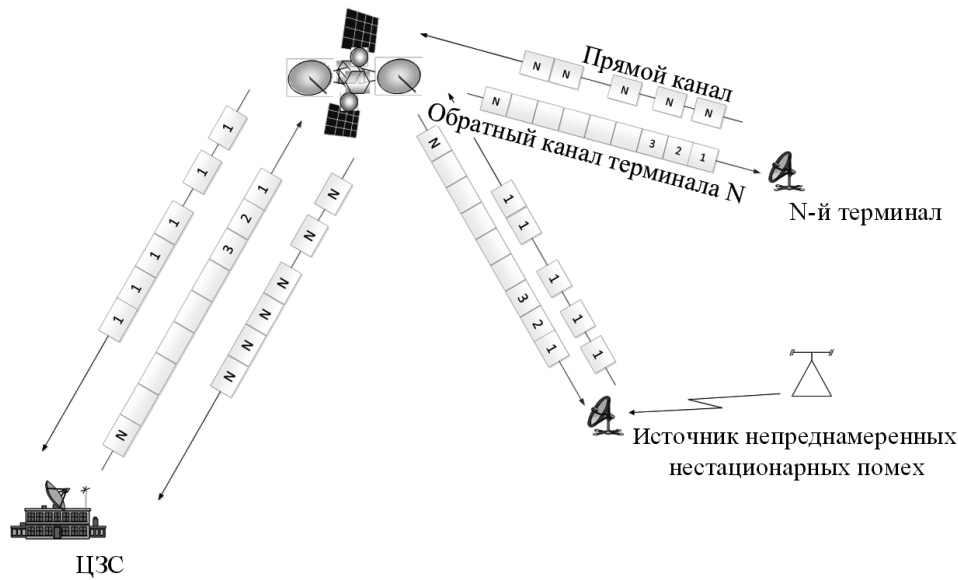


Рис. 1. Схема воздействия источника непреднамеренных нестационарных помех на земную станцию  $CnC$ , использующую технологию MF-TDMA

$$\Gamma_{[L,K]} = \begin{bmatrix} \gamma_{1,1} & \dots & \gamma_{1,K} \\ \dots & \dots & \dots \\ \gamma_{L,1} & \dots & \gamma_{L,K} \end{bmatrix},$$

где  $\gamma_{L,K} = \begin{cases} 0 & |e_{L,K} = 0, \\ 1 & |e_{L,K} > 0. \end{cases}$

Кадр MF-TDMA также представляет собой частотно-временную матрицу  $\Gamma_{[L,K]}$ . В качестве примера рассмотрим схему формирования кадра для четырех различных пользователей с разным уровнем приоритета, представленную на рис. 2. При этом принимается, что  $\Delta T^{(кад)}$  — максимальный интервал времени, через который осуществляется последовательная передача ЧВП от одного терминала,  $\Delta F^{(кад)}$  — полоса из частотных интервалов  $\Delta f^{ЧВП}$ .

Следует подчеркнуть, что для передачи видеоданных в режиме реального времени необходимы информационные скорости не менее 350 кБит/с и постоянное поддержание соединения [2]. Данное требование может быть выполнено за счет закрепления на кадре MF-TDMA определенного количества ЧВИ за терминалом связи, которому необходимо осуществлять передачу такого типа данных (применительно к случаю на рис. 2 — для четвертого пользователя). Известно, что стандарт DVB-RCS предусматривает возможность выбора типа пакетов трафика в обратном канале, поскольку

ку IP-пакеты могут передаваться как в ячейках Asynchronous Transfer Mode (ATM), так и в MPEG-2 пакетах, однако для передачи видеоданных последние предпочтительнее ввиду большей спектральной эффективности. Кроме того, в нем предусмотрена возможность адаптивного кодирования

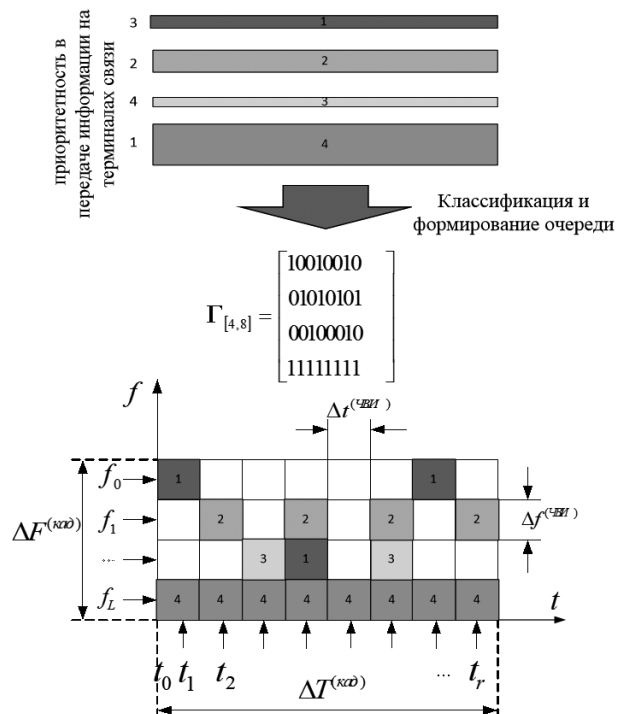


Рис. 2. Схема образования кадра MF-TDMA для пользователей с разным уровнем приоритета

и модуляции, при котором параметры кода и вид модуляции могут меняться от кадра к кадру.

Принципы функционирования и математические выражения для описания всего радиоканала стандарта DVB-RCS детально описаны в технической документации [1]. Однако для решения поставленных задач следует построить модель не всех блоков, а только тех из них, которые определяют помехоустойчивость системы связи: блоков модуляции и помехоустойчивого кодирования.

Особенностью помехоустойчивого кодирования стандарта DVB-RCS является каскадное применение кодов Рида — Соломона и Витерби, что не только повышает корректирующую способность кода, но и обеспечивает более высокую эффективность использования полосы частот спутникового канала при заданных требованиях к вероятности битовой ошибки. А используемые в современных терминалах турбокоды еще более повышают эти характеристики, обеспечивая снижение требований к отношению сигнал/шум более чем на 1 дБ.

Рассмотрим модель нестационарной помехи  $\xi(t)$ , которую можно представить в виде последовательности импульсов шума, определяемых двумя основными параметрами — их длительностью  $\tau_{\text{имп}}$  и паузами  $\Delta t$  между ними (рис. 3) [5–7]:

$$\xi(t) = \begin{cases} \frac{1}{\rho} \chi(t), & m(\tau_{\text{имп}} + \Delta t) \leq t \leq [(m+1)\tau_{\text{имп}} + m\Delta t]; \\ 0, & \text{при } [(m+1)\tau_{\text{имп}} + m\Delta t] \leq t < (m+1)(\tau_{\text{имп}} + \Delta t), \end{cases}$$

где  $m = 0 \dots M$ ;

$\chi(t)$  — шумовой случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратичным отклонением  $\sigma$ ;

$\rho$  — коэффициент заполнения импульса помехи (величина обратная скважности), определяемый в соответствии с выражением:

$$\rho = \frac{\tau_{\text{имп}}}{\tau_{\text{имп}} + \Delta t}.$$

Для случая  $\rho = 1$  нестационарная помеха становится стационарной.

Спектральная плотность мощности нестационарной помехи может определяться в соответствии с выражением:

$$J_0 = \frac{P_{\text{ср}}}{\rho \Delta f},$$

где  $P_{\text{ср}}$  — средняя мощность источника помех;  
 $\Delta f$  — полоса частот, занимаемая помехой.

Различия в воздействии нестационарной и стационарной помехи (СП) на канал связи показаны на временных диаграммах исходной и детектированных информационных последовательностей (рис. 4).

В отличие от обычных стационарных помех, распределенных по всей полосе частот радиоприемного устройства, прерывистая во времени импульсная помеха той же средней мощности, определяемая коэффициентом заполнения  $\rho$  ( $0 < \rho < 1$ ), может оказывать значительно более сильное воздействие на прием сигналов. Данный факт объясняется тем, что ее пиковая мощность  $P_{\text{пик}} = P_{\text{ср.п}} / \rho$  возрастает обратно пропорционально этому коэффициенту, что приводит к увеличению вероятности возникновения ошибки из-за концентрации энергии нестационарной помехи в некоторой временной области сигнала [8].

Для современных систем связи, использующих методы помехоустойчивого кодирования, скремблирования, перемежения и спектрально-эффективные виды модуляции, аналитическое определение наиболее опасных значений коэффициентов заполнения импульсов помехи

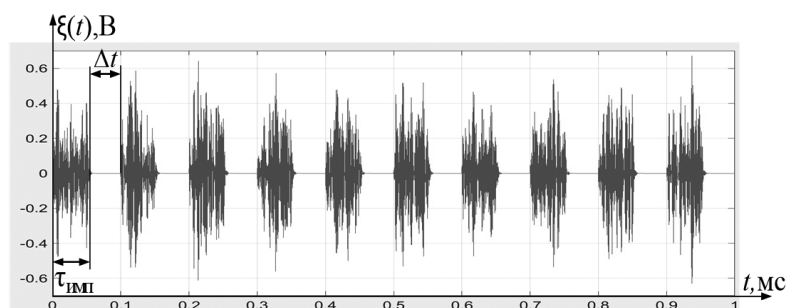


Рис. 3. Пример периодической нестационарной помехи

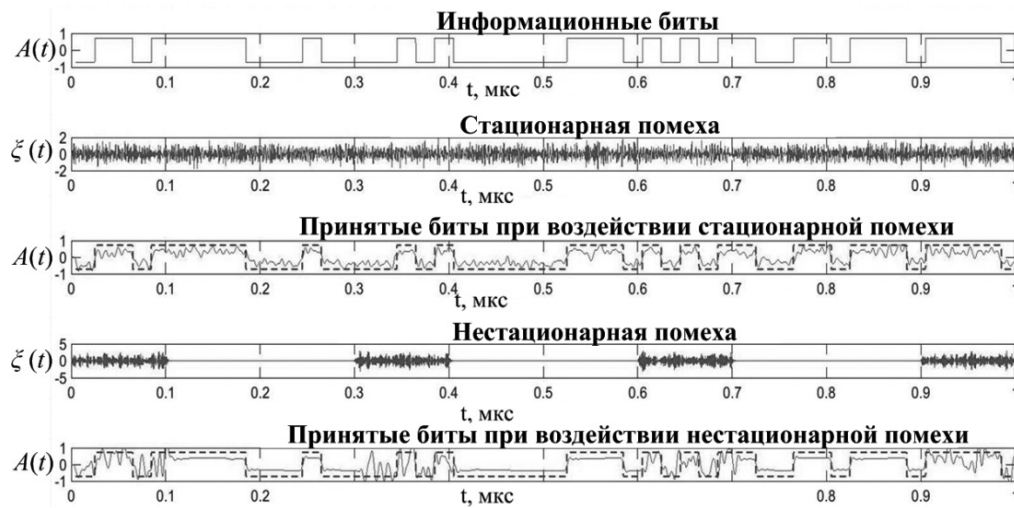


Рис. 4. Временные диаграммы исходной и детектированных информационных последовательностей при воздействии стационарной и нестационарной помех

вызывает ряд сложностей, которые могут быть решены путем имитационного моделирования [8, 9]. На основании математической модели в пакете прикладных программ Matlab была построена имитационная модель функционирования канала СпС DVB-RCS в условиях воздействия НСП, структурная схема которой показана на рис. 5. Модель включает в себя следующие элементы: модель наземной передающей станции, модель наземной приемной станции, модель спутникового ретранслятора и модели источников нестационарных шумовых помех, а также «белого» гауссовского шума.

При этом предполагается, что программно-аппаратная платформа, позволяющая реализовать данный стандарт и выполняющая функции Центральной земной станции, находится на борту спутника-ретранслятора. В качестве исходных

данных при моделировании принято, что используются виды модуляции QPSK, 8-PSK, 16-APSK, а в качестве помехоустойчивого кода — турбокод.

Информационное сообщение  $i$ , проходя через канал сигналообразования, преобразуется в полезный сигнал  $S(i, t)$ . С учетом воздействия гауссовского шума  $n(t)$  и нестационарных помех  $\xi(t)$  на вход приемника поступает аддитивная смесь

$$U(t) = S(i, t) + \xi(t) + n(t).$$

Исходные  $i$  и принятые  $i^*$  информационные биты сравниваются в блоке, вычисляющем вероятность битовой ошибки  $P_{\text{ош}}$ .

Для поиска значений коэффициента  $\rho$ , максимизирующего  $P_{\text{ош}}$ , использовался метод направленного перебора, для чего бралась матрица

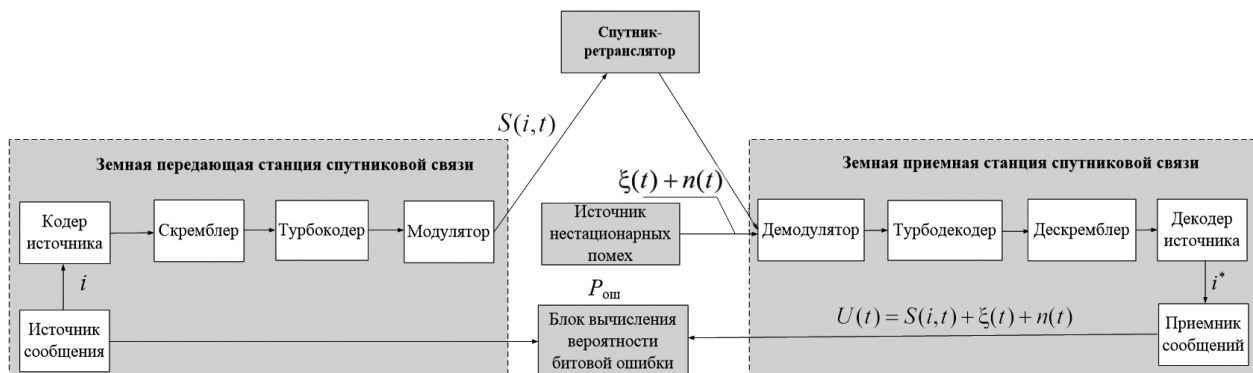


Рис. 5. Структурная схема модели функционирования канала СпС стандарта DVB-RCS в условиях воздействия нестационарных помех

значений  $\tau_{\text{имп}}$  от  $\tau_{\text{имп min}}$  (равной длительности канального бита) до  $\tau_{\text{имп max}}$  (равной длительности кадра) с шагом, равным длительности канального бита. Аналогичным образом составлялась матрица значений  $\Delta t$ .

### Оценивание помехоустойчивости видеоданных, передаваемых по каналу спутниковой связи стандарта DVB-RCS в условиях воздействия нестационарных помех

С помощью разработанной имитационной модели канала СпС проведены исследования помехоустойчивости стандарта DVB-RCS к воздействию СП и получены графические зависимости вероятностей битовой ошибки от отно-

шения сигнал/помеха (рис. 6–7). Кроме того, на данных рисунках приведены те же зависимости в условиях воздействия НСП со значениями коэффициента  $\rho$ , максимизирующими  $P_{\text{ош}}$ .

Анализ данных зависимостей показывает, что при высоком уровне отношений сигнал/помеха НСП оказывают более негативное воздействие на канал, по сравнению с СП. Так, применительно к сигнально-кодовой конструкции с модуляцией QPSK и скоростью помехоустойчивого кодирования 2/3 для отношения сигнал/помеха 6,5 дБ при некотором значении коэффициента  $\rho$ , вероятность битовой ошибки  $P_{\text{ош}}$  возрастает с  $5 \cdot 10^{-6}$  до  $5 \cdot 10^{-4}$ .

Рассмотрим некоторые особенности технологии MPEG-4, важные для оценивания

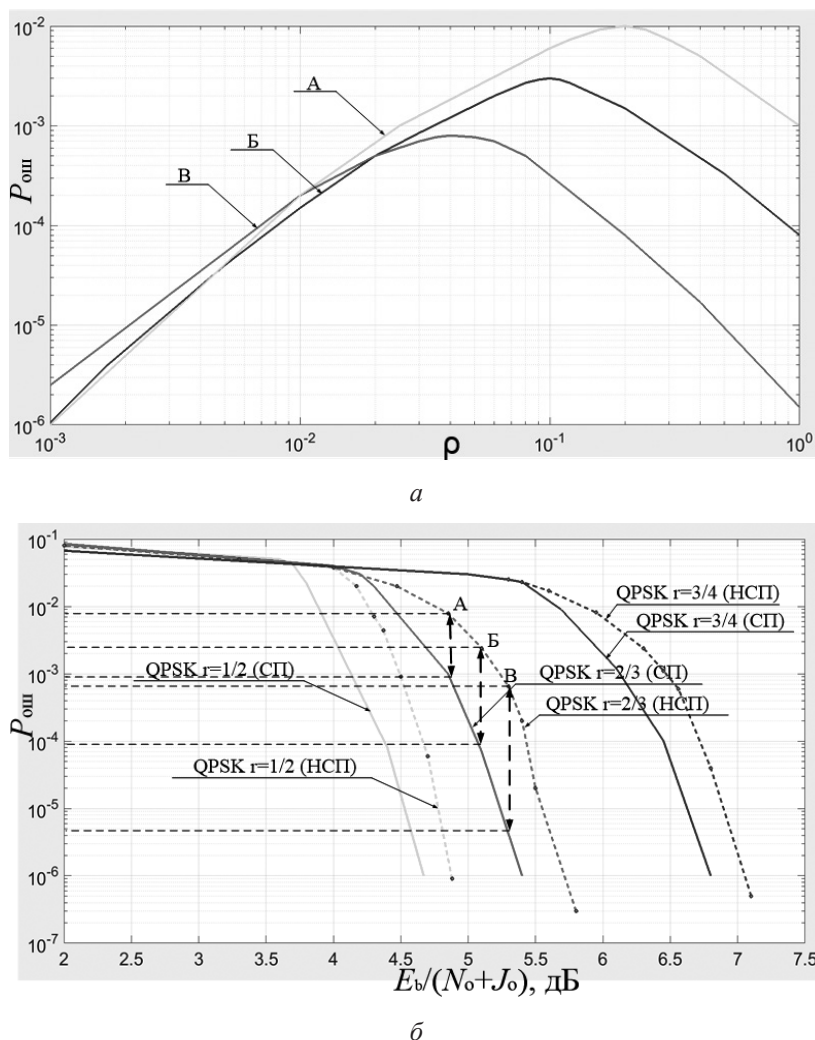


Рис. 6. Поиск значений коэффициента заполнения импульсной помехи  $\rho$ , максимизирующей  $P_{\text{ош}}$  на примере сигнально-кодовой конструкции QPSK 2/3 стандарта DVB-RCS (а) и сравнение помехоустойчивости канала при воздействии СП и НСП (б)

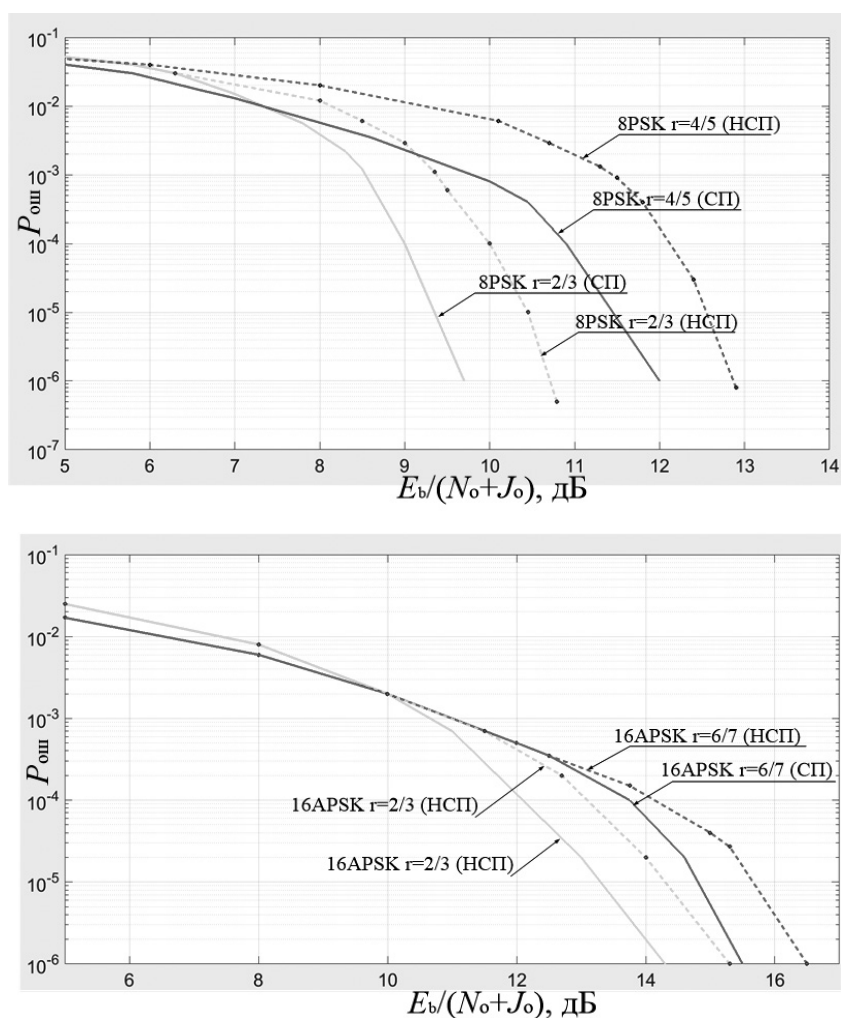


Рис. 7. Помехоустойчивость различных сигнально-кодовых конструкций стандарта DVB-RCS

помехоустойчивости. При передаче видеоданных видеопоток имеет иерархическую структуру вложенных элементов, называющихся Video Object Plane (VOP, далее «кадры»). Существует три типа кадров: intra-coded  $I$ , predictive-coded  $P$  и bidirectionally predictive-coded  $B$ . Последовательность кадров, начинающаяся с  $I$ -кадров, называется Group of VOPs (GoV), при этом  $I$ -кадр содержит информацию только о самом себе. Кодирование  $P$ -кадров осуществляется с использованием опорных  $I$ -кадров благодаря алгоритмам компенсации движения.  $B$ -кадры кодируются с использованием  $P$ -кадров с двунаправленным предсказанием, а для компенсации движения используется не только предыдущий кадр, но и последующий [10]. При трансляции видеопотока в канале передачи данных, вследствие воздействия помех, некоторые пакеты могут быть потеряны и

соответствующие кадры будут повреждены, однако различные типы кадров вносят неодинаковый вклад в качество видеозображения. Более того, различные части одного кадра могут иметь разную ценность для всего изображения (рис. 8).

Например, потеря середины или конца кадра ведет только к искажению изображения, в то время как потеря начальной части кадра ( $I$ -кадр) вместе с начальной последовательностью ведет к потере целого кадра: он фактически не воспроизводится на приемнике, так как не может быть корректно декодирован. Так, на рис. 8 показано, что невозможно декодировать  $B$ - или  $P$ -кадры, которые ссылаются на потерянный кадр (заштрихован) или на тот, который еще не был декодирован. Как видно из рисунка, если потерян  $I$ -кадр (зачеркнут), то все последующие кадры, до очередного  $I$ -кадра не могут быть декодированы.

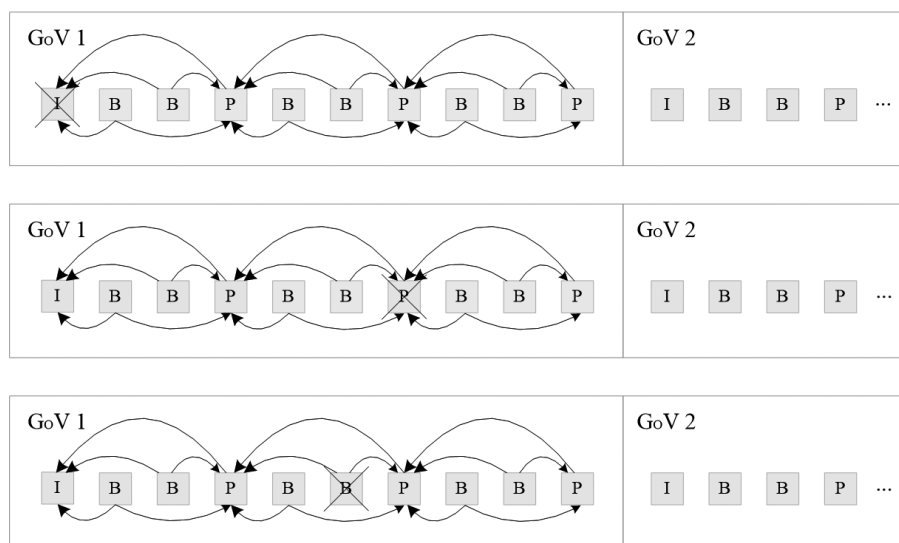


Рис. 8. Влияние различных случаев повреждения трех типов кадров в закодированном потоке на качество декодирования

В ходе имитационного моделирования установлено, что в процессе приема видеоизображений, использующих технологию MPEG-4, при достижении  $P_{\text{ош}} \approx 3,5 \cdot 10^{-4}$  (для фотографий формата JPEG  $P_{\text{ош}} \approx 5 \cdot 10^{-4}$ ) на приемной стороне невозможно идентифицировать передаваемые данные.

### Заключение

Приемные устройства земных станций СпС, использующие стандарт DVB-RCS, могут функционировать в условиях воздействия непреднамеренных нестационарных помех. Помехоустойчивость данного стандарта в случае воздействия аддитивного белого гауссовского шума и нестационарных помех значительно различается. Степень этого различия зависит от выбранного типа помехоустойчивого кодирования и временных параметров помехи.

Высокий уровень непреднамеренных импульсных помех приводит к перегрузке внутреннего декодера Витерби и к размножению ошибок, поэтому даже краткосрочное воздействие таких помех приводит к сбою, связанному с восстановлением нормальной работы декодера.

В статье представлена модель функционирования канала СпС стандарта DVB-RCS в условиях воздействия НСП. Предложенная модель позволяет исследовать помехоустойчивость канала с разными видами модуляции и помехоустойчивого кодирования в реальных условиях воздействия

разных видов НСП. Показано, что при высоких соотношениях средних мощностей сигнал/помеха нестационарные помехи могут оказывать более негативное влияние на канал связи по сравнению со стационарными, увеличивая вероятность битовой ошибки. Особо опасное воздействие НСП оказывают на передаваемые видео и фото данные, что связано с особенностями сжатия информации. Показано, что для MPEG-4 при достижении  $P_{\text{ош}} \approx 3,5 \cdot 10^{-4}$ , а для фото формата JPEG  $P_{\text{ош}} \approx 5 \cdot 10^{-4}$  на приемной стороне невозможно идентифицировать передаваемые данные.

### Список источников

1. ESTI EN 301 790 (v1.4.1): Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for Satellite Distribution Systems.
2. Семенов К.В. Описательная модель спутниковых сетей связи на базе технологии многочастотного множественного доступа с временным разделением // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2010. Вып. 628. С. 98–110.
3. Миноли Д. Инновации в технологиях спутниковой связи. М.: Техносфера, 2019. 446 с.
4. Немировский М.С., Локшин Б.А., Аронов Д.А. Основы построения систем спутниковой связи. М.: Горячая линия–Телеком, 2019. 432 с.
5. Маслаков П.А., Паршуткин А.В. Исследование помехоустойчивости современных стан-

дартов спутниковой связи к воздействию нестационарных помех // Труды СПИИРАН. 2017. № 4 (53). С. 159–177.

6. Паршуткин А.В., Баранов В.М., Маслаков П.А., Сазыкин А.М. и др. Исследование помехоустойчивости канала спутниковой связи стандарта DVB-S2 к воздействию нестационарных помех // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2016. № 9–10. С. 89–95.

7. Красносельский И.Н., Канев С.А. Исследование помехоустойчивости систем цифрового вещания DVB-T модели канала с импульсными помехами // Электросвязь. 2010. № 7. С. 28–30.

8. Склир Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение.: пер. с англ. 2-е изд. испр. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1103 с.

9. Дьяконов В.П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. М.: ДМК Пресс, 2016. 976 с.

10. Ян Ричардсон. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 — стандарты нового поколения. М.: Техносфера, 2005. 368 с.

## References

1. ESTI EN 301 790 (v1.4.1): Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for Satellite Distribution Systems.

2. Semenov K.V. Descriptive model of satellite communication networks based on time division multiple access technology // Proceedings of the

A.F. Mozhaisky Military Space Academy. 2010. Issue. 628. Pp. 98–110.

3. Minoli D. Innovations in satellite communication technologies. M. Tekhnosphere, 2019. 446 p.

4. Nemirovsky M.S., Lokshin B.A., Aronov D.A. Fundamentals of building satellite communication systems. M.: Hotline–Telecom, 2019. 432 p.

5. Maslakov P.A., Parshutkin A.V. Study of the noise immunity of modern satellite communication standards to the effects of non-stationary interference // Proceedings of SPIIRAS. 2017. No 4(53). Pp. 159–177.

6. Parshutkin A.V., Baranov V.M., Maslakov P.A. Sazykin A.M. et al. Study of the noise immunity of a satellite communication channel of the DVB-S2 standard to the effects of non-stationary interference // Questions of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2016. Issue. 9–10. Pp. 89–95.

7. Krasnoselsky I.N., Kanev S.A. Study of the noise immunity of digital broadcasting systems DVB-T channel model with impulse noise Telecommunications. 2010. No 7. Pp. 28–30.

8. Sklyar Bernard. Digital communication. Theoretical foundations and practical application.: trans. from English – 2nd ed. rev. M.: Williams Publishing House, 2003. 1103 p.

9. Dyakonov V.P. MATLAB and SIMULINK for radio engineers. M.: DМК Press, 2016. 976 p.

10. Ian Richardson. Video coding. H.264 and MPEG-4 — new generation standards. M.: Tekhnosphere, 2005. 368 p.

УДК 614.8; 623.093; 355.141-514.1

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11-12\_121

## НЕКОТОРЫЕ АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ОРГАНОВ ТАЗА ИЗ СОСТАВА БОЕВОЙ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЭКИПИРОВКИ

### SOME CURRENT ISSUES OF IMPROVEMENT OF PELVIC PROTECTION MEANS AS PART OF INDIVIDUAL COMBAT EQUIPMENT

*А.С. Пучков, канд. техн. наук А.И. Спивак, канд. техн. наук Р.А. Печеник, А.А. Котова*

*A.S. Puchkov, Ph.D. A.I. Spivak, Ph.D. R.A. Pechenik, A.A. Kotova*

*НПО Спецматериалов*

Проведен анализ структуры огнестрельных ранений у личного состава в современных вооруженных конфликтах. Показано, что часть тела военнослужащего «живот, пах, область таза» является в значительной степени уязвимой для современных поражающих факторов поля боя, что предполагает обязательную и эффективную ее бронезащиту. Проведен анализ основных характеристик противоударных и баллистических отечественных и зарубежных средств защиты органов таза. Показано, что большинство баллистических средств защиты органов таза обеспечивают эффективную защиту от противопехотных осколочных мин на расстоянии 50–60 м. Предложены перспективные пути повышения защитных характеристик средств защиты органов таза с учетом эргономической составляющей.

**Ключевые слова:** средство защиты органов таза, боевая индивидуальная экипировка, противоосколочная стойкость.

The analysis of the structure of gunshot wounds among personnel in modern armed conflicts is conducted. It is shown that the part of the soldier's body «stomach, groin, pelvic area» is significantly vulnerable to modern damaging factors of the battlefield, which suggests mandatory and effective armored protection. The analysis of the main characteristics of shockproof and ballistic domestic and foreign means of protecting the pelvic organs is conducted. It is shown that most ballistic means of protecting the pelvic organs provide effective protection against anti-personnel fragmentation mines at a distance of 50-60 m. Promising ways to improve the protective characteristics of means of protecting the pelvic organs are proposed, taking into account the ergonomic component.

**Keywords:** means of protecting pelvic organs, combat individual equipment, anti-fragmentation resistance.

В современных вооруженных конфликтах, характеризующихся широким применением артиллерийских, авиационных, инженерных боеприпасов, пуль стрелкового оружия, ручных осколочных гранат, самодельных взрывных устройств, снаряженных готовыми поражающи-

ми элементами, одними из тяжелых ранений являются ранения в области малого таза, характеризующиеся высокой летальностью [1].

Статистические данные, характеризующие частоту огнестрельных поражений с областью локализации «живот, пах, область таза» в

некоторых военных кампаниях представлены в табл. 1 [2].

Анализ данных, представленных в табл. 1, показывает, что частота огнестрельных поражений в область «живот, пах, область таза» в различных военных кампаниях XX века составляет: среди раненых — 4...10,9 %, среди убитых — 8,0 ...21,4 %.

Боевые травмы таза подразделяются на огнестрельные ранения (72 %), открытые и закрытые механические (18 %) и взрывные (10 %) травмы [1, 4]. Огнестрельные ранения подразделяются на пулевые (30 %), осколочные (33 %) и минно-взрывные (9 %) ранения. Огнестрельные ранения характеризуются повреждениями мягких тканей (57 %), переломами костей краевыми, трещинами, дырчатыми и осколочными (22 %), повреждениями внутренних органов (внутрибрюшными, внебрюшинными): мочевого пузыря (7 %), уретры (4 %), прямой кишки (10 %), повреждением половых органов. Механические и взрывные травмы характеризуются повреждением мягких тканей, переломами костей стабильными (54 %), ротационно-нестабильными (25 %), вертикально-нестабильными (21 %), повреждением вертлужной впадины (16 %), повреждениями внутренних органов (внутрибрюшными, внебрюшинными): мочевого пузыря, уретры, прямой кишки, повреждением половых органов.

К боевым поражениям наружных половых органов относятся повреждения органов мошонки, которые составляют до 1 % повреждений органов мочеполовой системы, причем в 89,4 % случаев это закрытая травма, из них 50 % характеризуется разрывом яичка, а также повреж-

дениями полового члена, которые составляют 14...18 % от общего количества поражений мочеполовой системы, из них 19,4 % — с повреждением уретры, 7,6 % — с травматической ампутацией полового члена.

Для военнослужащих-женщин одними из самых тяжелых ранений являются ранения в области малого таза [5]. Анатомически в малом тазе находится большое количество органов, которые выполняют ряд важных функций; у женщин это в первую очередь органы репродуктивной системы, повреждения которых могут повлечь за собой серьезные осложнения, связанные с утратой функции деторождения, что приводит к развитию ряда тяжелых, в первую очередь — психологических, состояний. Ранения матки приводят к достаточно большой доле их ампутаций — 17,4 %. Огнестрельные ранения органов малого таза у женщин сопровождаются большой долей послеоперационных осложнений — до 24,4 % и летальных исходов — до 22,1 %.

Таким образом, часть тела военнослужащего «живот, пах, область таза» является в значительной степени уязвимой для современных поражающих факторов поля боя, что предполагает обязательную и эффективную ее бронезащиту. В связи с этими обстоятельствами необходимо защитить эту важную часть тела от различных форм грубого физического воздействия, например ударов ногами, выстрелов из стрелкового оружия и воздействия осколков боеприпасов.

Защита органов таза может быть принципиально реализована за счет следующих приспособлений:

Таблица 1

**Частота огнестрельных поражений с областью локализации «живот, пах, область таза» в некоторых военных кампаниях**

| Вооруженный конфликт, вооруженные силы                 | Среди раненых, % | Среди убитых, % |
|--------------------------------------------------------|------------------|-----------------|
| Русско-японская война (1904–1905), Русская армия       | 4,0              | 13,2            |
| Первая мировая война (1914–1917), Русская армия        | 5,0              | 21,4            |
| Великая Отечественная война (1941–1945), Красная армия | 5,0              | 15,0            |
| Вторая мировая война (1942–1945), армия США            | 6,0              | 18,0            |
| Афганистан (1979–1989), Советская армия                | 10,9             | 11,0            |
| Чечня-I (1994–1996), Вооруженные Силы РФ               | 2,1              | 8,0             |
| Чечня-II (1999–2000), Вооруженные Силы РФ              | 5,8              | 13,2            |

1. Противоударная защита:

– средства защиты паха при занятиях спортом;

– специальные средства защиты личного состава силовых ведомств.

2. Баллистическая защита:

– бомбовые костюмы для саперов;

– боевые защитные комплекты;

– защита паха (фартуки) бронежилета;

– пятиточечники;

– бронешорты, бронетрусы, системы защиты таза.

Противоударные защитные элементы, предназначенные для защиты паха при занятиях спортом, можно условно разделить на три типа.

Первый тип представляет собой вставку-ракушку (раковину) [6], которая не предусматривает собственных креплений, поскольку размещается в специальном кармане компрессионных шорт или штанов. Ракушка, как правило, изготавливается из армированного пластика или металла. Благодаря компактности, защитный элемент почти не ограничивает подвижности ног, что крайне важно как для единоборств, где удары ими разрешены.

Ко второму типу можно отнести компактную защиту паха с собственными креплениями, реализованную, например, в виде защиты паха хоккейной [6]. Основной амортизирующий элемент, прикрывающий паховую зону, размещен на эластичном поясе, дополнен ремнями для лучшей фиксации на бедрах. Это обеспечивает оптимальный баланс между легкостью, удобством, надежностью, что является хорошим решением для тренировок без жесткого контакта.

К третьему типу спортивной противоударной защиты относятся паховые бандажи [7], представляющие собой массивную защиту от ударов нога-

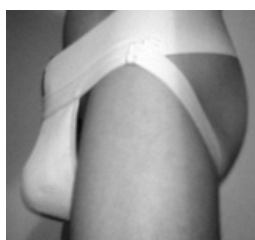
ми и руками. В этом случае для спортсмена достигается максимальный уровень безопасности, поскольку прикрыт не только пах, а также крайне уязвимые для ударов внутренние органы, которыми являются зона мочевого пузыря и почек.

Вид некоторых противоударных спортивных средств защиты паха трех типов представлен на рис. 1.

Анализ данных, представленных на рис. 1, показывает, что противоударные спортивные средства защиты паха имеют различные конструкции. Однако их можно условно классифицировать по энергетическим параметрам. Противоударные средства защиты паха, используемые в игровых видах спорта, обладают защитой на уровне 73...95 Дж, исходя из условий, что масса хоккейной шайбы составляет 0,156...0,170 кг при максимальной скорости шайбы —  $32 \pm 1,4$  м/с [8]. Противоударные средства защиты паха, используемые в контактных видах спорта (например, кикбоксинг), обладают защитой на уровне 171...687 Дж, исходя из условия максимальной скорости удара ногой — 7...14 м/с [9].

Для защиты личного состава силовых подразделений при выполнении функциональных обязанностей при проведении досмотров, патрулировании территорий и объектов в составе групп быстрого реагирования, в процессе выявления и задержания нарушителей, пресечения противоправных действий и массовых беспорядков, когда возможно силовое противодействие со стороны неадекватных и агрессивных экстремистских элементов как на ближней, так и на средней дистанции, широко используются противоударные средства.

Вид некоторых противоударных средств защиты личного состава силовых структур представлен на рис. 2.



Защитная ракушка для тайской борьбы и хоккея (тип 1)



Защита паха хоккейная (тип 2)



Паховый бандаж Нукк (тип 3)

Рис. 1. Вид противоударных спортивных защит паха



Комплект защитных щитков  
[<https://armo99.ru>]



Комплект тактической защиты  
«Антибунт»  
[[pro-spec.ru](http://pro-spec.ru)]



Комплект защитный  
специальный «Партнер»  
[<https://www.akmetrade.ru/>]

Рис. 2. Вид противоударных средств защиты

Характеристики некоторых противоударных средств защиты личного состава силовых структур представлены в [13–15].

Анализ данных, представленных на рис. 2, показывает, что противоударные средства защиты личного состава силовых структур обеспечивают защиту ног, рук и плеч от режущего и холодного оружия, а также от ударных нагрузок палками, металлическими прутами, метаемыми предметами. Такие средства защиты изготавливаются из высокопрочного полимерного материала и усилены в паху металлическими (алюминиевыми) пластинами, соединенными эластичными вставками, что обеспечивает свободу движений. Демпфирующий слой в составе комплектов обеспечивает анатомическое прилегание щитков и эффективную амортизацию ударов. Комплекты выдерживают удары тяжелыми тупыми предметами с энергией до 50 Дж, при этом площадь защиты составляет до 50 дм<sup>2</sup>, а масса комплектов составляет 3...4 кг.

Для обеспечения баллистической защиты паха и органов таза от поражения осколками боеприпасов и пулями стрелкового оружия используются бомбовые костюмы саперов, боевые защитные комплекты, защиты паха (фартуки) бронежилетов, пятиточечники, бронешорты, бронетрусы, системы защиты таза.

Характеристики некоторых бомбовых костюмов представлены в табл. 2 [16].

Анализ данных, представленных в табл. 2, показывает, что защита паха в составе бомбовых костюмов, применяемых саперами при обезвреживании взрывоопасных предметов, обеспечивается использованием пластмассовых раковин, одеваемых под брюки и крепящихся при помощи системы ремней, паховых защитных металличе-

ских пластин. Бомбовые костюмы имеют базовый класс защитной структуры Бр 2/ С2, за счет бронезащитных элементов толщиной от 2 мм до 5,6 мм, дополнительно размещаемых в защитных элементах костюмов, класс защитной структуры может быть увеличен до Бр 5. При этом костюмы, в зависимости от модели, обеспечивают защиту от осколков, имеющих скорость до 1600 м/с и круговую защиту от поражения осколками противопехотной осколочной мины ПОМЗ-2 на расстоянии 2...3 м, противопехотных осколочных мин направленного действия на расстояниях: МОН-50 — 10...15 м, МОН-90 — 15...25 м, противопехотных фугасных мин ПМН, ПМН-2 на расстоянии 1 м, осколков ручных гранат типа РГО, РГН и Ф-1 на расстоянии 5 м. Существенным недостатком бомбовых костюмов является их значительная масса, достигающая 40 кг, ограничивающая возможность их широкого использования в общевойсковом бою.

Для использования в общевойсковом бою и специальных операциях, характеризующихся подвижностью и маневренностью, предназначены боевые защитные комплекты, в состав которых, наряду с бронежилетами и защитными шлемами, входят противоосколочные костюмы, которые обеспечивают всеракурсную защиту до 90 % площади тела человека от осколков, включая защиту паха и органов таза. Характеристики противоосколочных костюмов представлены в табл. 3.

Анализ данных, представленных в табл. 3, показывает, что противоосколочные костюмы в базовой комплектации представляют собой малослойные защитные структуры, характеризующиеся противоосколочной стойкостью  $V_{50\%}$  — 180...230 м/с. Однако за счет размещения в

Таблица 2

Характеристики бомбовых костюмов

| № п/п | Вид защиты                                                                                                                                         | Характеристики                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     |  <p>Защитный костюм EOD Bomb Suit фирмы HighCom Security Inc.</p> | <p>Костюм обеспечивает полную защиту всех частей тела (кроме кистей рук) от осколков, взрывной волны и высокотемпературного воздействия. Костюм состоит из куртки с воротником, брюк, грудной и паховой защитных пластин, шлема с забралом, вентиляционной системы и дополнительных бронеэлементов. Куртка и брюки изготовлены из многослойного материала Kevlar 129 с верхним покрытием из Nomex. Дополнительные бронеэлементы имеют смягчающую подложку. Передняя часть воротника, грудь и пах обладают противоосколочной защитой по <math>V_{50\%}</math> — 600 м/с; ноги, задняя часть воротника, спина и руки — 500 м/с, шлем — 610 м/с, защитное забрало — 700 м/с. К костюму прилагаются два класса дополнительных бронеэлементов: первый класс рассчитан на противоосколочную защиту по <math>V_{50\%}</math> — 1000 м/с, второй — 1600 м/с. Вес костюма без дополнительных бронеэлементов и шлема — 15,3 кг</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 2     |  <p>Защитный костюм IED/EOD</p>                                  | <p>Костюм включает в себя куртку со съёмными рукавами, которая обеспечивает круговую защиту туловища, защиту плеч, шеи и имеет карманы для дополнительной брони, защиту паха, штаны и шлем с забралом. Изготавливается 3 модификации костюма с различной степенью защиты. Костюм 1-го класса: куртка и шлем — противоосколочная стойкость <math>V_{50\%}</math> — 420 м/с; забрало — 256 м/с; Костюм 2-го класса: куртка, шлем и забрало — баллистическая защита класса II (NIJ 0101.03) и противоосколочная стойкость <math>V_{50\%}</math> — 550 м/с. Предусмотрено увеличение защита груди до класса III. Костюм 3-го класса: куртка, шлем и забрало — баллистическая защита класса III-A (NIJ 0101.03) и противоосколочная стойкость <math>V_{50\%}</math> — 600 м/с. Предусмотрено увеличение защиты груди до класса III</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 3     |  <p>Защитный костюм сапера «ГРОТ-3В»</p>                        | <p>Костюм состоит из куртки, брюк, бронежилета, шлема, раковины и дополнительных бронеэлементов. Он обеспечивает практически всеракурсную защиту. Основу конструкции составляет высокопрочная ткань СВМ (отечественный аналог ткани Kevlar). Куртка имеет нашивные карманы для установки в них дополнительных броневых элементов, прикрывающих наиболее важные органы (печень, сердце) и высокий стоячий воротник из броневой ткани. Для защиты паха служит пластмассовая раковина, одеваемая под брюки и крепящаяся при помощи системы ремней. К шлему прикреплено забрало, выполненное из броневого стекла или из поликарбоната. Защита рук обеспечивается при помощи рукавиц, выполненных из броневой ткани. Защитный костюм имеет дифференцированную защиту: руки, ноги, воротник — класс защитной структуры Бр 1; жилет, шлем — класс защитной структуры Бр 2. При размещении в куртке дополнительных бронеэлементов толщиной от 2,14 до 5,6 мм может обеспечиваться защита туловища на уровне класса защитной структуры Бр 5. Костюм обеспечивает круговую защиту от поражения осколками противопехотной осколочной мины ПОМЗ-2 на расстоянии 2 м, противопехотной фугасной мины типа ПМН на расстоянии 1 м, осколков ручных гранат типа РГО, РГН и Ф-1 на расстоянии 5 м</p> |

Таблица 3

Характеристики противоосколочных костюмов

| № п/п | Вид защиты                                                                                                                                    | Характеристики                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     |  <p>Огнестойкий противоосколочный комбинезон «Кобальт-Т»</p> | <p>Имеет вентиляционные окна на груди и спине, санитарный и вентиляционный клапаны в паховой области, съемный капюшон с баллистической вставкой, центральную молнию, воротник со съемным подворотничком и поясной ремень. Рукава в области плеча, локтя и предплечья снабжены накладными карманами с баллистическими экранами. По передней части брюк комбинезона в области бедер, коленей и голени располагаются карманы под баллистические экраны. Обеспечивает защиту от осколков, по классу защитной структуры С2: в области нижней части головы — <math>V_{50\%} \geq 230</math> м/с, <math>S = 6</math> дм<sup>2</sup>; в области рук, ног и шеи — <math>V_{50\%} \geq 330</math> м/с, <math>S = 140</math> дм<sup>2</sup>; в области торса и фронтальной поверхности бедер — <math>V_{50\%} \geq 410</math> м/с, <math>S = 63</math> дм<sup>2</sup>; в области плеч, локтей, предплечья, бедер, колен и голени — <math>V_{50\%} \geq 450</math> м/с, <math>S = 34</math> дм<sup>2</sup>. Масса — 6,5 кг</p> |
| 2     |  <p>Костюм противоосколочный «Штурм-17»</p>                 | <p>Костюм противоосколочный класса защитной структуры С2/Бр 1. Используется строго в комплекте с бронежилетом! Предназначен для защиты суставов рук и ног, паховой области, брюшной полости и шеи. Съемные баллистические пакеты изготовлены из 17 слоев арамидной ткани (плотность 240 г/м<sup>2</sup>). Пакеты расположены в областях: шеи, надплечья, плеча, предплечья, низа живота, поясничного отдела спины, прикрывают переднюю часть бедра и паховую область ног, колени. Противоосколочная стойкость костюма составляет <math>V_{50\%} \geq 515</math> м/с. Общая площадь защиты — 0,8 м<sup>2</sup>. Масса костюма — 4,5 кг</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 3     |  <p>Противоосколочный костюм класса защиты Бр 1</p>        | <p>Костюм состоит из куртки защитной и брюк защитных, изготовленных из ткани Rip-Stop плотностью 220 г/м<sup>2</sup>. Костюм содержит специальные карманы для размещения в них защитных пакетов, состоящих из 18 слоев арамидной ткани с поверхностной плотностью 250 г/м<sup>2</sup>. Куртка обеспечивает защиту: шеи, нижней трети надплечья, плечевого сустава, локтевого сустава, верхней трети предплечья, боковой части туловища; нижней части брюшной полости, поясницы. Брюки обеспечивает защиту: коленного сустава и верхней трети голени; верхней трети передней части бедра, паха</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

защитных элементах костюмов дополнительных съемных баллистических пакетов, состоящих из 18 слоев арамидной ткани с поверхностной плотностью 250 г/м<sup>2</sup> или 17 слоев арамидной ткани с поверхностной плотностью 240 г/м<sup>2</sup> противоосколочная стойкость костюма может быть увеличена до уровня  $V_{50\%}$  — 515 м/с. Масса противоосколочных костюмов составляет 4,5...6,5 кг.

Одним из основных средств индивидуальной бронезащиты являются бронежилеты, кото-

рые, в зависимости от класса защитной структуры, обеспечивают различные уровни противопулевой и противоосколочной защиты торса человека. В составе бронежилета, имеется защитный элемент (защита паха), обеспечивающий защиту низа живота, паха и органов таза, закрепленный в нижней части грудной секции бронежилета. В табл. 4 представлены основные характеристики некоторых защит паха из состава бронежилетов [11].

Анализ данных, представленных в табл. 4, показывает, что классы защитных структур защиты паха бронежилетов, как правило, соответствуют классам защитных структур соответствующих бронежилетов и могут находиться в диапазоне Бр 1/С2 ... Бр 5/С2. При этом классы защитных структур Бр 1/С 2...Бр 2/С2 обеспечиваются конструктивно гибкими защитными элементами различных конструкций. Дальнейшее повышение класса защитных структур защиты паха возможно только за счет размещения в гибких защитных элементах специальных (металлических, керамических) вставок. Класс защитной структуры Бр 1 обеспечивается за счет использования 17 слоев СВМПЭ плотностью 240 г/м<sup>2</sup>, 24 слоев СВМПЭ плотностью 160 г/м<sup>2</sup> или 22...24 слоев арамидного материала Русар плотностью 220 г/м<sup>2</sup>. Класс защитной структуры Бр 2 обеспечивается за счет использования 36...45 слоев СВМПЭ плотностью 160 г/м<sup>2</sup>. Противосколочная стойкость гибких защитных элементов защиты паха достигает  $V_{50\%}$  — 569 м/с.

Конструктивно защита паха бронежилетов может быть выполнена одноэлементной (классической) и многоэлементной (трехлепестковой). Лепестки защиты паха независимые. Лепестковая конструкция защиты паха, в отличие от классической, при ходьбе и беге не мешает и не сковывает движение. Кроме этого, благодаря лепестковой конструкции защита паха при смене положения тела не поднимается бедрами, а при положении сидя и при изготовке для стрельбы стоя центральный и боковые модули продолжают защищать жизненно важные части паховой зоны. Масса защиты паха составляет 0,55...0,8 кг.

Для обеспечения защиты органов таза, брюшной полости, спины, паховой зоны применяются пятиточечники, которые прикрепляются к спинной секции бронежилетов или ремню. Характеристики некоторых пятиточечников представлены в табл. 5 [12].

Анализ данных, представленных в табл. 5, показывает, что для изготовления баллистических пакетов пятиточечников применяются как арамидная ткань, так и сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Так, например, для обеспечения класса защитной структуры Бр 1 используется баллистический пакет, изготовленный из 17 слоев СВМПЭ, для обеспечения

класса защитной структуры Бр 2 — баллистический пакет, изготовленный из 24 слоев арамидной ткани.

При всех преимуществах защит паха и пятиточечников в обеспечении защиты органов таза во фронтальной и дорсальной проекциях, им присущ и большой недостаток — отсутствие переемычки между защитной паха и пятиточечником и, как следствие, отсутствие защиты промежности.

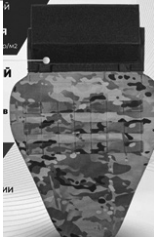
Для обеспечения защиты промежности при минимизации массы защитных элементов, в отличие от бомбовых костюмов и боевых защитных комплектов, характеризующихся значительными массами, были разработаны бронешорты, бронетрусы и защита промежности (вариант бронетрусов-бикини).

Одна из первых защита паха в виде бронетрусов была разработана в США в 1943 году и конструктивно состояла из 10 стальных пластин, шарнирно соединенных друг с другом и образующих анатомическую форму паховой зоны. Бронетрусы обеспечивали защиту на площади 15,2 дм<sup>2</sup>. В связи со значительной массой бронетрусы не обеспечивали достаточной подвижности личного состава сухопутных подразделений и поэтому были использованы для защиты экипажей американских и английских бомбардировщиков, особенно — бортстрелков.

Бронетрусы, изготовленные из неметаллических баллистических материалов, появились у американских военных в период войны во Вьетнаме. Они изготавливались из баллистического нейлона, но имели значительную массу. Такая защита была крайне неудобной для ношения в жарком вьетнамском климате. Американцы презрительно называли их «бронеподгузниками». Разработчики рекомендовали носить бронетрусы вместе с бронежилетом. Впрочем, американские военные часто игнорировали этот предмет белья, тем более что он не защищал от прямого попадания пуль.

С развитием баллистических материалов в армии Великобритании в 2010 году появилась система защиты таза, которая получила название Tier 2 Pelvic Protection Belt Fixing [15]. Система защиты таза, разработанная лабораторией оборонной науки и технологий (DSTL) и министерством обороны Великобритании для британского контингента в Афганистане (ISAF), входит в комплект индивидуальной бронезащиты Osprey MK IV армии Великобритании.

Характеристики защиты паха бронезилетов

| № п/п | Вид защиты                                                                                                     | Характеристики                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | <br>Защита паха Бр 1/C2       | Защита паха защищает мужские органы и брюшную область от пуль и осколков. Противоосколочный пакет состоит из 24 слоев СВМПЭ (поверхностная плотность 160 г/м <sup>2</sup> ), класс защитной структуры Бр 1. Чехол изготовлен из водонепроницаемой ткани CORDURA 1000D. Масса — 0,6 кг                                                                                                                                                                                        |
| 2     | <br>Защита паха Бр 2/C2       | Защита паха защищает мужские органы и брюшную область от пуль и осколков. Противоосколочный пакет состоит из 36 слоев СВМПЭ (поверхностная плотность 160 г/м <sup>2</sup> ), класс защитной структуры Бр 2. Чехол изготовлен из водонепроницаемой ткани CORDURA 1000D. Масса — 0,8 кг                                                                                                                                                                                        |
| 3     | <br>Защита паха C2           | Защита паха защищает мужские органы и брюшную область от пуль и осколков. Противоосколочный пакет состоит из 45 слоев СВМПЭ (поверхностная плотность — 160 г/м <sup>2</sup> ), класс защитной структуры C2                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 4     | <br>Защита паха лепестковая | Лепестковая конструкция защиты паха, в отличие от классической, при ходьбе и беге не мешает под ногами и не сковывает движение. Лепестки защиты паха независимые. Защита паха состоит из трех частей, в которых размещено 22–24 слоя арамидного материала (Русар) плотностью 220 г/м <sup>2</sup> . Класс защитной структуры Бр 1. Предусмотрена на торцевой части система крепления MOLLE. Чехол изготовлен из водоотталкивающей ткани Oxford 600D PU 2000. Масса — 0,55 кг |
| 5     | <br>Защита паха Бр 1        | Защищает брюшную полость и паховую зону от поражения пистолетными пулями и осколками. Баллистический пакет в оболочке из Oxford 240D состоит из 17 слоев СВМПЭ плотностью 240 г/м <sup>2</sup> и изолонa, выполняющего функцию амортизационного подпора, смягчающего удар при попадании пули, осколка. Класс защитной структуры Бр 1. Противоосколочная стойкость защиты паха $V_{50\%}$ составляет 569 м/с. Масса — 0,63 кг                                                 |

Система предназначена для защиты артерий на бедрах, паха, ягодиц, промежности и внутренней поверхности бедра от поражения осколками, имеющих скорость до 230 м/с, особенно образующихся при разрыве самодельных взрывных устройств, большая часть которых летит вверх, в пах и верхнюю часть ног.

Система защиты состоит из трех отделений (переднего, заднего и промежуточного), в которые устанавливаются гибкие защитные элементы. Регулировка объема талии осуществляется с помощью двух боковых быстроразъемных пряжек Fastex. Система защиты таза крепится к поясному ремню с помощью двух пе-

Таблица 5

Характеристики пятиточечников

| № п/п | Вид защиты                                                                                                                    | Характеристики                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     |  <p>Баллистический пятиточечник</p>          | <p>Изготовлен из ткани Cordura 1000D. Высота в разложенном/ сложенном виде — 90/45 см. Баллистический пакет состоит из 17 слоев СВМПЭ плотностью 240 г/м<sup>2</sup>, два слоя изолонa выполняют функцию амортизационного подпора. Класс защитной структуры Бр 1/C2. Противоосколочная стойкость <math>V_{50\%}</math> составляет 569 м/с. Масса — 0,96 кг</p>                                                                                                                   |
| 2     |  <p>Баллистический пятиточечник складной</p> | <p>Применение двойного складного пятиточечника обусловлено, в первую очередь, удобством при работе на местности, особенно зимой. Изготовлен из ткани Cordura 1000D. Класс защитной структуры Бр 2. Баллистический пакет состоит из 24 слоев арамидной ткани типа кевлар с поверхностной плотностью 210...220 г/м<sup>2</sup>. Баллистический пакет располагается только в верхней половине пятиточечника, в нижней половине располагается пенка. Габаритные размеры 38×60 см</p> |

редних петель с текстильной застежкой Velcro и трех задних эластичных шлевок, сквозь которые продевается поясной ремень. Каждая петля имеет промежуточную амортизационную эластичную вставку. Паховая защита может быть убрана в походное положение с помощью специальной скатки сзади. В походном положении система носится сзади, закрепленная на поясной ремень.

Из походного положения в боевое положение система переводится одной рукой без снятия элементов боевой экипировки. Для этого нужно расстегнуть липучку. После этого промежуточное отделение разворачивают и протягивают между ног, а затем фиксируют передними ремнями на поясе спереди и застегивают боковые фастексы. Вид системы защиты паха Tier 2 Pelvic Protection Belt Fixing представлен на рис. 3 [16].

В настоящее время разработаны и другие модели бронешорт, бронетрусов и систем защиты паха. Так, американская государственная организация PEO Soldier (Program Executive Office Soldier) разработала многоуровневую систему индивидуальной паховой защиты Pelvic Protection System [16]. Система защиты Pelvic Protection System состоит из двух уровней: внутренней Tier I (Protective Under-Garment, PUG) и внешней Tier II (Protective Outer-Garment, POG). Первый уровень защиты PUG представляет со-

бой спортивное белье, напоминающие велосипедные шорты, которые выполнены из эластичных потовыводящих материалов с сеткой из кевлара для обеспечения дополнительной защиты от мелких осколков. Второй уровень защиты POG, который крепится поверх брюк, обеспечивает защиту артерий на бедрах, паха, ягодиц, промежности и внутренней поверхности бедра от поражения осколками.

Характеристики некоторых моделей бронешорт, бронетрусов и систем защиты паха представлены в табл. 6, а вид — на рис. 4 [14].

Анализ применения средств защиты органов таза показывает, что зачастую для повышения защищенности органов таза практикуется комплексное использование средств защиты разных типов. Так, например, в состав российского защитного костюма сапера «ПРОТ-3В» входит противоударная раковина. За рубежом руководство армии Великобритании рекомендует использовать для защиты органов таза бойцам, занимающимся поиском самодельных взрывных устройств, трехслойную защиту, а именно: первый слой — бронешорты, надеваемые под штатную униформу, поверх униформы надевается система защиты паха в качестве второго слоя защиты, а сверху системы защиты паха размещается третий слой защиты — ракушка, которая прикрывает половые органы бойца.



Рис. 3. Вид системы защиты паха Tier 2 Pelvic Protection Belt Fixing: а — вид системы защиты паха на военнослужащем; б — вид системы защиты паха в сборе; в — вид системы защиты паха спереди; г — вид системы защиты паха сзади

При рассмотрении вопроса о том, какова же должна быть достаточная противоосколочная стойкость для защитного элемента, прикрывающего внутренние органы в нижней части брюшной полости, предлагается отталкиваться от некоторой боевой ситуации, представляющей стандартной с точки зрения скорости, массы и формы поражающих элементов (ПЭ).

Таковой ситуацией видится применение противником осколочных противопехотных мин направленного поражения. Максимальный эффект от применения данного боеприпаса может дости-

гаться в тех случаях, когда спешенное с техники мотострелковое подразделение в колонну по одному преодолевает проход на заминированном участке местности. Данный тип боеприпасов начинен определенным количеством готовых ПЭ с известной массой и формой. Кроме того, установленные в заводских условиях сборочного производства конкретный тип и выверенная масса заряда ВВ обеспечивают наименьшие отклонения по убойной дальности при подрыве такой мины.

В качестве примера подобного боеприпаса рассмотрим противопехотную осколочную



Рис. 4. Вид бронетрусов, бронешорт и систем защиты паха: а — защита паха Tier 3 Pelvic Protection Великобритании; б — противоосколочные бронешорты-65; в — бронетрусы тактические США; г — бронетрусы морской пехоты США; д — бронетрусы Damacus TG40 IMPERIFL Thigh; е — защита паха Pelvic Protection System США

Таблица 6

Характеристики бронешорт и бронетрусов

| № п/п | Вид защиты                                                                                                    | Характеристики                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | <br>Шорты противоосколочные  | Конструкция разработана с учетом анатомии человека для максимальной защиты бедер, бедренных артерий, зоны паха, ягодиц. Шорты снабжены баллистическими пакетами, состоящими из 20 слоев арамидной ткани, размещенными в чехлах из водонепроницаемого материала. Обеспечивают класс защитной структуры Бр 1 и защиту от картечи массой 1,6 г при скорости 440 м/с с расстояния 5 м. Масса изделия — 3,7 кг                                                                                                                                                                                                                |
| 2     | <br>Шорты тактические ШТ     | Тактические шорты предназначены для дополнительной осколочной защиты в составе бронежилета или костюма сапера, обеспечивающие круговую защиту пахово-бедренной зоны. Состоят из разъемных трусов и двух разъемных набедренных платформ с установленными в них баллистическими экранами, обеспечивающие защиту по классу защитной структуры С2 ( $V_{50\%}$ не менее 540 м/с). Трусы массой 0,94 кг обеспечивают площадь защиты 17 дм <sup>2</sup> , две набедренные платформы массой 1,56 кг обеспечивают площадь защиты 37 дм <sup>2</sup> . Шорты в сборе массой 2,5 кг обеспечивают площадь защиты 54 дм <sup>2</sup> |
| 3     | <br>Бронетрусы тактические | Бронетрусы изготовлены из арамидной ткани. Состоят из трех частей: защита перед, защита зада (в каждой от 12 до 15 слоев арамидной ткани) и защита промежности (24 слоя арамидной ткани)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

мину направленного поражения М18А1 американского производства [17]. В качестве готовых ПЭ в этой мине применяются шарики или ролики массой 1,0–1,5 г, имеющие начальную скоростью 1200 м/с. В результате обработки экспериментальных данных [18] получена статистическая модель зависимости скорости готовых ПЭ, образовавшихся при подрыве противопехотной мины, от расстояния до точки подрыва с использованием метода наименьших квадратов. Было рассмотрено несколько видов функций  $y = f(x, a, b, \dots)$  и выбрана функция, для которой суммарная погрешность

$$\sum_{i=1}^n [f(x_i, a, b, \dots) - y_i]^2$$

оказалась минимальной.

Вид статистической модели зависимости скорости готовых ПЭ, образовавшихся при подрыве противопехотной мины от расстояния до точки подрыва, представлен в табл. 7.

Анализ полученной статистической модели показывает, что элементы защиты таза, не являющиеся элементами специализированных бомбовых костюмов саперов, обеспечивают противоосколочную стойкость защиты органов таза на удалении 49...62 м от места подрыва. Специальные бомбовые костюмы, защитные структуры которых содержат металлические или композитные элементы, обеспечивают защиту органов таза на удалении 10...15 м от места подрыва противопехотной мины направленного действия с готовыми ПЭ [10], имеющими скорость на уровне 1022...1086 м/с.

В целях прогнозирования возможной конструкции защитной структуры органов таза с использованием в качестве дополнительных элементов стальных бронепанелей, размещаемых в специальных карманах в элементах из арамидной ткани и СВМПЭ, была проведена специальная серия экспериментов. В ходе экспериментов был произведен обстрел защитных структур толщиной от 2,5 мм до 6,5 мм, изготовленных из стали СПС-43, имитаторами осколков — стальными шариками массой 1,05 г по ГОСТ 3722 [18], после чего были определены показатели их противоосколочной стойкости  $V_{50\%}$ .

В результате обработки экспериментальных данных с использованием метода наименьших квадратов была получена статистическая модель зависимости показателя противоосколочной стойкости  $V_{50\%}$  защитной структуры, изготовленной из стали СПС-43, от толщины  $\delta$  защитной структуры, которая имеет вид

$$V_{50\%} = 35,37\delta^2 - 127,92\delta + 420,07.$$

Среднее отклонение статистической модели составляет 52,4 м/с, коэффициент корреляции — 0,992 при области определения аргумента от 2,5 до 6,5 мм.

Анализ статистической модели показывает, что защитная структура, представляющая стальную бронепанель из стали СПС-43 толщиной 6,5 мм, обладает противоосколочной стойкостью  $V_{50\%}$  на уровне 1083 м/с.

В настоящее время для защиты органов малого таза военнослужащих разного пола используются единые универсальные защитные элементы, совершенно не учитывающие выраженные различия в строении женского и мужского таза. В анатомическом отношении женский таз ниже, шире и больше в объеме. Полость малого таза у женщин по очертаниям приближается к

цилиндру, а у мужчин воронкообразно сужается книзу [1, 3].

Поэтому представляется целесообразным проводить оценку суммарной площади для органов малого таза во фронтальной проекции, основываясь на данных акушерской статистики, где не было выявлено патологических отклонений.

К защищаемым в приоритетном порядке органам малого таза относятся: мочевой пузырь, половые органы, прямая кишка и органы репродуктивной системы. Все органы малого таза расположены в полости между костями таза. В дальнейшем будем исходить из предположения, что все перечисленные органы находятся в состоянии, не выходящем за пределы нормы, смещаясь при физических нагрузках: по ширине — в пределах расстояния между наиболее отдаленными точками безымянных линий противоположных сторон (размер поперечного входа в малый таз) — 135 мм, по высоте — в пределах расстояния между серединой верхневнутреннего края лонного сочленения и самой выдающейся точкой мыса (прямой размер) — 110 мм [1, 3, 4].

Таким образом, ориентировочная минимальная площадь фронтального защитного элемента для органов малого таза должна составлять 1,5 дм<sup>2</sup>.

Проведенные исследования показали, что площади защитных элементов системы защиты таза Tier 2 Pelvic Protection Belt Fixing составляют: фронтального — 5,6 дм<sup>2</sup>, заднего — 3,66 дм<sup>2</sup>, промежуточного — 3,28 дм<sup>2</sup>, дополнительных элементов — 1,18 дм<sup>2</sup>. Таким образом, штатная защитная структура системы защиты таза Tier 2 Pelvic Protection Belt Fixing обеспечивает защиту органов таза от поражения осколками, имеющих скорость до 230 м/с на расстоянии более 60 м от места подрыва противопехотных осколочных мин направленного поражения. Повысить защитные характеристики аналогичных систем защиты паха можно за счет размещения

Таблица 7

**Вид статистической модели зависимости скорости готовых ПЭ, образовавшихся при подрыве противопехотной мины от расстояния до точки подрыва**

| Вид статистической модели | Коэффициенты модели |         | Среднее отклонение, % | Среднеквадратическое отклонение | Коэффициент корреляции |
|---------------------------|---------------------|---------|-----------------------|---------------------------------|------------------------|
|                           | $a$                 | $b$     |                       |                                 |                        |
| $Y = a + bx$              | 1212,652            | –12,652 | 1                     | 0,001                           | 0,9999                 |

Примечание: область определения аргумента от 1,0 до 67,0 м

в защитных элементах бронепластин из стали СПС-43 толщиной 6,5 мм. Это позволит обеспечить защиту от ПЭ в непосредственной близости от места подрыва противопехотной мины. Однако при этом масса системы защиты паха увеличится на 7 кг. Учитывая, что подобные системы защиты паха закрепляются на пояском ремне [16], следует признать, что такой способ повышения защитных характеристик подобных системы защиты паха является не перспективным по эргономическим показателям. Особенно вызывает сомнение целесообразность размещения бронепластины в промежуточном защитном элементе, непосредственно контактирующем с внутренними сторонами бедер и промежностью, ограничивая подвижность и маневренность военнослужащего.

Наиболее перспективным способом обеспечения защиты органов таза с удовлетворительными эргономическими показателями является комплексное использование защиты паха штатных бронезилетов в качестве фронтального защитного элемента, пятиточечника в качестве заднего защитного элемента, а также вновь разработанной промежуточной защиты, которая является конструктивным элементом пятиточечника. Промежуточная защита в служебном обращении закрепляется на его внутренней стороне. В боевом положении второе окончание промежуточной защиты фиксируется на защите паха, экранируя при этом промежность и внутренние стороны бедер от воздействия ПЭ, не находясь с ними в непосредственном контакте. Следует отметить, что повышение защитных характеристик защиты паха, пятиточечника и промежуточного элемента за счет размещения в них металлических или керамических бронепластин не приведет к значительному ухудшению эргономических характеристик, поскольку все элементы защиты органов таза закрепляются на бронезилете, который размещается на военнослужащих за счет плечевых элементов бронезилета. При этом, в зависимости от модели бронезилета, площадь защиты паха может составлять 6,6...10,7 дм<sup>2</sup>, площадь защиты пятиточечника — 15...26 дм<sup>2</sup>, что более чем 2,5 раза превышает площадь обеспечения защиты органов таза в сравнении с защитной структурой системы защиты таза Tier 2 Pelvic Protection Belt Fixing, даже без учета площади защиты нового промежуточного элемента.

## Список источников

1. Военно-полевая хирургия: учебник; под ред. Е.К. Гуманенко. 2-е изд. М.: ШЭОТАР-Медиа, 2008. 768 с.
2. Байдак В.И., Блинов О.Ф., Знахурко В.А. и др. Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. Ч. 1. Бронезилеты. М.: Вооружение. Политика. Конверсия, 2003. 338 с.
3. Борисов М.Б., Самохвалов И.М., Денисенко В.В. и др. Боевые травмы таза. Современные принципы хирургического лечения. СПб.: ВМедА, кафедра ВПХ, 2018. 31 с.
4. Протощак В.В., Сиваков А.А., Харитонов Н.Н. и др. Повреждения наружных половых органов: учеб. пособие. СПб.: ВМедА, 2021. 37 с.
5. Масляков В.В., Сидельников С.А., Дадаев А.Я. и др. Анализ результатов лечения ранений малого таза с повреждением органов репродуктивной системы у женщин в условиях локального вооруженного конфликта // Медицина катастроф. 2022. № 4. С. 34–38.
6. Обзор хоккейных ракушек. URL: <https://ice-profy.ru/obzor-hokkejnyh-rakushek/> (дата обращения: 27.07.24).
7. Паховые бандажи. URL: <https://www.lamoda.ru/p/mp002xm19b0w/accs-hukk-zaschita-pakha/> (дата обращения: 27.07.24).
8. Сайт Санкт-Петербургской академии хоккея. URL: <https://ice-profy.ru/ves-hokkejnoj-shajby/> (дата обращения: 27.07.24).
9. Сайт центра спортивной подготовки «Беркут». URL: <https://www.berkut-csp.ru/info/teoriya/sila-udara/> (дата обращения: 27.07.24).
10. Отчет о НИР «Исследование возможности создания специальных защитных комплектов». СПб.: ЗАО «НПО Спецматериалов», 2004. 214 с.
11. Защита паха. URL: [https://www.arsarma.ru/catalog/moduli\\_bronezashchity/zashchita\\_pakha\\_ars\\_ballistika/?ysclid=lyy4gcy831574364880](https://www.arsarma.ru/catalog/moduli_bronezashchity/zashchita_pakha_ars_ballistika/?ysclid=lyy4gcy831574364880) (дата обращения: 27.07.24).
12. Характеристики пятиточечников. URL: <https://global.wildberries.ru/catalog?search=%D0%BF%D1%8F%D1%82%D0%B8%D1%82%D0%BE%D1%87%D0%B5%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%BA> (дата обращения: 27.07.24).
13. Противоударные средства защиты. URL: <https://otvet.mail.ru/question/73011949> (дата обращения: 27.07.24).

14. Пуленепробиваемые мужские трусы. URL: <https://goodsi.ru/pulenebivaemye-muzhskie-trusy/> (дата обращения: 27.07.24).

15. Снаряжение -экипировка.рф. интернет магазин. URL: [https://снаряжениеэкипировка.рф/index.php?route=product/product&path=86\\_116&product\\_id=1710](https://снаряжениеэкипировка.рф/index.php?route=product/product&path=86_116&product_id=1710) (дата обращения: 27.07.24).

16. Где круче десант. URL: <https://ren.tv/news/v-rossii/828991-v-rossii-ili-v-ssha-gde-desant-kruche> (дата обращения: 27.07.24).

17. Комлацкий А.В., Проскуряков Е.В. Расчет основных параметров взрыва осколочных мин направленного поражения. Интерэкспо Гео-Сибирь, 2015. Т. 5. № 3. С. 204–209.

18. Васильев Н.Н., Спивак А.И., Спивак И.А. и др. К вопросу оценки противоосколочной стойкости защитных композиций при высокоскоростном взаимодействии с поражающими элементами / Актуальные проблемы защиты и безопасности // Труды 12 Всероссийской НПК, 2009. Технические средства противодействия терроризму и оружие нелетального действия. Том 1. С. 169–170.

## References

1. Military field surgery: textbook; ed. by E.K. Gumanenko. 2nd edition. Moscow: SHEOTAR-Media, 2008. 768 p.

2. Baidak V.I., Blinov O.F., Znakhurko V.A. et al. Conceptual foundations for the creation of personal protective equipment. P. 1. Bulletproof vests. M.: Armament. Politics. Conversion, 2003. 338 p.

3. Borisov M.B., Samokhvalov I.M., Denisenko V.V. et al. Combat injuries of the pelvis. Modern principles of surgical treatment. St. Petersburg: Military Medical Academy, Department of Military Field Surgery, 2018. 31 p.

4. Protoshchak V.V., Sivakov A.A., Kharitonov N.N. et al. Injuries to the external genitalia. Study guide. St. Petersburg: VMedA, 2021. 37 p.

5. Maslyakov V.V., Sidelnikov S.A., Dadaev A.Ya. et al. Analysis of the results of treatment of pelvic wounds with damage to the reproductive system in women in the context of a local armed conflict // Disaster Medicine. 2022. No 4. Pp. 34–38.

6. Hockey Shells Review. URL: <https://ice-profy.ru/obzor-hokkejnyh-rakushek/> (date of application: 07.27.24).

7. Inguinal bandages. URL: <https://www.lamoda.ru/p/mp002xm19b0w/accs-hukk-zaschita-pakha/> (date of application: 07.27.24).

8. Website of the Saint Petersburg Hockey Academy. URL: <https://ice-profy.ru/ves-hokkejnoj-shajby/> (date of access: 07.27.24).

9. Website of the sports training center «Berkut». URL: <https://www.berkut-csp.ru/info/teoriya/sila-udara/> (date of application: 07.27.24).

10. Report on research and development work «Study of the possibility of creating special protective kits». St. Petersburg: CJSC NPO Spetsmaterialov, 2004. 214 p.

11. Groin protection. URL: [https://www.arsarma.ru/catalog/moduli\\_bronezashchity/zashchita\\_pakha\\_ars\\_ballistika/?ysclid=lyy4gcy831574364880](https://www.arsarma.ru/catalog/moduli_bronezashchity/zashchita_pakha_ars_ballistika/?ysclid=lyy4gcy831574364880) (date of application: 07.27.24).

12. Characteristics of five-pointers. URL: <https://global.wildberries.ru/catalog?search=%D0%BF%D1%8F%D1%82%D0%B8%D1%82%D0%BE%D1%87%D0%B5%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%BA> (date of application: 07.27.24).

13. Shockproof protection devices. URL: <https://otvet.mail.ru/question/73011949> (date of application: 07.27.24).

14. Bulletproof men's underpants. URL: <https://goodsi.ru/pulenebivaemye-muzhskie-trusy/> (date of application: 07.27.24).

15. Snazhenie-ekipirovanie.rf. Online store. [https://equipment.rf/index.php?route=product/product&path=86\\_116&product\\_id=1710](https://equipment.rf/index.php?route=product/product&path=86_116&product_id=1710) (date of application: 07.27.24).

16. Where the cooler troopers are. URL: <https://ren.tv/news/v-rossii/828991-v-rossii-ili-v-ssha-gde-desant-kruche> (date of application: 07.27.24).

17. Komlatsky A.V., Proskuryakov E.V. Calculation of the main parameters of the explosion of fragmentation mines of directional damage. Inter Expo Geo-Siberia, 2015. Vol. 5. No 3. Pp. 204–209.

18. Vasiliev N.N., Spivak A.I., Spivak I.A. et al. On the issue of assessing the anti-fragmentation resistance of protective compositions during high-speed interaction with damaging elements / Actual problems of protection and security // Proceedings of the 12th All-Russian Scientific and Practical Conference, 2009. Technical means of counteracting terrorism and non-lethal weapons. Volume 1. Pp. 169–170.

УДК 62-523.8

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_135

## АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ МНОГОЦЕЛЕВЫХ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН

### ADAPTIVE CONTROL OF DIESEL ENGINE COOLING SYSTEM MULTI- PURPOSE TRACKED VEHICLES

*Ф.Н. Гханем, канд. техн. наук В.Р. Эдигаров*

*F.N. Ghanem, Ph.D. V.R. Edigarov*

*Омский автобронетанковый инженерный институт (филиал) ВА МТО*

В статье представлены результаты исследования электронной адаптивной схемы управления элементами системы охлаждения дизельного двигателя многоцелевых гусеничных машин (МГМ) (водяной насос, вентилятор с электронным термостатом и другими элементами), с целью поддержания оптимальной температуры охлаждающей жидкости, теплового состояния дизеля, снижения расхода топлива дизельного двигателя МГМ и повышения показателей свойств МГМ. Это связано с применением современных электронных схем (Arduino), принимающих сигналы, поступающие от датчиков, измеряющих параметры дизельного двигателя, а также внешние условия, влияющие на его работу, и обработкой этих сигналов и отправкой управляющих сигналов на реализованные устройства, что обеспечивает поддержание идеальной температуры охлаждающей жидкости на значениях, указанных в схеме управления.

**Ключевые слова:** адаптивная электронная схема управления, система охлаждения, дизельный двигатель МГМ, водяной насос, вентилятор, термостат.

The article presents the results of a study of the electronic adaptive control circuit for the elements of the cooling system of the multipurpose tracked vehicles (MTV) diesel engine (water pump, fan with an electronic thermostat and other elements) in order to maintain the optimal coolant temperature, the thermal state of the diesel, reduce the fuel consumption of the MTV diesel engine and increase the properties of the MTV. This is due to the use of modern electronic circuits (Arduino), which receive signals coming from sensors that measure the parameters of the diesel engine, as well as the external conditions that affect its operation, and process these signals and send control signals to the implemented devices, which ensures that the ideal coolant temperature is maintained at the values specified in the control circuit.

**Keywords:** adaptive electronic control circuit, cooling system, diesel engine MTV, water pump, fan, thermostat.

Одним из главных условий, определяющих нормальную работу двигателя внутреннего сгорания (ДВС), является обеспечение его оптимального теплового состояния. Под оптималь-

ным тепловым состоянием понимается такое температурное состояние деталей цилиндровой и поршневой групп, которое отвечает наиболее выгодному сочетанию теплового процесса,

высокой надежности и износоустойчивости деталей двигателя, при этом предполагаются минимальные энергетические затраты на поддержание процесса охлаждения. Высокий уровень показателей современных двигателей был бы недостижим без применения средств электроники. Дизельные двигатели являются одним из наиболее часто используемых типов двигателей в МГМ. Тепловое состояние двигателя, которое чаще всего оценивается по температуре охлаждающей жидкости, существенно влияет на его энергетические и экологические показатели. До недавнего времени система жидкостного охлаждения оставалась одной из немногих систем двигателя МГМ, в которой не использовались возможности электронного управления, позволяющего поддерживать заданное тепловое состояние двигателя на различных режимах его работы.

Дизельные двигатели работают в различных климатических условиях, которые зависят от региона и сезона, а также от разницы температур между днем и ночью. Различные условия эксплуатации дизелей напрямую влияют на их расход топлива, поэтому разработка адаптивной схемы управления элементами системы охлаждения дизельных МГМ с целью поддержания оптимальной температуры охлаждающей жидкости в различных условиях окружающей среды и режимах работы двигателя с целью снижения расхода топлива является актуальной задачей.

Требования к адаптивной схеме управления следующие.

1. Требования к управлению водяным насосом связаны с контролем скорости вращения водяного насоса и управлением расходом охлаждающей жидкости, которое определяется количеством тепла и которое должно быть рассеяно от двигателя охлаждающей жидкостью. При этом минимальная частота вращения должна обеспечивать распределение тепла головки блока цилиндров на все части двигателя на этапе прогрева двигателя, а максимальная частота вращения должна обеспечивать максимальный отвод тепла от двигателя и поступление жидкости по главному контуру через радиатор.

2. Требования к управлению скоростью вращения вентилятора охлаждения, то есть управление скоростью воздушного потока через радиатор. Они включают в себя контроль количества тепла, которое должно быть рассеяно от тепло-

носителя в радиаторе во внешнюю среду. Минимальная скорость вращения вентилятора равна нулю, для случаев прогрева двигателя, и максимальная скорость, которая позволяет рассеивать максимально возможное количество тепла от охлаждающей жидкости при повышении температуры охлаждающей жидкости или температуры внешней среды [1–3].

Требования к управлению термостатом, то есть управление работой термостата (управление открытием и закрытием термостата), который должен обеспечивать количество жидкости, проходящей через радиатор, пропорционально температуре охлаждающей жидкости. Здесь следует отметить, что механический терморегулятор не в полном объеме обеспечивает необходимую адаптивность управления, что позволяет определить требования к электронной схеме терморегулятора.

Другие требования, такие как тактико-технические требования, конструкторско-технические, технологические, а также возможность обслуживания и ремонта [4–8].

Задачей предлагаемой и исследуемой адаптивной схемы управления является поддержание оптимальной температуры охлаждающей жидкости в системе охлаждения двигателя на различных режимах его работы, при различной температуре окружающей среды, а также динамичность ее изменения путем адаптивного управления ее элементами (вентилятор, водяной насос, электронный термостат и др).

На рис. 1 представлена схема адаптивного управления системой охлаждения двигателя МГМ. Порядок адаптивного управления элементами системы охлаждения двигателя МГМ следующий.

Блок управления 4 получает сигналы от датчиков 2, 3, 5, 11, 16, 20, а затем подает управляющие сигналы на электродвигатель насоса 18, электродвигатель вентилятора 14, сервомотор термостата 15 и сервомотор жалюзи 9 для вращения насоса 19, вентилятора 13, термостата 17 и жалюзи 10. Блок управления, организуя свою работу через программный код, регулирует перекачку охлаждающей жидкости и скорость ее протекания по короткому или длинному пути через радиатор с целью контроля температуры охлаждающей жидкости и поддержания оптимальной температуры, обеспечивающей наименьший рас-

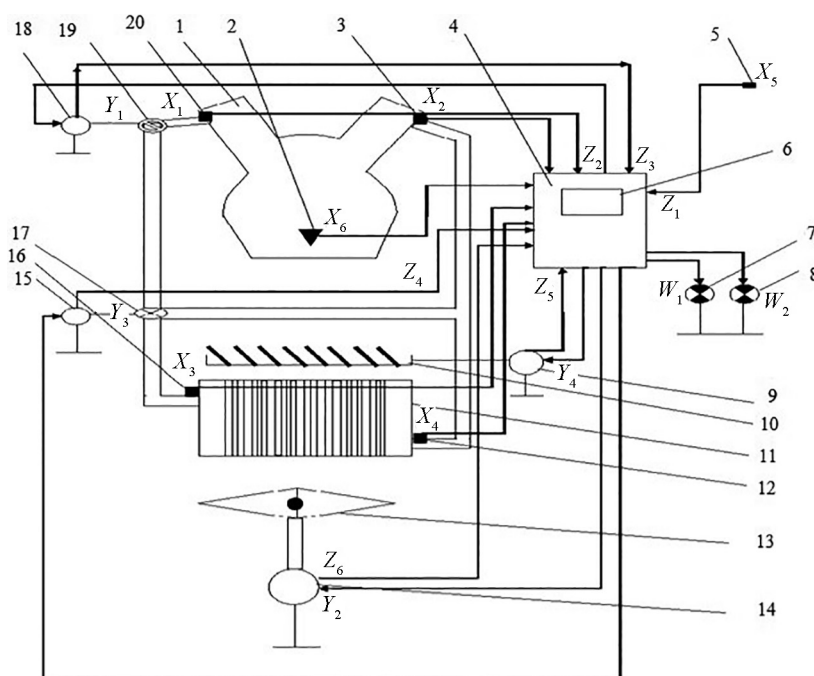


Рис. 1. Блок-схема адаптивного управления элементами системы охлаждения дизельного двигателя МГМ:  
 1 — двигатель; 2 — датчик частоты вращения вала двигателя; 3 — датчик температуры охлаждающей жидкости на входе в двигатель; 4 — блок управления; 5 — датчик температуры окружающего воздуха;  
 6 — схема «Arduino»; 7 — зеленый светодиод; 8 — красный светодиод; 9 — сервомотор жалюзи;  
 10 — жалюзи; 11 — датчик температуры охлаждающей жидкости на выходе из радиатора;  
 12 — радиатор; 13 — вентилятор; 14 — электродвигатель вентилятора; 15 — сервомотор термостата;  
 16 — датчик температуры охлаждающей жидкости на входе в радиатор;  
 17 — термостат; 18 — электродвигатель насоса; 19 — водяной насос;  
 20 — датчик температуры охлаждающей жидкости на выходе из двигателя

ход топлива. В блок управления и привода поступает информация о частоте вращения насоса, вентилятора, положении термостата и жалюзи, блок управления подает предупредительные сигналы о повышении или понижении температуры охлаждающей жидкости через светодиоды 7, 8.

Входные и выходные сигналы адаптивного управления блок-схемы можно разделить на следующие группы.

Входные сигналы, представляющие собой сигналы от датчиков, измеряющих различные параметры, влияющие на работу системы охлаждения двигателя и на температуру охлаждающей жидкости, к которым относятся:

$X_1$  — температура охлаждающей жидкости на входе в двигатель;

$X_2$  — температура охлаждающей жидкости на выходе из двигателя;

$X_3$ ,  $X_4$  — температура охлаждающей жидкости на входе и выходе из радиатора;

$X_5$  — температура окружающего воздуха;

$X_6$  — частота вращения коленчатого вала двигателя.

Выходные сигналы, представляющие собой управляющие сигналы, посылаемые цепью управления на исполнительные устройства (водяной насос, вентилятор, термостат, жалюзи), которыми являются:

$Y_1$  — управляющий сигнал скорости вращения водяного насоса;

$Y_2$  — управляющий сигнал для включения и выключения вентилятора;

$Y_3$  — управляющий сигнал для закрытия и открытия термостата;

$Y_4$  — управляющий сигнал для закрытия и открытия жалюзи.

Сигналы обратной связи — это выходные сигналы, которые повторно поступают в блок управления для сравнения, исправления ошибок и модификации процесса управления путем определения влияния выходных параметров на входные параметры, а именно:

$Z_1$  — температура охлаждающей жидкости на выходе из двигателя (которая является основной температурой, значение которой необходимо поддерживать);

$Z_2$  — частота вращения насоса;

$Z_3$  — скорость вращения вентилятора;

$Z_4$  — положение термостата;

$Z_5$  — положение жалюзи.

Предупредительные сигналы, представляющие собой сигналы, подаваемые цепью управления на световые или звуковые устройства сигнализации и устройства индикации с целью оповещения, когда измеренные и контролируемые значения превышают номинальные предельные значения, которые не должны быть превышены, а именно:

$W_1$  — сигнал тревоги о высокой температуре;  
 $W_2$  — сигнал тревоги при низкой температуре.

Определив входные и выходные сигналы, была спроектирована модель системы адаптивного управления системой охлаждения двигателя с помощью программного комплекса PROTEUS (рис. 2) [9].

Модель состоит из следующих элементов:

1. Блок управления на базе схемы Arduino относится к типу Uno, электронная схема управления, в состав которой входит микропроцессор, способный принимать, обрабатывать и отправлять цифровые и аналоговые сигналы. Она получает сигналы от различных датчиков, обраба-

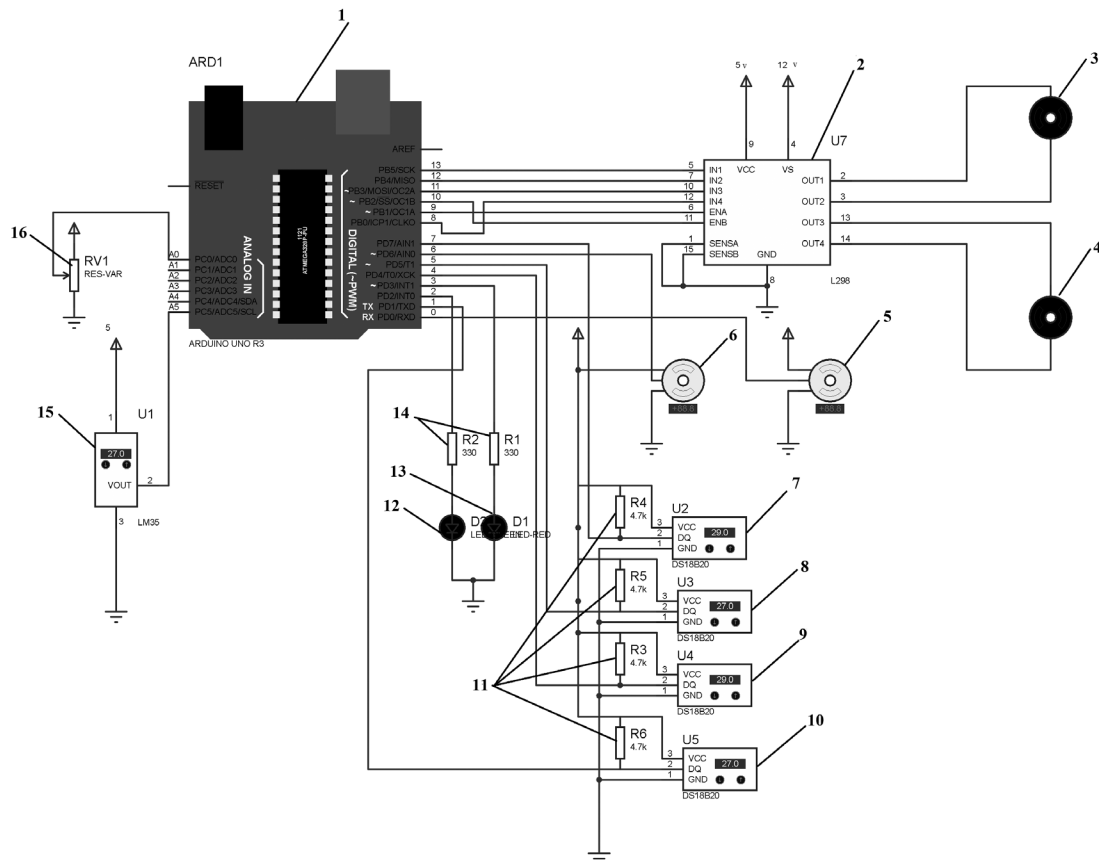


Рис. 2. Модель системы адаптивного управления системой охлаждения двигателя в программном комплексе PROTEUS: 1 — схема Arduino типа Uno; 2 — цепь привода электродвигателя L298; 3 — электродвигатель насоса; 4 — электродвигатель вентилятора; 5 — сервомотор термостата; 6 — сервомотор жалюзи; 7 — датчик температуры охлаждающей жидкости на входе в двигатель DS18B20; 8 — датчик температуры охлаждающей жидкости на выходе из двигателя DS18B20; 9 — датчик температуры охлаждающей жидкости на входе в радиатор DS18B20; 10 — датчик температуры охлаждающей жидкости на выходе из радиатора DS18B20; 11, 14 — сопротивление; 12 — красный светодиод; 13 — зеленый светодиод; 15 — датчик температуры окружающего воздуха LM35; 16 — датчик частоты вращения вала двигателя LM393

тывает данные и отправляет управляющие сигналы на исполнительные элементы с помощью загруженного в нее управляющего программного обеспечения.

2. Привод электродвигателя L 298: электронная схема, которая получает управляющие сигналы от блока управления и отправляет их на шаговые двигатели. Работающая схема выключает два двигателя с управляющей скоростью и направлением вращения.

3. Внешний датчик температуры LM35: электронный датчик с аналоговым выходным сигналом, который измеряет температуру воздуха в диапазоне  $-55^{\circ}\text{C} \dots +150^{\circ}\text{C}$  с точностью  $\pm 4^{\circ}\text{C}$ .

4. Датчик температуры жидкости DS18B20: водонепроницаемый цифровой электронный датчик, работающий в диапазоне  $-55^{\circ}\text{C} \dots +130^{\circ}\text{C}$  с точностью  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .

5. Электродвигатель: мотор постоянного тока, 12 вольт.

6. Сервомотор: электронный двигатель, угол поворота вала которого можно регулировать от  $0^{\circ}$  до  $90^{\circ}$  в обе стороны.

7. Электрические сопротивления, светодиод, элементы коммуникации.

Теперь рассмотрим, как работает адаптивная схема управления системой охлаждения двигателя. Датчик температуры 15 измеряет температуру наружного воздуха, а датчики 7, 8, 9, 10 измеряют температуру охлаждающей жидкости на входе и выходе двигателя, а также на входе и выходе радиатора, датчик 16 измеряет частоту вращения вала двигателя.

Сигналы с датчика передаются в виде электрического сигнала на схему Arduino 1 в блоке управления, значение полученного напряжения пропорционально значению температуры. Схема Arduino обрабатывает полученные данные через программный код, загруженный на микроконтроллер, и выдает необходимые управляющие сигналы для цепи привода электродвигателя 2 и оттуда на электродвигатель насоса 3 и электродвигатель вентилятора 4, которые вращаются со скоростью, соизмеримой с требуемой температурой охлаждающей жидкости и предварительно запрограммированными. Другой сигнал посылается на сервомотор термостата 5, вал которого в свою очередь поворачивается на угол и в направлении, соизмеримых с температурой

охлаждающей жидкости, необходимой для открытия или закрытия термостата. В зависимости от температуры окружающего воздуха на сервомотор жалюзи 6 подается необходимый сигнал для открытия или закрытия жалюзи. Когда температура поднимается выше допустимого предела, загорается красный светодиод 13, а когда она опускается ниже допустимого предела, загорается зеленый светодиод 14. Блок управления получает сигналы о частоте вращения насоса и вентилятора через скорость вращения электродвигателя, а также о положении термостата и жалюзи через положение стрелы сервомоторах.

В рамках исследования адаптивной системы управления системой охлаждения двигателя внутреннего сгорания был разработан алгоритм управления, который показан на рис. 3.

Работа алгоритма управления основана главным образом на значениях температуры охлаждающей жидкости на выходе из двигателя, воздуха окружающей среды и частоты вращения коленчатого вала двигателя.

При работающем двигателе насос системы охлаждения начинает работать на низких оборотах  $N_1'$ , чтобы выполнить прогрев различных частей двигателя (то есть осуществляется передача тепла от головки блока цилиндров остальным деталям двигателя через охлаждающие жидкости), пропорционально температуре охлаждающей жидкости до тех пор, пока температура не достигнет  $70^{\circ}\text{C}$ , после чего насос начинает работать с максимальной скоростью  $N_1''$ . При этом термостат открывается при температуре охлаждающей жидкости  $95^{\circ}\text{C}$ . Вентилятор начинает работать при температуре охлаждающей жидкости  $120^{\circ}\text{C}$  с частотой  $N_2'$ . Термостат открывается при температуре охлаждающей жидкости  $70^{\circ}\text{C}$ , если количество оборотов коленчатого вала двигателя более 2000 об/мин, так как при скорости вращения выше 2000 оборотов оптимальная температура охлаждающей жидкости должна быть менее  $80^{\circ}\text{C}$ . При высоких температурах окружающей среды скорость вращения вентилятора увеличивается до  $N_2''$  и уменьшается при снижении температуры наружной среды, либо отключается совсем, при прогреве двигателя.

Проведение практических экспериментов по предложенной схеме адаптивного управления показывает влияние температуры охлаждающей

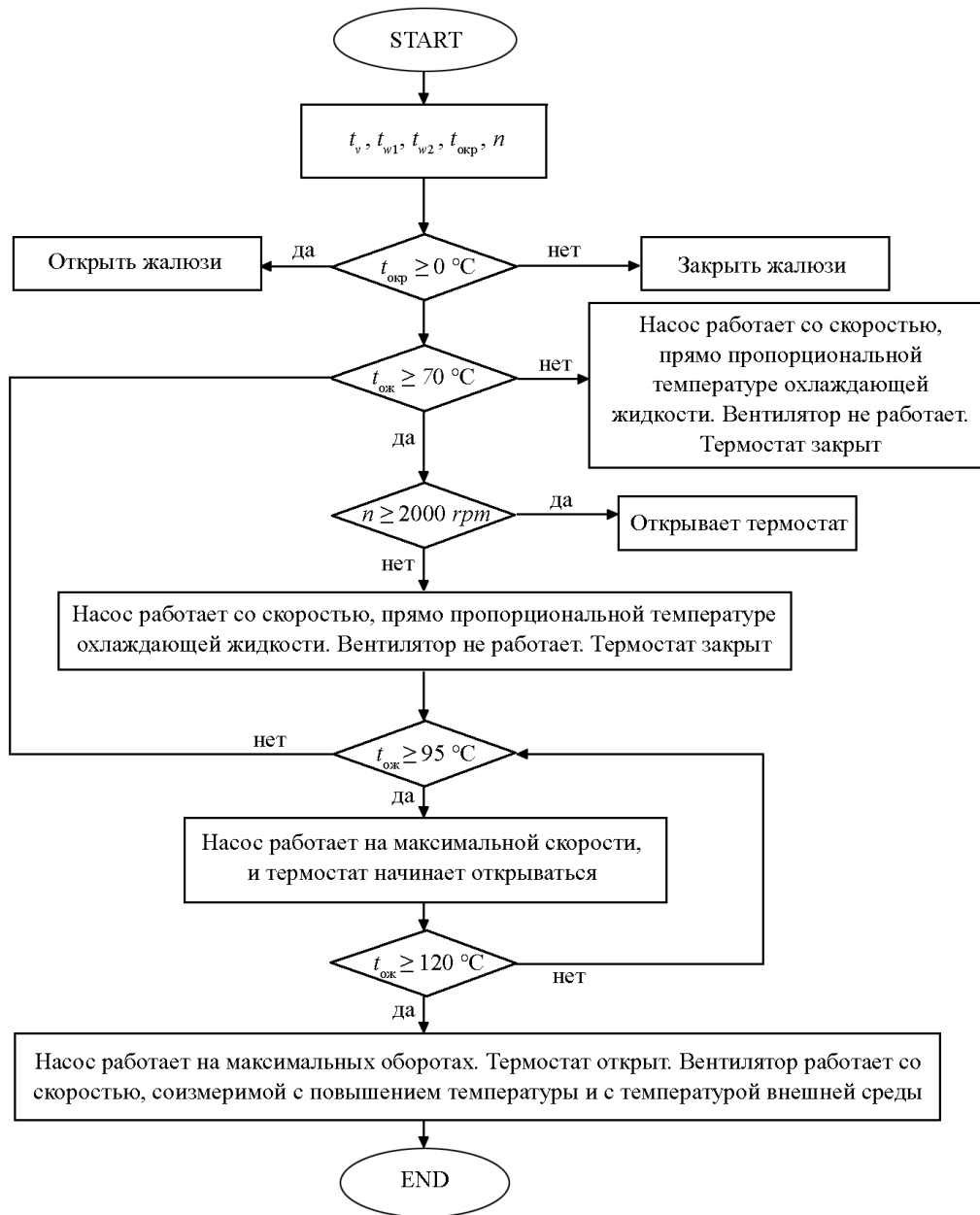


Рис. 3. Алгоритм адаптивного управления системой охлаждения двигателя:

$t_v$  — температура охлаждающей жидкости на входе в двигатель;  $t_{w1}$  — температура охлаждающей жидкости на входе в радиатор;  $t_{w2}$  — температура охлаждающей жидкости на выходе из радиатора;  $t_{ож}$  — температура охлаждающей жидкости на выходе из двигателя;  $t_{окр}$  — температура окружающего воздуха;  $n$  — частота вращения вала двигателя

жидкости на различных режимах работы двигателя на расход топлива. Зависимость представлена на рис. 4.

Видно, что поддержание температуры охлаждающей жидкости в пределах  $100^\circ\text{C}$  снижает наименьший расход топлива при различных режимах работы двигателя, а при частоте вра-

щения двигателя выше 2000 об/мин наименьший расход топлива можно получить за счет поддержания температуры охлаждающей жидкости в пределах  $70^\circ\text{C}$ , таким образом, подчеркивается важность точного контроля температуры охлаждающей жидкости для снижения расхода топлива.

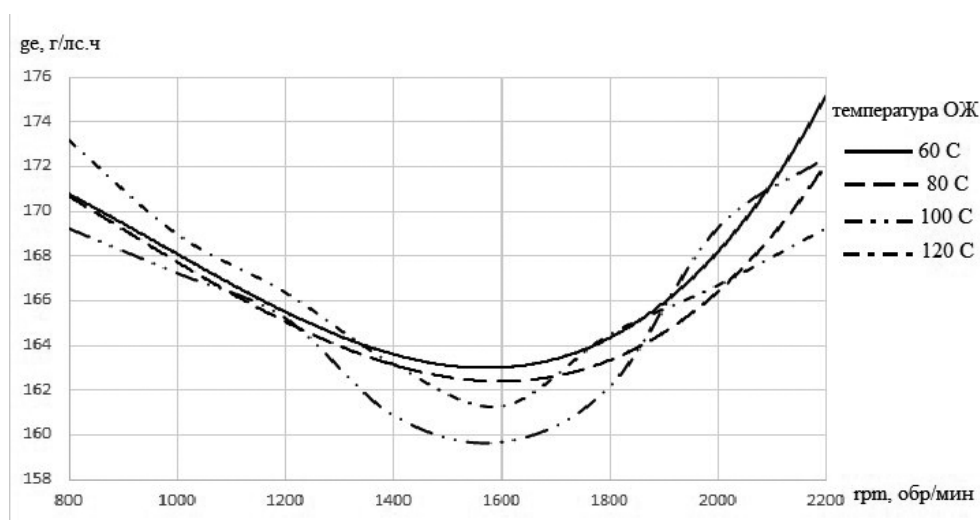


Рис. 4. Зависимость удельного эффективного расхода топлива от температуры охлаждающей жидкости для двигателя типа В2

Поддержание рабочей температуры двигателя типа В2 за счет управления элементами системы охлаждения обеспечит относительную экономию топлива в объемах от 5 до 25 %.

Поддержание оптимальной температуры охлаждающей жидкости двигателя за счет адаптивной схемы управления элементами системы охлаждения позволяет достичь следующих результатов:

- снизить расход топлива дизельного двигателя МГМ, от 5 до 25 %;
- сократить время прогрева двигателя;
- увеличить технический ресурс двигателя, обеспечив его работу в оптимальных температурных условиях.

Проведенное в рамках исследования имитационное моделирование позволило:

- сократить количество экспериментов для разных температурных режимов работы двигателя, затраты на экспериментальные исследования;
- оперативно изменять условия эксперимента путем изменения программного кода;
- использовать моделирование для разных типов двигателей путем изменения входных параметров в коде;
- получить результаты, близкие к реальным условиям работы двигателя.

Применение современных электронных схем для управления элементами системы охлаждения двигателя с целью поддержания оптимальной температуры охлаждающей жидкости позволяет снизить расход топлива, что приведет

к повышению подвижности МГМ и его способности двигаться и маневрировать в течение более длительного периода. Данная схема может быть использована на всех типах двигателей машин, путем простой модификации кода под условия и параметры каждого двигателя [10–13].

#### Список источников

1. Турбопоршневой двигатель В-92С2. Техническое описание. М: Военное издательство, 1991. 128 с.
2. Дизель В-84М (В-84, В-84-1). Техническое описание. М: Военное издательство, 1991. 128 с.
3. Система охлаждения танка: пат. 175715 Рос. Федерация. № 2016142465; заявл. 28.10.16; опубл. 15.12.17, Бюл. № 34. 3 с.
4. Шабалин Д.В. Исследование проблем создания и путей совершенствования танковых силовых установок: монография. Омск: ОАБИИ, 2019. 336 с.
5. Шабалин Д.В., Иванов В.В. Теоретические предпосылки улучшения топливной экономичности танковых силовых установок с двигателями типа В-2 // Наука и военная безопасность. 2018. № 3 (14). С. 29–34.
6. Лепешинский И.Ю., Пепеляев А.В., Бруннин Е.В. и др. Устройство бронетанковой техники: учеб. пособие.: в 2 ч. Ч. 1. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 156 с.
7. Никонова Г.В. Оптимизация управления режимом энергопотребления насосных агрега-

тов // Омский научный вестник. 2011. № 3 (103). С. 170–174.

8. Чикирев О.И., Лепешинский И.Ю., Костин Е.В., Мунин В.А. Повышение уровня диагностирования с введением голосовой аварийной сигнализации бронеобъектов // Омский научный вестник. 2012. № 3 (113). С. 258–262.

9. Банци М., Шайло М. Первые шаги с Arduino: платформа прототипирования с открытым исходным кодом; перевод с англ. 4-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2023. 278 с.

10. Гармаш Ю.В., Пономарева И.И., Сарбаев В.И. Структура управляющей системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 3–3 (82). С. 31–37.

11. Проговоров А.П. Математическая модель для определения основных показателей газодизельной модификации двигателей объектов вооружения и военной техники // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2023. № 2. С. 57–62.

12. Подколзин П.С. Оценка эффективности системы охлаждения малоразмерных дизелей в условиях высоких температур окружающей среды // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 6. С. 122–127.

13. Иванов В.В., Тибогаров А.А., Козлов А.А., Агафонов Д.С. Влияние теплового состояния силовой установки на подвижность военной гусеничной машины; сб. тр. VI Межвед. науч.-практ. конф. «Транспортные средства специального назначения: разработка, производство и модернизация», Омск, 2022. С. 131–138.

## References

1. Turbopiston Engine B-92C2S2. Technical Description. M: Military Publ. House, 1991. 128 p.

2. Diesel V-84M (V-84, V-84-1). Technical description. M.: Military Publishing House, 1991. 128 p.

3. Tank cooling system: patent. 175715 Ros. Federation. No. 2016142465; avt. 28.1016; published 15.12.17, Bulletin No 34. 3 p.

4. Shabalin D.V. Research of the Problems of Creation and Ways to Improve Tank Power Plants: Monograph. Omsk: OABII, 2019. 336 p.

5. Shabalin D.V., Ivanov V.V. Theoretical prerequisites for improving the fuel efficiency of tank propulsion systems with B-2 type engines // Science and Military Security. 2018. No 3 (14). Pp. 29–34.

6. Lepeshinsky I.Yu., Pepelyaev A.V., Brusnikin E.V. et al. Design of armored vehicles: textbook: in 2 parts. P. 1. Omsk: Izd-vo OmSTU, 2011. 156 p.

7. Nikonova G.V. Optimization of energy consumption mode control of pump units // Omsk scientific bulletin. 2011. No 3 (103). Pp. 170–174.

8. Chikirev O.I., Lepeshinsky I.Yu., Kostin E.V., Munin V.A. Increasing the level of diagnostics with the introduction of voice emergency signaling of armored objects // Omsk Scientific Bulletin. 2012. No 3 (113). Pp. 258–262.

9. Banzi M., Shiloh M. First Steps with Arduino: Open Source Prototyping Platform; translation from English. 4th ed. SPb.: BHV-Peterburg, 2023. 278 p.

10. Garmash, Yu.V., Ponomareva I.I., Sarbaev V.I. Structure of the control system of the internal combustion engine cooling // World of transport and technological machines. 2023. No 3–3 (82). Pp. 31–37.

11. Progovorov A.P. Mathematical model for determining the main indicators of gas-diesel engine modification of weapons and military equipment // Scientific Bulletin of the defense-industrial complex of Russia. 2023. No 2. Pp. 57–62.

12. Podkolzin P.S. Estimation of the cooling system efficiency of small-size diesel engines under conditions of high ambient temperatures // Izvestia Tula State University technical sciences. 2022. No 6. Pp. 122–127.

13. Ivanov V.V., Tibogarov A.A., Kozlov A.A., Agafonov D.S. Influence of the thermal state of the power plant on the mobility of the military tracked vehicle; Collection of Proc. of VI Interv. scientific-practical conf. «Special purpose vehicles: development, production and modernization», Omsk, 2022. Pp. 131–138.

УДК 623.4

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_143

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ УНИЧТОЖЕНИЯ ОТКАЗАВШИХ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ СНАРЯДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНЖЕНЕРНЫХ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ

### SOME FEATURES OF THE DESTRUCTION OF FAILED ARTILLERY PROJECTILES USING ENGINEERING HEATED CHARGES

*А.С. Пучков<sup>1</sup>, канд. техн. наук А.И. Спивак<sup>1</sup>, С.Н. Васильева<sup>1</sup>, Ю.А. Фроленков<sup>2</sup>*

*A.S. Puchkov<sup>1</sup>, Ph.D. A.I. Spivak<sup>1</sup>, S.N. Vasileva<sup>1</sup>, Yu.A. Frolenkov<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>НПО Спецматериалов, <sup>2</sup>Войсковая часть 93268*

Исследована возможность применения кумулятивных зарядов для бездетонационного уничтожения артиллерийских снарядов. Экспериментально подтверждена возможность использования кумулятивного заряда кольцевого (КЗК) для уничтожения артиллерийских снарядов. Показано, что предпочтительно использовать полукольцевой заряд КЗК для уничтожения артиллерийских снарядов, поскольку в случае использования заряда КЗК в полной комплектации возможна полная детонация снаряда. Экспериментально подтверждена возможность использования полукольцевого заряда пластида для бездетонационного уничтожения артиллерийских снарядов.

**Ключевые слова:** кумулятивный заряд кольцевой, кумулятивный заряд, артиллерийский снаряд, уничтожение.

The possibility of using shaped charges for the non-detonation destruction of artillery shells has been studied. The possibility of using a shaped charge of an annular KZK to destroy artillery shells has been experimentally confirmed. It has been shown that it is preferable to use a KZK semi-ring charge to destroy artillery shells, since in the case of using a fully loaded KZK charge, complete detonation of the projectile is possible. The possibility of using a semi-ring plastid charge for the non-detonation destruction of artillery shells has been experimentally confirmed.

**Keywords:** shaped charge ring, shaped charge, artillery shell, destruction.

При проведении работ по очистке местности от взрывоопасных предметов (ВОП) [1] в процессе ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на арсеналах (базах) хранения боеприпасов и при гуманитарной очистке (разминировании) местности подготовленными специалистами [2] с использованием специализированной техники [3] одними из основных задач являются: обеспечение безопасности персонала, а также минимизация разрушений зданий, сооружений и объектов критической инфраструктуры [4, 5], в том числе под водой [6, 7].

Мировой опыт и опыт российских подразделений показывает, что наиболее безопасным, экономичным и простым способом обезвреживания ВОП является их уничтожение с использованием накладных зарядов на месте обнаружения. Однако на практике это не всегда представляется возможным, в связи с расположенными в непосредственной близости от ВОП зданиями, сооружениями и объектами критической инфраструктуры. В таких случаях применяется широкий спектр специальных разрушителей

[8–10], которые обеспечивают бездетонационное разрушение ВОП, в том числе путем инициирования процесса дефлаграции [11–13].

Следует отметить, что значительное количество номенклатур известных специальных разрушителей ВОП не стоит на снабжении инженерных войск ВС РФ, и поэтому применение их в соответствующих подразделениях может носить ограниченный характер.

В связи со значительными объемами работ по очистке местности от не разорвавшихся ВОП в районе проведения специальной военной операции, особенно в условиях городской застройки, возникает необходимость в исследовании возможности приспособления штатных инженерных средств для бездетонационного уничтожения ВОП.

В инженерных войсках широкое применение нашли кумулятивные заряды для разрушения ти-

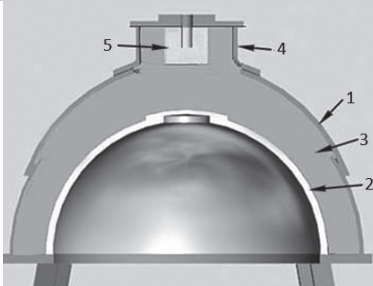
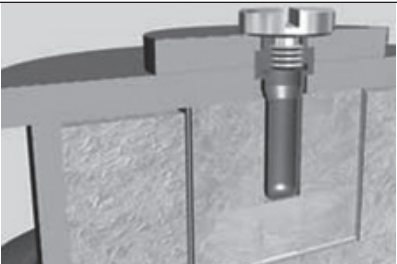
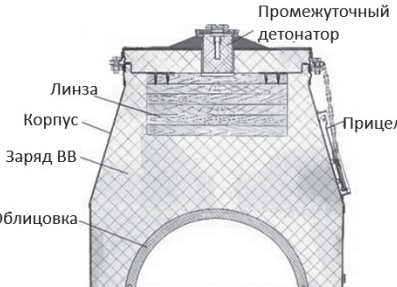
пичных элементов строительных конструкций, машин и других объектов. Такие заряды изготавливаются на заводах, обычно имеют прочный корпус из металла, пластмассы или других материалов, специальные гнезда для размещения детонаторов, а также средства для быстрой установки на объекте.

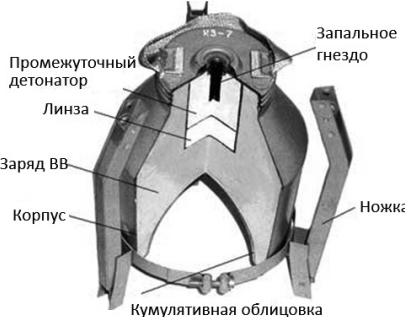
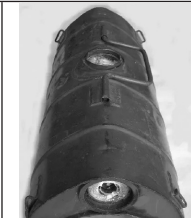
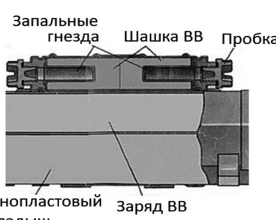
Использование стандартных зарядов ВВ при разрушении объектов предпочтительно, поскольку оно не требует сложных расчетов, а установка и инициирования зарядов выполняются быстро и надежно, обеспечивая гарантированное разрушение объекта. Виды кумулятивных зарядов, используемых для выполнения специальных задач, представлены в таблице.

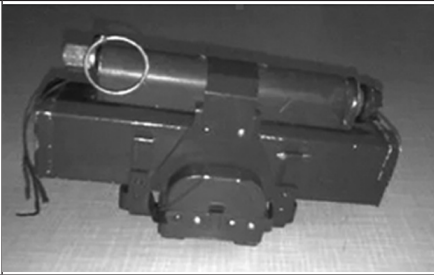
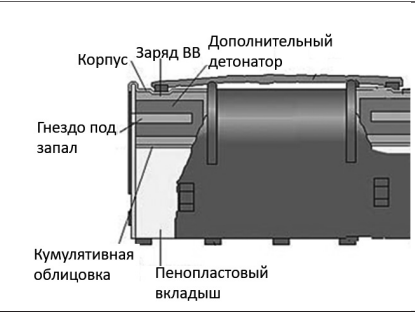
Анализ данных, представленных в табл, показывает, что кумулятивные заряды КЗ-4, КЗ-5, КЗ-6 и КЗ-7 предназначены для решения

Таблица

Виды кумулятивных зарядов

| Кумулятивный заряд КЗ-1 |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                       |  |  | Предназначен для пробивания сводов и потолков броневых, кирпичных и железобетонных фортификационных и других сооружений. Диаметр по корпусу — 35 см. Высота габаритная: по корпусу — 24 см, по выдвинутым стойкам (от верхней точки корпуса до плоскости объекта) — 57 см. Масса — 14,7 кг. Масса ВВ — 9 кг.<br>1 — корпус, 2 — кумулятивная выемка, 3 — заряд ВВ, 4 — прилив, 5 — промежуточный детонатор |
| Кумулятивный заряд КЗ-2 |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 2                       |  |  | Имеет то же предназначение, форму, устройство, размеры и эффективность, что и заряд КЗ-1. Отличие состоит в том, что запальное гнездо имеет металлическую оболочку и резьбу М10×1, позволяющую ввинчивать электродетонаторы типа ЭДП-р, стандартные зажигательные трубки типа ЗТП                                                                                                                          |
| Кумулятивный заряд КЗ-4 |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 3                       |  |  | Предназначен для пробивания броневых и железобетонных сооружений, разрушения покрытия автомобильных дорог и взлетно-посадочных полос, подземных убежищ, выведения из строя фугасов, находящихся под землей. Диаметр по корпусу — 41 см. Высота габаритная: по корпусу — 44 см, по выдвинутым стойкам (от верхней точки корпуса до плоскости объекта) — 165 см. Масса — 63 кг. Масса ВВ — 49 кг             |

|                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>4</p>       | <p><b>Кумулятивный заряд КЗ-5</b></p> <p>Предназначен для пробивания броневых и железобетонных сооружений, разрушения покрытия автомобильных дорог и взлетно-посадочных полос, подземных убежищ, выведения из строя боеприпасов крупного калибра, выведения из строя и уничтожения бронеобъектов.</p> <p>Диаметр по корпусу — 21,5 см. Высота габаритная: по выдвинутым стойкам (от верхней точки корпуса до плоскости объекта) — 61,8 см. Масса — 12,5 кг. Масса ВВ — 8,5 кг</p>                    |
| <p>5</p>     | <p><b>Кумулятивный заряд КЗ-6</b></p> <p>Предназначен для пробивания броневых и железобетонных сооружений, разрушения твердого покрытия автомобильных дорог и взлетно-посадочных полос, подземных убежищ, выведения из строя или уничтожения боеприпасов крупного калибра, выведения из строя и уничтожения бронеобъектов. Диаметр по корпусу — 11,2 см. Высота габаритная по корпусу — 29,2 см. Масса — 4,8 кг. Масса ВВ — 1,8 кг</p>                                                               |
| <p>6</p>   | <p><b>Кумулятивный заряд КЗ-7</b></p> <p>Предназначен для пробивания броневых и железобетонных сооружений, разрушения покрытия автомобильных дорог и взлетно-посадочных полос, подземных убежищ, выведения из строя боеприпасов крупного калибра, выведения из строя и уничтожения бронеобъектов.</p> <p>Диаметр по корпусу — 16,2 см. Высота габаритная: по корпусу — 27,2 см, по выдвинутым стойкам (от верхней точки корпуса до плоскости объекта) — 67 см. Масса — 6,5 кг. Масса ВВ — 3,5 кг</p> |
| <p>7</p>   | <p><b>Кумулятивный заряд КЗУ</b></p> <p>Предназначен для пробивания элементов металлических конструкций мостов, опор.</p> <p>Высота — 195 мм, ширина — 225 мм, длина — 500 мм. Масса — 18 кг. Масса ВВ — 12 кг</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <p>8</p>   | <p><b>Кумулятивный заряд КЗУ-2</b></p> <p>Предназначен для пробивания элементов металлических конструкций мостов, опор.</p> <p>Высота — 85 мм, ширина — 105 мм, длина — 150 мм. Масса — 18 кг. Масса ВВ — 12 кг</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

|    |                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9  |   | <p>Кумулятивный заряд УМКЗ</p> <p>Предназначен для пробивания элементов металлических конструкций мостов, опор.</p> <p>Высота — 76 мм, ширина — 70 мм, длина — 150 мм.</p> <p>Масса — 0,56 кг. Масса ВВ — 0,185 кг</p>                                              |
| 10 |   | <p>Кумулятивный заряд ЛКЗ-80</p> <p>Предназначен для пробивания элементов металлических конструкций мостов, опор.</p> <p>Высота — 115 мм, ширина — 120 мм, длина — 200 мм.</p> <p>Масса — 2,5 кг. Масса ВВ — 1,5 кг</p>                                             |
| 11 |                                                                                   | <p>Кумулятивный заряд КЗК</p> <p>Предназначен для перебивания стальных стержней, канатов и других металлических связей и средств крепления диаметром до 70 мм.</p> <p>Высота — 52 мм, ширина — 160 мм, длина — 200 мм.</p> <p>Масса — 1,0 кг. Масса ВВ — 0,4 кг</p> |

большого объема задач, в том числе для выведения из строя фугасов и уничтожения других боеприпасов крупного калибра. Они содержат 1,8...49 кг ВВ, что обеспечивает полную детонацию ВВ в обезвреживаемом ВОП. Эти кумулятивные заряды не могут быть использованы для бездетонационного уничтожения артиллерийских снарядов. Другие типы кумулятивных зарядов не предназначены для уничтожения артиллерийских снарядов. Конструкционные особенности большинства кумулятивных зарядов (диаметр корпуса, высота установки относительно разрушаемого объекта, высота, ширина, длина, количество содержащегося ВВ) не позволяют приспособить их для бездетонационного уничтожения артиллерийских снарядов.

Однако по конструктивным особенностям, геометрическим размерам, количеству содержащегося ВВ кумулятивный заряд КЗК может быть

приспособлен для бездетонационного уничтожения артиллерийских снарядов.

Как следует из данных, представленных в табл., кумулятивный кольцевой заряд КЗК предназначен для разрушения стальных труб, стержней и тросов. Этот заряд обладает способностью надежно перебивать стержни (трубы) с наружным диаметром до 70 мм и тросы диаметром до 65 мм при взрыве полного заряда на воздухе или под водой.

Кумулятивный заряд кольцевой КЗК состоит из двух кумулятивных полукольцевых зарядов, соединенных между собой с помощью петель, шпильки и замка, состоящего из защелки с прорезью (на корпусе одного полукольца) и крючка (на корпусе другого полукольца).

Вид КЗК представлен на рис. 1, а схема устройства КЗК — на рис. 2.

КЗК допускает применение полукольцевых зарядов отдельно друг от друга. Каждый полу-

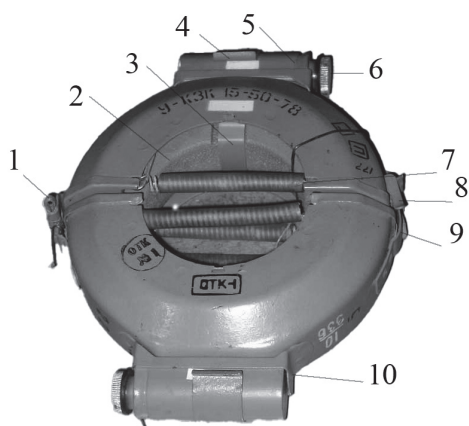


Рис. 1. Вид кумулятивного заряда кольцевого КЗК:

- 1 — шплинт; 2 — пенопластовый вкладыш;  
3 — прижим; 4 — защелка; 5 — промежуточный детонатор; 6 — пробка; 7 — пружина в пластиковой трубке; 8 — защелка с прорезью; 9 — крючок; 10 — рамка с выемкой

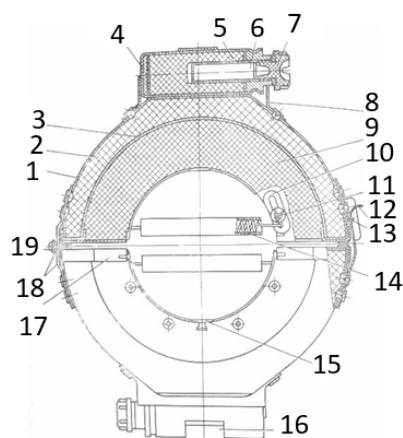


Рис. 2. Схема кумулятивного заряда кольцевого КЗК:

- 1 — корпус; 2 — заряд ВВ; 3 — облицовка кумулятивной выемки; 4 — стакан;  
5 — промежуточный детонатор; 6 — запальное гнездо; 7 — пробка; 8 — рамка с выемкой; 9 — пенопластовый вкладыш; 10 — скоба;  
11 — лапка; 12 — защелка с прорезью; 13 — крючок; 14 — пружина в пластиковой трубке; 15 — прижим; 16 — защелка; 17 — колпачок; 18 — петли; 19 — шплинт

кольцевой заряд состоит из корпуса, промежуточного детонатора и пенопластового вкладыша.

Корпус каждого полукольцевого заряда выполнен из стали и заполнен ВВ. Во внутренней части корпуса закреплена стальная кумулятивная облицовка. В полость кумулятивной выемки вставлен съемный пенопластовый вкладыш.

Крепление промежуточного детонатора к корпусу КЗК осуществляется с помощью пружинной защелки. На корпусе КЗК закреплены две пружины в пластиковых трубках для крепления его на перебиваемом элементе.

С целью отдельного применения полукольцевых зарядов для крепления их на перебиваемых объектах в комплект каждого кольцевого заряда входят две планки.

При перебивании элементов на суше пенопластовые вкладыши извлекаются. При подготовке КЗК для перебивания стальных канатов и стержней под водой пенопластовые вкладыши из кумулятивной выемки не извлекаются.

При перебивании элементов диаметром от 30 до 70 мм, как правило, применяется КЗК в полной комплектации. Пример использования КЗК при перебивании стального стержня диаметром 60 мм представлен на рис. 3, стального каната диаметром 60 мм — на рис. 4.

Для перебивания элементов диаметром от 15 до 30 мм применяется полукольцевой заряд КЗК. Пример использования полукольцевого

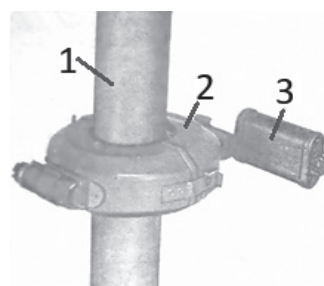


Рис. 3. Пример использования КЗК при перебивании стального стержня диаметром 60 мм:  
1 — стальной стержень; 2 — заряд; 3 — взрыватель

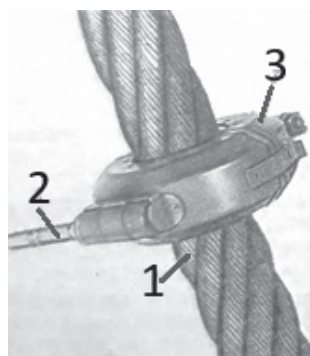


Рис. 4. Пример использования КЗК при перебивании стального каната диаметром 60 мм:  
1 — стальной стержень; 2 — заряд; 3 — взрыватель

заряда КЗК при перебивании стального стержня диаметром 30 мм представлен на рис. 5.

Для обезвреживания неразорвавшихся артиллерийских снарядов возможно использование КЗК в полной комплектации. Пример использования КЗК при обезвреживании неразорвавшихся артиллерийских снарядов представлен на рис. 6.

Однако, как показали эксперименты, применение КЗК в полной комплектации при обезвреживании отказавших артиллерийских снарядов может привести к их полной детонации, что нежелательно, особенно при размещении таких снарядов вблизи объектов критической инфраструктуры.

Наиболее перспективным способом обезвреживания отказавших артиллерийских снарядов является использование полукольцевого заряда КЗК. Пример использования полукольцевого заряда КЗК при обезвреживании отказавших артиллерийских снарядов представлен на рис. 7.

Полукольцевой заряд КЗК размещается на оживальной части артиллерийского снаряда в сечении, удаленном на 50 мм от дополнительного детонатора головного взрывателя. Толщина корпуса артиллерийского снаряда в выбранном сечении не должна превышать 30 мм.

Как показали эксперименты, при штатном инициировании полукольцевого заряда КЗК происходит разрушение корпуса артиллерийского снаряда с отделением от него и разрушением головного взрывателя без возникновения полной детонации снаряда. В редких случаях может произойти откол головного взрывателя от корпу-

са снаряда без разрушения взрывателя. В этом случае необходимо произвести на месте дополнительные работы по уничтожению головного взрывателя штатным методом с соблюдением стандартных мер безопасности.

Корпуса разрушенных снарядов с остатками ВВ (без взрывателей), не представляющие опасности в служебном обращении, могут быть в дальнейшем утилизированы установленным порядком, либо с извлечением и дальнейшей переработкой ВВ (корпуса снарядов, снаряженные методом заливки ВВ) в специализированных организациях, либо уничтожением методом выжигания или подрыва в полигонных условиях (как правило, корпуса снарядов, снаряженные методом шнекования).

В отдельных случаях, не терпящих отлагательства, при отсутствии кумулятивных зарядов КЗК, утилизацию неразорвавшихся артиллерийских снарядов методом разрушения их корпусов с отделением и уничтожением головных взрывателей без полной детонации снарядов, можно проводить с использованием пластита типа ПВВ. Для этого полукольцевой заряд ПВВ массой 0,3 кг размещается на оживальной части артиллерийского снаряда в сечении, удаленном на 50 мм от дополнительного детонатора головного взрывателя. Толщина слоя ПВВ должна быть не менее толщины корпуса артиллерийского снаряда в выбранном сечении. Пример использования ПВВ при обезвреживании отказавших артиллерийских снарядов представлен на рис. 9.

В результате экспериментальной проверки была подтверждена принципиальная возможность использования кумулятивного заряда

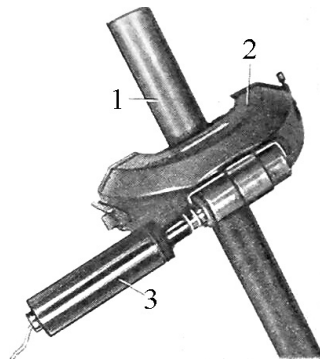


Рис. 5. Пример использования полукольцевого заряда КЗК при перебивании стального стержня диаметром 30 мм: 1 — стальной стержень; 2 — полукольцевой заряд; 3 — взрыватель



Рис. 6. Размещение КЗК на артиллерийском снаряде перед его обезвреживанием



Рис. 7. Размещение полукольцевого заряда КЗК на артиллерийском снаряде перед его обезвреживанием



Рис. 8. Размещение заряда ПВВ на артиллерийском снаряде перед его обезвреживанием

кольцевого КЗК для бездетонационного уничтожения отказавших артиллерийских снарядов. В случае отсутствия кумулятивных зарядов КЗК, есть возможность произвести аналогичные работы с использованием кольцевого заряда пластика толщиной не менее толщины стенки корпуса в оживальной части снаряда.

В случае применения кумулятивного заряда кольцевого КЗК для бездетонационного уничтожения отказавших артиллерийских снарядов методом разрушения их корпусов с отделением головного взрывателя обеспечивается безопасность проводимых работ, удобство установки кумулятивного заряда КЗК на корпусе снаряда, правильный ровный рез корпуса снаряда и откол головного взрывателя.

#### Список источников

1. Васильев Н.Н., Спивак А.И., Васильев В.Д. и др. К вопросу организации работ по очистке местности от взрывоопасных предметов после чрезвычайных происшествий на объектах хранения боеприпасов // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2012. № 3–4. С. 20–30.

2. Дунилов К.К., Фроленков Ю.А., Малькута В.О. и др. Пути повышения эффективности подготовки специалистов по осуществлению разведки и нейтрализации минно-взрывных устройств // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2011. № 3–4. С. 68–71.

3. Сильников М.В., Спивак А.И., Пугачев А.Н., Сазыкин А.М. К вопросу разработки специализированной техники обеспечения разминирования и выполнения специальных задач // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 3. С. 85–90.

4. Михайлин А.И., Спивак А.И., Чернышов М.В. и др. Разработка и испытания комбинированных средств локализации поражающих факторов взрыва с эффектом направленного взрыва // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2011. № 7–8. С. 9–16.

5. Дмитриев В.Я., Шишкин В.Н., Данилов Н.А. и др. К вопросу исследования закономерностей снижения уровня избыточного давления во фронте воздушной ударной волны устройствами для защиты от взрыва «Фонтан» // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Тех-

нические средства противодействия терроризму. 2014. № 9–10. С. 61–64.

6. Сильников М.В., Гук И.В., Михайлин А.И., Шишкин В.Н. Экспериментальное и теоретическое исследование эффективности действия технических устройств на основе гетерогенной двухфазной среды для подавления поражающих факторов подводного взрыва // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2018. № 1. С. 59–68.

7. Сильников М.В., Михайлин А.И., Шишкин В.Н., Гук И.В. Экспериментальное исследование эффективности действия технических средств на основе гетерогенной двухфазной среды для защиты от подводного взрыва // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 5–6. С. 58–65.

8. Васильев Н.Н., Спивак А.И., Фроленков Ю.А. Некоторые особенности уничтожения взрывоопасных устройств с использованием специальных устройств иностранного производства // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2010. № 2. С. 105–112.

9. Спивак А.И., Фроленков Ю.А., Кривошеев М.В. К вопросу нейтрализации взрывоопасных устройств бездетонационным методом с использованием специализированных средств иностранного производства // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 5–6. С. 47–54.

10. Васильев Н.Н., Спивак А.И., Фроленков Ю.А. К вопросу обеспечения безопасности при уничтожении взрывоопасных устройств с использованием специальных средств иностранного производства // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2010. № 7–8. С. 3–10.

11. Семашкин Г.В., Васильев В.Д., Фроленков Ю.А. и др. Способ и устройство разрушения взрывоопасных предметов / Актуальные проблемы защиты и безопасности // Труды XXIII Всероссийской науч.-практ. конф., 2020. Технические средства противодействия терроризму. С. 69–72.

12. Васильев В.Д., Малин Р.Ю., Ахметзянов А.И. и др. Некоторые аспекты использования малогабаритных зарядов взрывчатого вещества, формирующих ударное ядро, в борьбе с проявлениями международного терроризма /

Актуальные проблемы защиты и безопасности // Труды XXVI Всероссийской науч.-практ. конф., 2023. Т. 2. Технические средства противодействия терроризму. С. 52–55.

13. Сильников М.В., Васильев Н.Н., Спивак А.И. и др. Исследование закономерностей формирования ударного ядра при уничтожении взрывоопасных предметов дистанционным бездетонационным методом / Актуальные проблемы защиты и безопасности // Труды XIV Всероссийской науч.-практ. конф., 2011. Т. 2. Технические средства противодействия терроризму. С. 81–85.

## References

1. Vasiliev N.N., Spivak A.I., Vasiliev V.D. et al. On the issue of organizing work to clear the area from explosive objects after emergency incidents at ammunition storage facilities // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2012. No 3–4. Pp. 20–30.

2. Dunilov K.K., Frolenkov Yu.A., Malkuta V.O. Ways to increase the efficiency of training specialists in reconnaissance and neutralization of mine-explosive devices // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2011. No 3–4. Pp. 68–71.

3. Silnikov M.V., Spivak A.I., Pugachev A.N., Sazykin A.M. On the issue of developing specialized equipment for ensuring mine clearance and performing special tasks // Izvestia Rossijskoj akademii raketnyh i artillerijskih nauk. 2015. No 3. Pp. 85–90.

4. Mikhailin A.I., Spivak A.I., Chernyshov M.V. et al. Development and testing of combined means of localizing the damaging factors of an explosion with the effect of a directed explosion // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2011. No 7–8. Pp. 9–16.

5. Dmitriev V.Ya., Shishkin V.N., Danilov N.A. et al. On the issue of studying the patterns of reducing the level of excess pressure in the front of an air shock wave using devices for protection against explosions «Fontan» // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2014. No 9–10. Pp. 61–64.

6. Silnikov M.V., Guk I.V., Mikhailin A.I., Shishkin V.N. Experimental and theoretical study of the effectiveness of technical devices based on a heterogeneous two-phase medium to suppress the damaging factors of an underwater explosion

// News of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. 2018. No 1. Pp. 59–68.

7. Silnikov M.V., Mikhailin A.I., Shishkin V.N., Guk I.V. Experimental study of the effectiveness of technical means based on a heterogeneous two-phase medium for protection against underwater explosions // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2018. No 5–6. Pp. 58–65.

8. Vasiliev N.N., Spivak A.I., Frolenkov Yu.A. Some features of the destruction of explosive devices using special foreign-made devices // News of Izvestia Rossijskoj akademii raketnyh i artillerijskih nauk. 2010. No 2. Pp. 105–112.

9. Spivak A.I., Frolenkov Yu.A., Krivoshev M.V. et al. To the issue of neutralizing explosive devices using a non-detonation method using specialized foreign-made equipment // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2014. No 5–6. Pp. 47–54.

10. Vasiliev N.N., Spivak A.I., Frolenkov Yu.A. On the issue of ensuring safety during the destruction of explosive devices using special foreign-made means // Issues of defense technology. Series 16.

Technical means of countering terrorism. 2010. No 7–8. Pp. 3–10.

11. Semashkin G.V., Vasiliev V.D., Frolenkov Yu.A. et al. Method and device for destroying explosive objects / Current problems of protection and safety // Proceedings of the 23rd All-Russian Scientific and Industrial Complex 2020. Technical means of countering terrorism. Pp. 69–72.

12. Vasiliev V.D., Frolenkov Yu.A., Malin R.Yu. et al. Akhmetzyanov A.I. Some aspects of the use of small-sized explosive charges that form a shock core in the fight against manifestations of international terrorism / Current problems of protection and safety // Proceedings of the 26th All-Russian Scientific and Industrial Complex 2023. Vol. 2. Technical means of countering terrorism. Pp. 52–55.

13. Silnikov M.V., Vasiliev N.N., Spivak A.I. et al. Study of the patterns of the formation of a shock core during the destruction of explosive objects by a remote non-detonation method / Current problems of protection and safety // Proceedings of the 14th All-Russian Scientific and Industrial Complex 2011. Vol. 2. Technical means of countering terrorism. Pp. 81–85.

УДК 667.6

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_152

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
НАПЫЛЕННЫХ НА АЛЮМИНИЕВУЮ ОСНОВУ МНОГОСЛОЙНЫХ  
ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ТЕХНИКИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF  
MULTILAYER POLYMER COATINGS SPRAYED ON AN ALUMINUM BASE  
FOR SPECIAL PURPOSE EQUIPMENT**

*Канд. техн. наук А.Ю. Андрюшкин, В.В. Булыгин, Чжэньнин Ли*

*Ph.D. A.Yu. Andryushkin, V.V. Bulygin, Zhenning Li*

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова*

Долговечность техники специального назначения обусловлена механическими свойствами нанесенного на нее полимерного покрытия. Однородность состава и структуры многослойного полимерного покрытия определяет его механические свойства. Экспериментально исследовано влияние на модуль упругости образца, состоящего из алюминиевой основы с двухсторонним многослойным полимерным покрытием, числа единичных слоев этого покрытия при растяжении. Получены эмпирические зависимости модуля упругости образца и модуля упругости полимерного покрытия от числа единичных слоев. Установлено, что при увеличении числа единичных слоев одинаковой толщины с двух до восьми модуль упругости полимерного покрытия существенно возрастает. Увеличение числа единичных слоев полимерного покрытия более восьми нецелесообразно, так как к повышению модуля упругости не приводит.

**Ключевые слова:** многослойное полимерное покрытие, модуль упругости, механические свойства, однородность, растяжение образцов, структура покрытия.

The durability of special-purpose equipment is determined by the mechanical properties of the polymer coating applied to it. The uniformity of the composition and structure of a multilayer polymer coating determines its mechanical properties. An experimental study was made of the effect on the elastic modulus of a sample consisting of an aluminum base with a double-sided multilayer polymer coating and the number of single layers of this coating under tension. Empirical dependences of the elastic modulus of the sample and the elastic modulus of the polymer coating on the number of unit layers were obtained. It has been established that when the number of single layers of the same thickness increases from two to eight, the elastic modulus of the polymer coating increases significantly. Increasing the number of single layers of polymer coating more than eight is not advisable, since it does not lead to an increase in the elastic modulus.

**Keywords:** multilayer polymer coating, modulus of elasticity, mechanical properties, uniformity, stretching of samples, coating structure.

Для изготовления техники специального назначения широко применяют алюминиевые, магниевые, титановые сплавы и различные стали. При эксплуатации техники специального назначения механические свойства металлических конструкций ухудшаются, что обусловлено воздействием нагрузок и агрессивной окружающей среды. Нанесение полимерных покрытий обеспечивает металлической конструкции защиту от внешних воздействий, прочность, долговечность и необходимые функциональные свойства [1–3].

Рационально на крупногабаритную технику специального назначения полимерные покрытия наносить напылением. Для обеспечения высокого качества полимерного покрытия применяют напыление жидких полимерных композиций высокоскоростным воздушным потоком. В этом случае струи жидких полимерных композиций дробятся на капли малых размеров, которые перемешиваются между собой в факеле распыления и формируют однородную реакционную смесь на покрываемой металлической основе. После отверждения реакционной смеси образуется однородное полимерное покрытие [4–7].

Неоднородность напыленной на покрываемую металлическую основу реакционной смеси обуславливает возникновение в полимерном покрытии внутренних напряжений и различных дефектов (пор, трещин, расслоений), снижающих его прочность. Для исключения появления опасных экстремальных дефектов больших размеров рекомендуется послойное напыление полимерного покрытия, так как размеры дефекта не мо-

гут превышать толщину единичного слоя. Поэтому актуальна оценка влияния на механические свойства напыленного полимерного покрытия его слоистой структуры [8–13].

Цель исследования: установление взаимосвязи между слоистой структурой двухстороннего полимерного покрытия на алюминиевой основе и модулем упругости этого покрытия.

Задача исследования: определение модуля упругости двухстороннего многослойного полимерного покрытия на алюминиевой основе при растяжении образцов.

### Экспериментальные образцы и методы исследования

Экспериментальное исследование механических свойств напыленных на алюминиевую основу многослойных полимерных покрытий проведено на образцах (рис. 1). Материал основы образца — лента из отожженного алюминиевого сплава АД1-М с размерами  $0,5 \text{ мм} \times 20 \text{ мм} \times 200 \text{ мм}$ ;  $H_{\text{Al}} = 0,5 \text{ мм}$ ;  $B_{\text{Al}} = 20 \text{ мм}$ ;  $L_{\text{Al}} = 200 \text{ мм}$ . Лента из алюминиевого сплава АД1-М по ГОСТ 13726–97 имеет следующие механические характеристики: предел прочности образца при растяжении  $\sigma_b = 60,0 \text{ МПа}$ ; условный предел текучести образца при растяжении  $\sigma_{0,2} = 20,0 \text{ МПа}$ ; модуль упругости (модуль Юнга)  $E = 0,7 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ; относительное удлинение  $\delta = 20 \%$  (рис. 2).

Распыляемая композиция наносилась на основу с помощью распылителя, перемещаемого со скоростью  $0,15 \text{ м/с}$ , расстояние от распылителя

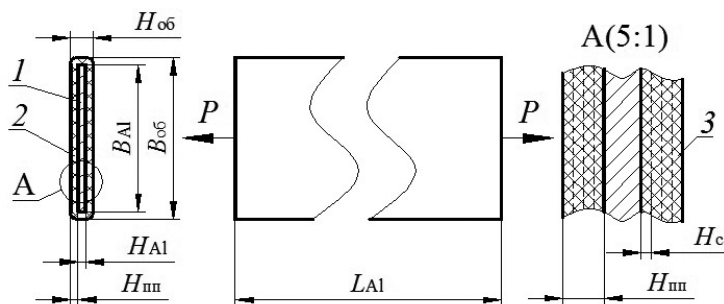


Рис. 1. Образец для испытаний: 1 — образец — алюминиевая лента  $0,5 \text{ мм} \times 20 \text{ мм} \times 200 \text{ мм}$  (основа или подложка); 2 — напыленное многослойное покрытие; 3 — единичный слой покрытия;  $P$  — сила растяжения образца;  $H_{\text{об}}$  — толщина образца;  $B_{\text{об}}$  — ширина образца;  $H_{\text{пп}}$  — толщина многослойного покрытия с одной стороны образца;  $H_{\text{с}}$  — толщина единичного слоя покрытия;  $H_{\text{Al}}$  — толщина алюминиевой ленты;  $B_{\text{Al}}$  — ширина алюминиевой ленты;  $L_{\text{Al}}$  — длина алюминиевой ленты

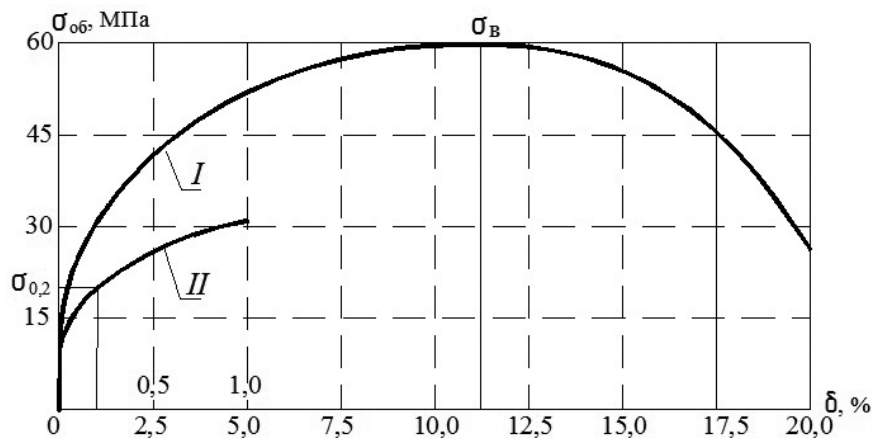


Рис. 2. Диаграмма растяжения образца из отожженного алюминиевого сплава АД1-М без покрытия:

*I* — полная диаграмма; *II* — диаграмма до предела текучести;

$\sigma_{об}$  — растягивающие напряжения в образце;  $\sigma_{в}$  — предел прочности образца при растяжении;

$\sigma_{0,2}$  — условный предел текучести образца при растяжении;

$\delta$  — относительное удлинение образца при растяжении

до поверхности основы составляло 500 мм. Распылитель содержит 8 сверхзвуковых сопел подачи распыляющего воздуха, расположенных равномерно по окружности вокруг канала подачи распыляемой композиции диаметром 1,2 мм. Геометрия сверхзвуковых сопел характеризуется критерием Маха на срезе  $M_b = 1,5$ . В качестве распыляющего газа использовался воздух, подаваемый под давлением 1,0 МПа. Распыляемая композиция подавалась в распылитель под давлением 0,1 МПа.

Полимерное покрытие образца напылялось послойно с двух сторон основы (рис. 1). Были изготовлены образцы с числом единичных слоев  $N_{сл} = 2, 4, 6, 8, 10, 12$ , толщина единичного слоя постоянна  $H_c = \text{const}$ . Напыленный единичный слой отверждался при комнатной температуре  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  до степени высыхания 1 по ГОСТ 19007–73, после чего напыляли следующий единичный слой. Полное отверждение напыленного многослойного полимерного покрытия осуществлялось в течение 24 часов до степени высыхания 5 и более по ГОСТ 19007–73.

Толщина многослойного полимерного покрытия:

$$H_{\text{пп}} = N_{\text{сл}} \cdot H_c,$$

где  $H_c$  — толщина единичного слоя, м;

$N_{\text{сл}}$  — число единичных слоев, шт.;

$H_{\text{пп}}$  — толщина многослойного полимерного покрытия, м.

Толщину отвержденного полимерного покрытия образца измеряли толщиномером NOVOTEST ТП-1.

Геометрические размеры образца измеряли электронным микрометром Мегеон 80800, точность измерения 0,001 мм; диапазон измерений: 0÷25 мм.

Модуль упругости образца определяли при растяжении на разрывной машине Shimadzu AGX.

#### Методика статистической обработки экспериментальных данных

Обработка экспериментальных данных по растяжению образцов, состоящих из двухстороннего многослойного полимерного покрытия на алюминиевой основе, проходит по следующей методике.

На первом этапе испытаний определяли площадь поперечного сечения  $F_{\text{Al}}$  и модуль упругости  $E_{\text{Al}}$  алюминиевой ленты.

Площадь поперечного сечения алюминиевой ленты:

$$F_{\text{Al}} = B_{\text{Al}} \cdot H_{\text{Al}}, \quad (1)$$

где  $F_{\text{Al}}$  — площадь поперечного сечения алюминиевой ленты,  $\text{м}^2$ ;

$H_{\text{Al}}$  — толщина алюминиевой ленты, м;

$B_{Al}$  — ширина алюминиевой ленты, м.

По результатам испытаний на растяжение десяти образцов алюминиевой ленты определили среднее значение модуля упругости:

$$E_{Al} = \frac{\sum_{i=1}^N E_{Al i}}{N}, \quad (2)$$

где  $E_{Al i}$  — значение модуля упругости  $i$ -го образца алюминиевой ленты, Па;

$E_{Al}$  — среднее значение модуля упругости образцов алюминиевой ленты, Па;

$N$  — число образцов ( $N = 10$ ), шт.

На втором этапе испытаний определяли модуль упругости образцов, состоящих из алюминиевой основы с двухсторонним полимерным покрытием. Испытания проводили на десяти образцах с одинаковым числом единичных слоев полимерного покрытия.

Измеряли ширину  $B_{об i}$  и толщину  $H_{об i}$  образцов, толщину напыленного многослойного полимерного покрытия  $H_{пн i}$ . Рассчитывали площадь поперечного сечения образца  $F_{об}$  и площадь поперечного сечения многослойного полимерного покрытия  $F_{пн}$ .

Площадь поперечного сечения  $i$ -го образца:

$$F_{об i} = B_{об i} \cdot H_{об i}, \quad (3)$$

где  $H_{об i}$  — толщина  $i$ -го образца, м;

$B_{об i}$  — ширина  $i$ -го образца, м;

$F_{об i}$  — площадь поперечного сечения  $i$ -го образца, м<sup>2</sup>.

Среднее значение площади поперечного сечения образцов:

$$F_{об} = \frac{\sum_{i=1}^N F_{об i}}{N}, \quad (4)$$

где  $F_{об}$  — среднее значение площади поперечного сечения образцов, м<sup>2</sup>;

$N$  — число образцов ( $N = 10$ ), шт.

Площадь поперечного сечения полимерного покрытия  $i$ -го образца:

$$F_{пн i} = F_{об i} - F_{Al}, \quad (5)$$

где  $F_{пн i}$  — площадь поперечного сечения полимерного покрытия  $i$ -го образца, м<sup>2</sup>.

Среднее значение площади поперечного сечения полимерного покрытия:

$$F_{пн} = \frac{\sum_{i=1}^N F_{пн i}}{N}, \quad (6)$$

где  $F_{пн}$  — среднее значение площади поперечного сечения полимерного покрытия образцов, м<sup>2</sup>;

$N$  — число образцов ( $N = 10$ ), шт.

При растяжении образца в нем возникают напряжения:

$$\sigma_{об} = \frac{P}{F_{об}} = \varepsilon \cdot E_{об}, \quad (7)$$

где  $\sigma_{об}$  — растягивающие напряжения в образце, Па;

$P$  — сила растяжения образца, Н;

$\varepsilon$  — относительное удлинение образца;

$E_{об}$  — модуль упругости образца, Па.

При растяжении образца алюминиевая основа и двухстороннее полимерное покрытие деформируются одинаково, то есть имеют одинаковое относительное удлинение  $\varepsilon$ , тогда с учетом выражений (1), (2), (4), (6) и (7) можно записать уравнение:

$$F_{об} \cdot E_{об} = F_{пн} \cdot E_{пн} + F_{Al} \cdot E_{Al} = (F_{об} - F_{Al}) \cdot E_{пн} + F_{Al} \cdot E_{Al}, \quad (8)$$

где  $E_{пн}$  — среднее значение модуля упругости многослойного полимерного покрытия образцов, Па;

$E_{об}$  — среднее значение модуля упругости образцов, Па.

По результатам испытаний на растяжение образцов с одинаковым числом единичных слоев полимерного покрытия определили среднее значение модуля упругости:

$$E_{об} = \frac{\sum_{i=1}^N E_{об i}}{N}, \quad (9)$$

где  $N$  — число образцов ( $N = 10$ ), шт.;

$E_{об i}$  — значение модуля упругости  $i$ -го образца, Па.

Далее проводили статистическую обработку результатов испытаний образцов. Среднее

квадратическое отклонение модуля упругости образцов:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (E_{обi} - E_{об})^2}, \quad (10)$$

где  $S$  — среднее квадратическое отклонение модуля упругости образцов, Па.

Коэффициент вариации модуля упругости образцов:

$$v = \frac{S}{E_{об}}. \quad (11)$$

Доверительный интервал модуля упругости образцов  $\Delta E_{об}$ :

$$\Delta E_{об} = \frac{t_T \cdot S}{\sqrt{N}}, \quad (12)$$

где  $\Delta E_{об}$  — доверительный интервал модуля упругости образцов, Па;

$t_T$  — значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы  $(N-1)$  и уровне значимости 0,05 (доверительная вероятность  $P = 0,95$ ) ( $t_T = 2,262$  при  $N = 10$ ).

Допускаемые отклонения отдельных значений модуля упругости образца должны находиться в пределах  $E_{об} \pm \Delta E_{об}$ .

Нормальность распределения результатов испытаний оценивали по асимметрии и эксцессу:

$$As = \frac{\sum_{i=1}^N (E_{обi} - E_{об})^3}{N \cdot S^3}; \quad Ex = \frac{\sum_{i=1}^N (E_{обi} - E_{об})^4 - 3}{N \cdot S^4}, \quad (13)$$

где  $As$  — асимметрия;

$Ex$  — эксцесс.

Дисперсии асимметрии и эксцесса рассчитывали по выражениям:

$$D(As) = \frac{6 \cdot (N-1)}{(N+1) \cdot (N+3)}; \quad (14)$$

$$D(Ex) = \frac{24 \cdot N \cdot (N-2) \cdot (N-3)}{(N-1)^2 \cdot (N+32) \cdot (N+5)},$$

где  $D(As)$  — дисперсия асимметрии;

$D(Ex)$  — дисперсия эксцесса.

Результаты испытаний распределены нормально, если выполняются условия:

$$|As| \leq 3 \cdot \sqrt{D(As)}; \quad (15)$$

$$|Ex| \leq 5 \cdot \sqrt{D(Ex)}.$$

Из выражения (8) рассчитывали модуль упругости многослойного полимерного покрытия образцов с одинаковым числом единичных слоев:

$$E_{\text{пн}} = \frac{F_{об} \cdot E_{об} - F_{Al} \cdot E_{Al}}{F_{\text{пн}}} = \frac{F_{об} \cdot E_{об} - F_{Al} \cdot E_{Al}}{F_{об} - F_{Al}}. \quad (16)$$

#### Определение модуля упругости двухстороннего многослойного полимерного покрытия на алюминиевой основе при растяжении образцов

На первом этапе испытаний по выражению (1) определяли площадь поперечного сечения алюминиевой ленты  $F_{Al} = 10 \text{ мм}^2$  и по выражению (2) модуль упругости алюминиевой ленты  $E_{Al} = 70108,21 \text{ МПа}$ .

На втором этапе испытаний определяли модуль упругости образцов, состоящих из алюминиевой основы с двухсторонним полимерным покрытием, при числе единичных слоев  $N_{сл} = 2, 4, 6, 8, 10, 12$ .

Полученные экспериментальные данные обрабатывали в программе Excel.

Измеряли ширину  $B_{обi}$  и толщину  $H_{обi}$  образцов, толщину напыленного многослойного полимерного покрытия  $H_{\text{пнi}}$ . По выражениям (3), (4) рассчитывали площадь поперечного сечения образца  $F_{об}$  и по выражениям (5), (6) площадь поперечного сечения многослойного полимерного покрытия  $F_{\text{пн}}$  (табл.).

По выражениям (9)–(15) проводили статистическую обработку и оценивали среднее значение модуля упругости образцов  $E_{об}$  (табл., рис. 3).

По выражению (16) рассчитывали модуль упругости многослойного полимерного покрытия образцов с одинаковым числом единичных слоев  $E_{\text{пн}}$  (табл., рис. 4).

Таблица

**Результаты эксперимента по определению модуля упругости двухстороннего многослойного полимерного покрытия на алюминиевой основе при растяжении образцов**

|                                                                                         |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Число единичных слоев покрытия $N_{\text{сл}}$ , шт.                                    | 2        | 4        | 6        | 8        | 10       | 12       |
| Среднее значение площади поперечного сечения образцов $F_{\text{об}}$ , мм <sup>2</sup> | 15,82    | 21,36    | 27,48    | 33,76    | 40,19    | 46,79    |
| Среднее значение площади поперечного сечения покрытия $F_{\text{пл}}$ , мм <sup>2</sup> | 5,82     | 11,36    | 17,48    | 23,76    | 30,19    | 36,79    |
| Модуль упругости образца № 1 $E_{\text{об1}}$ , МПа                                     | 44442,33 | 36867,01 | 24742,59 | 23252,65 | 18229,76 | 16795,04 |
| Модуль упругости образца № 2 $E_{\text{об2}}$ , МПа                                     | 45659,04 | 31613,68 | 27915,37 | 22225,41 | 19830,86 | 15751,28 |
| Модуль упругости образца № 3 $E_{\text{об3}}$ , МПа                                     | 45112,63 | 31601,36 | 28067,35 | 20880,33 | 19024,86 | 15787,36 |
| Модуль упругости образца № 4 $E_{\text{об4}}$ , МПа                                     | 44056,50 | 33496,74 | 25431,90 | 23294,96 | 18367,54 | 15909,94 |
| Модуль упругости образца № 5 $E_{\text{об5}}$ , МПа                                     | 48954,45 | 32079,02 | 30694,54 | 22615,30 | 17601,15 | 17050,93 |
| Модуль упругости образца № 6 $E_{\text{об6}}$ , МПа                                     | 48997,60 | 30881,07 | 27956,96 | 21395,68 | 18066,74 | 20214,97 |
| Модуль упругости образца № 7 $E_{\text{об7}}$ , МПа                                     | 42599,23 | 35966,40 | 24786,80 | 23846,35 | 18433,22 | 16483,76 |
| Модуль упругости образца № 8 $E_{\text{об8}}$ , МПа                                     | 41789,62 | 35778,62 | 25027,70 | 24166,83 | 20437,53 | 16041,94 |
| Модуль упругости образца № 9 $E_{\text{об9}}$ , МПа                                     | 46372,44 | 34061,62 | 25785,27 | 20680,37 | 21020,7  | 17022,03 |
| Модуль упругости образца № 10 $E_{\text{об10}}$ , МПа                                   | 42846,91 | 37363,13 | 28857,22 | 21295,30 | 20758,3  | 17068,97 |
| Среднее значение модуля упругости образца $E_{\text{об}}$ , МПа                         | 45083,08 | 33970,87 | 26926,57 | 22365,32 | 19177,07 | 16812,62 |
| Среднее квадратичное отклонение модуля упругости $S$ , МПа                              | 2489,70  | 2396,18  | 2048,21  | 1260,60  | 1236,53  | 1309,67  |
| Коэффициент вариации модуля упругости $v$                                               | 0,055    | 0,071    | 0,076    | 0,056    | 0,064    | 0,078    |
| Доверительный интервал модуля упругости $\Delta E_{\text{об}}$ , МПа                    | 1780,90  | 1714,00  | 1465,10  | 901,71   | 884,50   | 936,82   |
| Нормальность распределения                                                              | Норм.    | Норм.    | Норм.    | Норм.    | Норм.    | Норм.    |
| Среднее значение модуля упругости покрытия $E_{\text{пл}}$ , МПа                        | 2072,75  | 2164,30  | 2226,51  | 2271,51  | 2309,32  | 2324,46  |

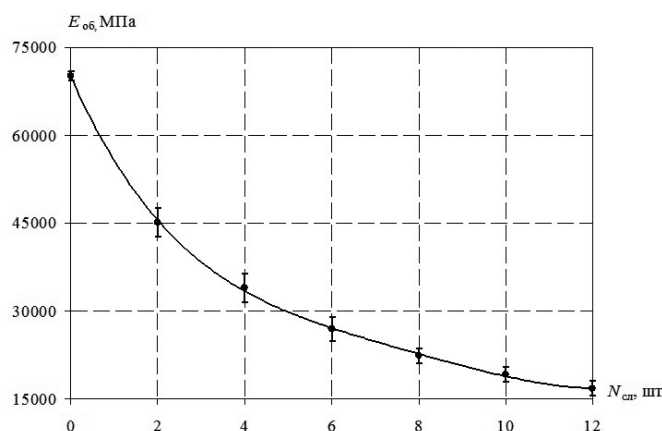


Рис. 3. Зависимость среднего значения модуля упругости образцов  $E_{\text{об}}$  от числа единичных слоев  $N_{\text{сл}}$ :

• — экспериментальные данные

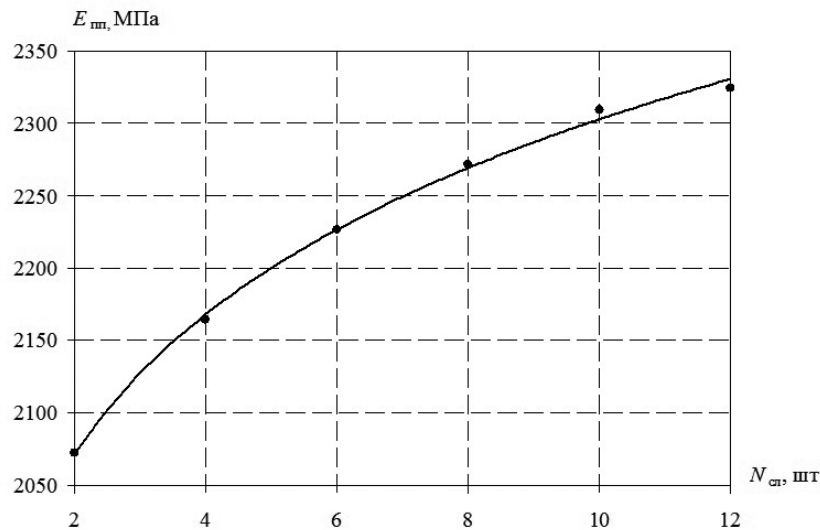


Рис. 4. Зависимость среднего значения модуля упругости многослойного полимерного покрытия  $E_{мн}$  от числа единичных слоев  $N_{сл}$ : • — экспериментальные данные

Зависимость среднего значения модуля упругости образцов  $E_{об}$  от числа единичных слоев  $N_{сл}$  хорошо аппроксимируется полиномиальной зависимостью (рис. 3):

$$E_{об} = 6,83 \cdot N_{сл}^4 - 218,65 \cdot N_{сл}^3 + 2669,70 \cdot N_{сл}^2 - 16773,0 \cdot N_{сл} + 70008,0.$$

Увеличение числа единичных слоев полимерного покрытия с 2 до 12 приводит к существенному снижению модуля упругости образцов на 62,5 %, так как модуль упругости полимерного покрытия на порядок меньше модуля упругости алюминиевой основы.

Зависимость модуля упругости полимерного покрытия  $E_{пп}$  от числа единичных слоев  $N_{сл}$  хорошо аппроксимируется степенной зависимостью (рис. 4):

$$E_{пп} = 1979,20 \cdot N_{сл}^{0,0658}.$$

Увеличение числа единичных слоев полимерного покрытия с 2 до 12 приводит к росту модуля упругости полимерного покрытия на 10,8 %. Дальнейшее увеличение числа слоев ( $N_{сл} > 12$  шт.) к повышению модуля упругости полимерного покрытия не приводит.

Таким образом, увеличение числа единичных слоев полимерного покрытия повышает его модуль упругости при растяжении.

## Обсуждение результатов

Опытные данные говорят о значительном влиянии слоистой структуры напыленного полимерного покрытия на его механические свойства. С увеличением числа единичных слоев одинаковой толщины модуль упругости полимерного покрытия возрастает. Значительное повышение модуля упругости наблюдается при увеличении числа единичных слоев с 2 до 8, незначительное повышение — с 8 до 12, повышение практически отсутствует — при числе единичных слоев более 12.

Причиной повышения механических свойств напыленного полимерного покрытия является его высокая однородность, которая обеспечивается малым размером распыленных высокоскоростным воздушным потоком капель полимерной композиции. Вероятность возникновения опасного дефекта в однородном по составу и структуре полимерном покрытии крайне мала. Структура полимерного покрытия, состоящая из 6–8 единичных слоев, обуславливает высокие значения показателей его механических свойств, в том числе модуля упругости, что обеспечивает долговечность техники специального назначения.

Таким образом, цель исследования достигнута — установлена взаимосвязь между слоистой структурой двухстороннего полимерного по-

крытия на алюминиевой основе и модулем упругости этого покрытия.

### Список источников

1. Анастасиади Г.П., Окрепилов В.В., Сильников М.В. Управление качеством промышленной продукции. СПб: Санкт-Петербургская издательско-книготорговая фирма «Наука», 2014. 412 с.

2. Гайдар С.М. Теория и практика создания средств защиты сельскохозяйственной техники от коррозии. М.: ФГНУ «Росинформоагротех», 2011. 310 с.

3. Рогов В.Р., Анисимов В.Р., Исаченко Е.А. Направление развития технологий для повышения антикоррозионной устойчивости автотранспортных средств // Грузовик. 2019. № 8. С. 16–18.

4. Бобкова Т.И., Васильев А.Ф., Прудников И.С., Фармаковский Б.В. Функционально-градиентные покрытия, полученные с помощью сверхзвукового холодного газодинамического напыления // Вопросы материаловедения. 2019. № 1 (97). С. 74–78.

5. Сергеевичев А.В., Онегин В.И. Физико-химические основы процессов формирования полимерных покрытий на твердой поверхности // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. Вып. 223. С. 213–227.

6. Кирюшина В.В., Ковалева Ю.Ю., Степанов П.А., Коваленко П.В. Исследование влияния масштабного фактора на прочностные свойства полимерных композиционных материалов // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2019. № 1. С. 97–106.

7. Яновский Ю.Г., Валиев Х.Х., Корнев Ю.В. и др. Роль масштабного фактора при изучении механических свойств композиционных материалов с наполнителями // Механика композиционных материалов и конструкций. 2010. Т. 16. № 2. С. 291–304.

8. Гаврилов Д.Г., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Сравнительная характеристика прочностных свойств образцов с различными типами покрытий для изделий авиационной техники // Труды МАИ. 2010. Вып. № 40. С. 1–14.

9. Зезин Ю.П., Ломакин Е.В., Мамонов С.В. и др. Определение модуля упругости покрытий по результатам испытаний на растяжение и из-

гиб трехслойных образцов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 8. С. 61–63.

10. Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н., Чистяков П.В. и др. Определение упругих характеристик полимерных покрытий по результатам испытаний на растяжение и изгиб плоских образцов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия «Математика. Механика. Информатика». 2012. Т. 12. Вып. 3. С. 74–80.

11. Гетманов А.Г., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Экспериментальное исследование механических свойств полимерных покрытий на образцах из алюминиевого сплава // Труды МАИ. 2014. Вып. № 72. С. 1–11.

12. Соляев Ю.О., Лурье С.А., Рабинский Л.Н. и др. Экспериментально-теоретическое исследование влияния полимерных порошковых покрытий на механические свойства стальных пластин // Механика композиционных материалов и конструкций. 2015. Т. 21. № 2. С. 197–205.

13. Андрюшкин А.Ю., Изюмова Е.А., Романат Н. Теоретическое обоснование многослойности функционального покрытия техники специального назначения для снижения вероятности его отказа при наличии недопустимых производственных дефектов // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 3–4 (177–178). С. 104–108.

### References

1. Anastasiadi G.P., Okrepilov V.V., Silnikov M.V. Quality management of industrial products. Publisher: St. Petersburg publishing and bookselling company «Nauka». St. Petersburg. 2014. 412 p.

2. Gaidar S.M. Theory and practice of creating means of protecting agricultural machinery from corrosion. M.: Federal State Scientific Institution «Rosinformoagrotech». 2011. 310 p.

3. Rogov V.R., Anisimov V.R., Isachenko E.A. Direction of development of technologies for increasing the anti-corrosion resistance of motor vehicles // Truck. 2019. No 8. Pp. 16–18.

4. Bobkova T.I., Vasiliev A.F., Prudnikov I.S., Farmakovskiy B.V. Functional gradient coatings obtained using supersonic cold gas–dynamic spraying // Questions of materials science. 2019. No 1 (97). Pp. 74–78.

5. Sergeevichev A.V., Sergeevichev A.V., Onegin V.I. Physico-chemical foundations of the processes of forming polymer coatings on hard surfaces // News of the St. Petersburg Forestry Academy. Vol. 223. 2018. Pp. 213–227.
6. Kiryushina V.V., Kovaleva Yu.Yu., Stepanov P.A., Kovalenko P.V. Study of the influence of the scale factor on the strength properties of polymer composite materials // News of universities. Nuclear energy. 2019. No 1. Pp. 97–106.
7. Yanovsky Yu.G., Valiev H.H., Kornev Yu.V. et al. The role of the scale factor in studying the mechanical properties of composite materials with fillers // Mechanics of composite materials and structures. 2010. T. 16. No 2. Pp. 291–304.
8. Gavrilov D.G., Mamonov S.V., Martirosov M.I., Rabinsky L.N. Comparative characteristics of the strength properties of samples with various types of coatings for aircraft products // Proceedings of MAI. Issue No 40. M.: MAI, 2010. Pp. 1–14.
9. Zezin Yu.P., Lomakin E.V., Mamonov S.V. et al. Determination of the elastic modulus of coatings based on the results of tensile and bending tests of three-layer samples // Factory laboratory. Diagnostics of materials. Vol. 78. No. 8. 2012. Pp. 61–63.
10. Martirosov M.I., Rabinsky L.N., Chistyakov P.V. et al. Determination of the elastic characteristics of polymer coatings based on the results of tensile and bending tests of flat samples // News of Saratov University. New episode. Series «Mathematics. Mechanics. Computer science». Vol. 12. Issue 3. 2012. Pp. 74–80.
11. Getmanov A.G., Mamonov S.V., Martirosov M.I., Rabinsky L.N. Experimental study of the mechanical properties of polymer coatings on aluminum alloy samples // Proceedings of MAI. Issue No 72. 2014. Pp. 1–11.
12. Solyaev Yu.O., Lurie S.A., Rabinsky L.N. et al. Experimental and theoretical study of the influence of polymer powder coatings on the mechanical properties of steel plates // Mechanics of composite materials and structures. 2015. Vol. 21. No 2. Pp. 197–205.
13. Andryushkin A.Yu., Izyumova E.A., Romanat N. Theoretical justification for the multi-layer functional coating of special-purpose equipment to reduce the likelihood of its failure in the presence of unacceptable manufacturing defects // Issues of defense technology. Episode 16: Technical means of countering terrorism. 2023. No 3–4 (177–178). Pp. 104–108.

УДК 355.424.8

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_161

## ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ БОЕВЫХ РОБОТОВ

## WAYS TO IMPROVE COMBAT ROBOTS

*Канд. техн. наук Н.Е. Рахимжанов*

*Ph.D. N.E. Rakimzhanov*

*Омский автобронетанковый инженерный институт (филиал) ВА МТО*

Современные боевые операции представляют собой серьезную проблему. С одной стороны, различные военные и специализированные роботизированные системы разрабатываются независимо друг от друга. Однако, с другой стороны, существует необходимость в стандартизации технических характеристик этих систем, чтобы облегчить их интеграцию и использование в боевых условиях. Также была выявлена проблема противоречия между разнообразием разрабатываемых на инициативной основе робототехнических комплексов военного и специального назначения и необходимостью обоснования их технического облика с целью стандартизации и унификации разработки и применения боевых роботов с модулями навесного оборудования. В статье анализируется современное состояние военной робототехники и исследуются пути повышения автономности и дистанционного управления этими системами, а также их потенциальное применение в различных боевых сценариях. В дополнение к боевым системам наземного базирования, в работе рассматривается потенциальное взаимодействие между этими системами и беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), которое могло бы расширить их возможности и позволить им выполнять дополнительные задачи при наличии вооружения.

**Ключевые слова:** боевой робот, автономные и телеконтролируемые роботы, программное обеспечение, боевые и специальные задачи, разведка, разминирование, эвакуация, радиоэлектронная борьба.

Modern combat operations pose a serious problem. On the one hand, various military and specialized robotic systems are being developed independently of each other. However, on the other hand, there is a need to standardize the technical characteristics of these systems in order to facilitate their integration and use in combat conditions. The problem of contradiction between the variety of military and special purpose robotic complexes being developed on an initiative basis and the need to substantiate their technical appearance in order to standardize and unify the development and use of combat robots with attachment modules was also identified. This article analyzes the current state of military robotics and explores ways to increase the autonomy and remote control of these systems, as well as their potential application in various combat scenarios. In addition to ground-based combat systems, the paper examines the potential interaction between these systems and unmanned aerial vehicles (UAVs), which could expand their capabilities and allow them to perform additional tasks in the presence of weapons.

**Keywords:** combat robot, autonomous and remotely controlled robots, software, combat and special tasks, reconnaissance, demining, evacuation, electronic warfare.

Проведенный анализ вооруженных конфликтов последних лет и специальной военной операции свидетельствует о появлении новых способов ведения боевых действий. Актуальность развития военной робототехники стала неоспоримой, кроме того, анализ концептуальных документов позволяет сделать вывод о том, что к приоритетным направлениям развития современной армии относятся разработка и насыщение войск перспективным и технологичным вооружением, к которому относятся беспилотные средства и робототехнические комплексы (боевые роботы).

Также, современные боевые действия насыщены информационными технологиями, и в том числе технологиями искусственного интеллекта, которые повсеместно внедряются в войска, для создания новейших образцов техники, наряду с использованием давно принятых систем вооружения.

Так, на новейшие образцы техники разработчиками возлагается выполнение функций, которые ранее выполнялись водителями, операторами, стрелками, штурманами боевых машин.

Под боевыми роботами (БР) (рис. 1) понимаются устройства или комплексы, которые позволяют в полном объеме или частично вывести экипажи, операторов из зоны огня и процесса непосредственного управления такими устройствами или комплексами [1].

Одной из основных тенденций современного развития наземной военной робототехники является постепенный переход от дистанционно-управляемых к полуавтономным (в перспективе к автономным) БР. Это позволит устранить основные недостатки дистанционно-управляемых БР, такие как:

– ограниченность радиуса действия при управлении по радио или кабельным линиям связи;

– необходимость непрерывного участия операторов в процессе управления как комплексом в целом, так и его подсистемами;

– возможность нарушения устойчивой работы каналов передачи информации и команд управления путем применения противником средств радиоэлектронного противодействия.

Необходимо отметить, что разработка, а в дальнейшем и применение роботизированных средств с высокой степенью автономности зависит прежде всего от возможности создания системы автоматического вождения в условиях различных сред (индустриальная среда, городские условия, сеть дорог, пересеченная местность).

Таким образом, важнейшей составляющей БР является система технического зрения (СТЗ). В подавляющем большинстве случаев СТЗ передает телевизионные (тепловизионные) изображения среды функционирования (в лучшем случае — предварительно обработанные для улучшения качества изображения или стереоизображения).

Однако во многих случаях телевизионной и даже стереотелевизионной информации оказывается недостаточно для эффективного анализа и оценки окружающей обстановки. Кроме того, для эффективного управления БР в особо сложных условиях функционирования необходим осмотр рабочей зоны с различных позиций, возможность знания ее геометрии вплоть до различных сечений и пространственного расположения как самого робототехнического комплекса (РТК), так и его рабочего оборудования.

Это вызывает потребность создания новых форм и технических средств информационного обеспечения, предоставляющих оператору не только телевизионную и телеметрическую информацию о местоположении и статусе БР в текущий момент времени, но и подробную информацию о геометрических параметрах окружающей среды с наложением на них результатов обнаружения целевых объектов и распознавания источника опасности. Такая информация должна предоставляться оператору в форме, обеспечивающей трехмерное моделирование рабочей зоны с возможностью оперативного расче-

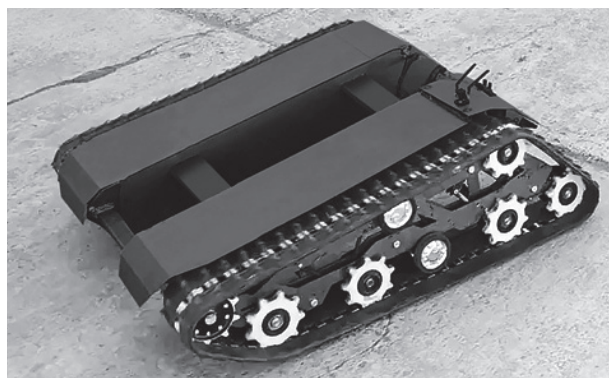


Рис. 1. Боевой робот (РТК ВН «Омич»)

та и планирования действий в условиях недетерминированной обстановки.

Поскольку боевые роботы могут действовать самостоятельно (автономно), приспосабливаясь к враждебной среде, обучаясь на ошибках, реализуя множество функций, то это является ключевым фактором к их использованию, наряду с возможностью восстановления роботов после повреждения для последующего применения [2]. Фактор сохранения военнослужащих при использовании боевых роботов сложно переоценить.

Военные роботы разрабатываются и применяются для всех видов и родов вооруженных сил каждой из сторон конфликта [3]. В текущих вооруженных конфликтах современности используется вся номенклатура боевой техники и средств, разработанных со Второй мировой войны и по настоящее время, что приводит к тотальному уничтожению не только военной, но и гражданской инфраструктуры в зоне боевых действий.

Тактика пехотных атак большими группами личного состава показала свою несостоятельность ввиду больших потерь при наличии глубоко эшелонированной обороны противостоящей стороны, воздушной разведки, проводимой при помощи авиации, вертолетов и дронов, космической спутниковой разведки и средств высокоточного поражения.

В основном для захвата передних рубежей обороны противника при поддержке артиллерии и авиации применяются танки, броневые автомобили на гусеничной и колесной базе, пилотируемые экипажами.

После применения беспилотных средств воздушной и космической разведки, связанных в единые контуры боевого управления, осуществляется выявление наземных боевых установок, машин и комплексов атакующего противника и производится их огневое поражение, в том числе и личного состава, находящегося внутри или рядом с боевой техникой.

Раненые военнослужащие, находящиеся рядом с поврежденной техникой, подлежат эвакуации с поля боя в течение так называемого «золотого» часа для спасения их жизни, иначе количество погибших многократно возрастет [5].

Возникает необходимость в разработке и использовании внешне управляемых эвакуационных медицинских платформ, которые могут

находить и забирать раненых военнослужащих с поля боя, рис. 2.

Если поврежденная техника подлежит замене или восстановлению, то выбытие личного состава с поля боя не всегда может быть заменено равноценными и обученными опытными экипажами. Нехватка экипажей приводит к затягиванию или отмене принятых решений на ответные огневые удары, и даже к оставлению ранее захваченных позиций.

Таким образом, скоротечные и точечные боевые действия противника в современных боевых действиях с применением высокоточных беспилотных средств огневого поражения в тактическом и оперативно-тактическом звене, интегрированные в глобальные системы стратегической космической разведки и управления, привели к необходимости эффективного оснащения собственных сил унифицированными многофункциональными (с функциями разведки, огневого поражения, радиоэлектронного подавления, эвакуации военнослужащих с передовой линии, разминирования, боевого обеспечения (снабжения), введения в заблуждение противника и т.д., беспилотными транспортными средствами, интегрированными в отечественную глобальную систему управления на театре военных действий.

Аналогичные проблемы успешно решаются военными ведомствами ведущих стран мира. Так, в Интегрированной Дорожной карте развития безэкипажных систем на период 2009–2034 гг. в интересах Армии США запланировано создание и практическое применение свыше 170 типов боевых роботов [4].



Рис. 2. Эвакуация раненого военнослужащего при помощи боевого робота

В условиях санкционного давления и запрета на импорт технологий двойного назначения, представляют актуальность разработки отдельных механизмов, электронных плат, программного обеспечения, ходовой части БР различных видов [6].

В полусотне развитых стран мира около тысячи научных структур проводят исследования по проблематике БР. В результате активных разработок и испытаний, БР создаются передовыми странами Европы, Ближнего Востока, Центральной и Юго-Восточной Азии, и Россией [7].

При изучении существующих разработок с точки зрения создания и использования БР военного предназначения следует рассмотреть существующие модели и применяемые технологии.

В процессе анализа автор заинтересовался следующими аспектами, изложенными в [8]. Для исследуемой предметной области представляет интерес разработка, создание, испытание, возможности при выполнении боевых и специальных задач, а также применение различных видов БР, таких как:

- ударные;
- разведывательные;
- грузовые;
- санитарные;
- БР РЭБ и т.д.

Следует понять, насколько в БР представлены различные функции. Как организована доставка средств поражения, ведение разведывательных действий, перемещение грузов (раненные, боеприпасы, продовольствие, питание, материальные средства), организация отвлекающих действий для противника, медицинская помощь раненым военнослужащим и другие.

Необходимо обосновать значение технических характеристик и параметров БР, а именно:

- скорость передвижения по пересеченной местности;
- возможности по маневру;
- запас хода;
- грузоподъемность;
- возможности по автономности;
- возможности по маскировке;
- возможности по преодолению заграждений и минных полей.

Основываясь на выделенные технические характеристики, которыми должен обладать боевой робот, был разработан алгоритм разработки

и обоснования технического облика боевых роботов наземного базирования (рис. 3).

Следует определить значения боевой эффективности и надежности БР в различных типовых боевых ситуациях, выявленные недостатки и проблемы при реальных боевых действиях.

Так, в соответствии со взглядами отечественных и зарубежных специалистов в боевых действиях будущего одними из наиболее перспективных видов вооружения и военной техники будут боевые роботы. При этом многие из них предполагают, что широкомасштабное внедрение роботов и технологий робототехники изменит способы ведения операций и технический облик перспективных систем вооружения, повысит эффективность их применения, а также обеспечит сокращение потерь личного состава. Предполагается, что в вооруженных конфликтах будущего основную роль на поле боя будут играть БР, способные действовать как в группах, так и во взаимодействии с традиционными силами и средствами.

Основываясь на этом, необходимо установить уровень интегрируемости БР с другими автоматизированными системами, например полевой артиллерии, разведки и радиоэлектронной борьбы, противовоздушной обороны, системами связи и др.

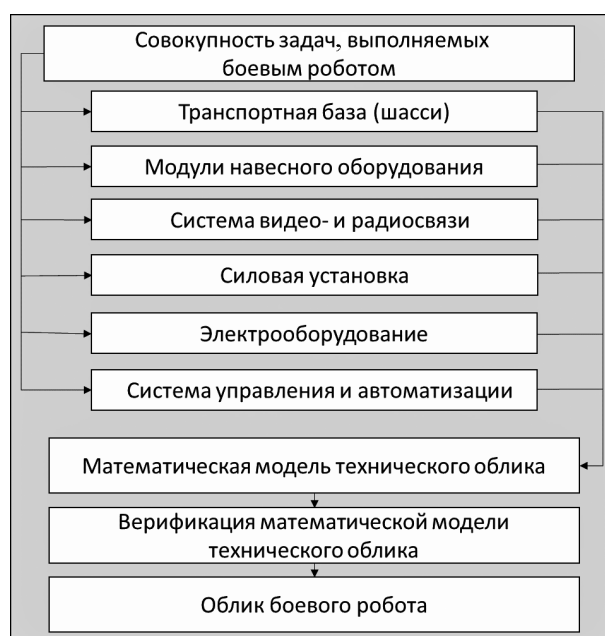


Рис. 3. Алгоритм разработки и обоснования технического облика боевого робота наземного базирования

Следует определить уровень материального и технического обслуживания БР, исходя из качества проведения ремонта, замены типовых блоков, зарядки батарей электроэнергией или наполнения топливных емкостей, по оснащению средствами разведки, огневого и (или) радио-электронного подавления.

При рассмотрении указанных условий были выделены основные области применения БР, такие как:

- ведение разведки;
- прорыв обороны противника;
- обеспечение обороны роботизированными огневыми точками;
- подавление огневого противодействия роботами с автоматическим оружием и противотанковыми средствами;
- ликвидация нештатных ситуаций с опасными в обращении боеприпасами;
- обезвреживание взрывоопасных предметов;
- проведение аварийно-восстановительных работ;
- эвакуация с поля боя личного состава и техники под огнем;
- инженерная разведка;
- минирование и разминирование;
- обеспечение преодоления заграждений;
- доставка боеприпасов и горюче-смазочных материалов в зону огневого воздействия;
- патрулирование, охрана и оборона районов и объектов.

Однако в условиях экономических санкций, объявленных коллективным Западом на товары военного и двойного назначения, возникают немалые трудности в сфере развития современной робототехники, что представляет актуальность промышленного выпуска в Российской Федерации электронных процессорных компонентов для промышленного производства БР разнообразных весовых групп.

Развитие алгоритмов управления с элементами искусственного интеллекта и внедрение их в БР ожидаемо должно привести к эволюционному переходу от полного контроля БР на расстоянии человеком (дистанционного управления) к частичному контролю БР на расстоянии человеком и частично контролируемым искусственным интеллектом (ИИ) (полуавтономное управление) и, далее, к полностью управляемым БР со стороны программ с ИИ.

Основной научно-технической проблемой на момент проведения исследования является разработка систем автоматического вождения РТК при любых дорожных условиях и состояниях внешней среды, под обстрелами и атаками дронов противника.

Специальная военная операция придала существенный импульс развития РТК, которые раньше по массе не превышали 200 кг, имели низкий уровень внедренных систем искусственного интеллекта и являлись дистанционными аппаратами, которые зависели от состояния радио- или телевизионных каналов связи с операторами.

Для операторов дистанционного управления представляет особую важность иметь реалистические объемные изображения с поля боя, передаваемые с любых ракурсов.

Также стоит отметить большой скачок в разработке и применении в боевых действиях беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), на данный момент в вооруженных конфликтах применяется два типа БПЛА — коптерные и планерные. Благодаря способности БПЛА коптерного типа работать в ограниченных пространствах, большей маневренности и меньшей прихотливости к запуску, для работы в сцепке с БР применяются БПЛА именно коптерного типа. Таким образом, появляется возможность применения БПЛА в дуплексной связи с БР, что увеличит эффективность применения обоих средств. Кооперация действий БПЛА и БР позволит производить разведку перед боем, доразведку в ходе боя, прикрытие выдвижения личного состава и уничтожение объектов противника.

БР, выполняющие специальные задачи, имеют небольшую скорость передвижения, не превышающую 10 км/ч. Зарубежные образцы могут двигаться до 35 км/ч вне шоссе дорог и до 70 км/ч по дорогам с качественным покрытием.

Основным препятствием к повышению максимальной скорости передвижения БР является его дистанционное управление и ограничения по собственному беспилотному передвижению, возможности технического зрения, уровень защищенности каналов навигационных и внешнего управления, состояние дорожного покрытия.

Поэтому БР нуждаются в высокой степени автономности и самостоятельности при выпол-

нении задач увеличения запаса хода и боекомплекта, усиления защищенности каналов связи и управления, исключения ошибок при распознавании целей и «дружественного» огня, распознавания типовых ситуаций, отработки тактики их использования БР в группировке разнородных сил и средств [9–10].

В нашей базе данных по БР, которая была проанализирована, размещено свыше 700 образцов. Если БР создаются в результате модернизации имеющихся экипажных образцов, то они являются наземными или морскими по среде применения и насчитывают десятую часть от всего количества БР.

Около 70 % БР являются изделиями первого поколения, у которых жестко прошиты алгоритмы принятия решений.

В случае нестандартной ситуации, когда отклонения внешних параметров текущей обстановки будут значительными, БР может войти в состояние сбоя или прекращения деятельности.

Остальные БР относятся ко второму поколению, программное обеспечение которых допускает ограниченно автономный режим в некоторых нетипичных ситуациях.

В центральный процессор БР стекается информация от множества сенсоров, где распознается образ текущей ситуации, что позволяет использовать режим адаптации в динамике развития ситуации.

Чем более наполненной будет база знаний, тем будет более обоснованной адаптация БР посредством выбора последовательности операций для реагирования на изменение обстановки.

При рассмотрении методов контроля за перемещением БР по поверхности земли наблюдаются сложности при определении координат выявления и распознавания наземных объектов. По этой причине наземные БР остаются пока на стадии дистанционного управления, хотя исследования по повышению уровня автономности наземных БР продолжаются.

Таким образом, рассмотренные условия и способы применения, степень полезности БР показывают, что широкое использование таких роботов позволяет увеличить эффективность выполнения боевых и специальных задач, снизить потери в личном составе и технике. Кроме того, при потере техники не теряется боевой опыт оператора, который, находится на значительном

удалении от линии прямого огневого соприкосновения с противником.

#### Список источников

1. Хрипунов С.П., Благодарящев И.В., Чиров Д.С. Военная робототехника: современные тренды и векторы развития // Тренды и управление. 2015. № 4. С. 410–422.
2. Рубцов И.В. Вопросы состояния и перспективы развития отечественной наземной робототехники военного и специального назначения // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. № 3 (140). С. 14–21.
3. Буренок В.М., Леонов А.В., Пронин А.Ю. Военно-экономические и инновационные аспекты интеграции нетрадиционных видов оружия в состав системы вооружения. М.: Издательская группа «Граница», 2014. 240 с.
4. Горячев О.В., Фимушкин В.С., Чуканов К.П. Мобильные сухопутные робототехнические комплексы — основные определения и классификационные признаки, направления и проблемы в создании и применении // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 12. Ч. 4. № 12–4. С. 139–151.
5. Рахимжанов Н.Е., Дьяков А.С., Кузьмин К.С. Применение робототехнических комплексов военного назначения для эвакуации раненых с поля боя в Вооруженных Силах Российской Федерации // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 7–8 (183–184). С. 97–103.
6. Корчак В.Ю., Лапшов В.С., Рубцов И.В. Перспективы развития наземных робототехнических комплексов военного и специального назначения // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2015. № 10 (171). С. 83–95.
7. Аналитическое исследование: мировой рынок робототехники. М.: НАУРР, 2016. 157 с.
8. Чиров Д.С., Новак К.В. Перспективные направления развития робототехнических комплексов специального назначения // Вопросы безопасности. 2018. № 2. С. 50–59.
9. Каляев А.В., Носков В.П., Чернухин Ю.В., Каляев И.А. Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. М.: Наука, 1990. 147 с.
10. Накано Э. Введение в робототехнику. М.: Мир, 1988. 334 с.

## References

1. Khripunov S.P., Blagodaryashev I.V., Chirov D.S. Military robotics: modern trends and development vectors // Trends and management. 2015. No 4. Pp. 410–422.
2. Rubtsov I.V. Issues of the state and prospects of development of domestic ground-based robotics for military and special purposes // Proceedings of the Southern Federal University. Technical sciences. 2013. No 3 (140). Pp. 14–21.
3. Burenok V.M., Leonov A.V., Pronin A.Yu. Military-economic and innovative aspects of the integration of non-traditional types of weapons into the armament system. Moscow: Publishing group «Border», 2014. 240 p.
4. Goryachev O.V., Fimushkin V.S., Chukanov K.P. Mobile land-based robotic complexes — basic definitions and classification features, directions and problems in creation and application. News of TulSU. Technical sciences. 2016. Issue 12. Part 4. No 12–4. Pp. 139–151.
5. Rakimzhanov N.E., Dyakov A.S., Kuzmin K.S. The use of military robotic complexes for the evacuation of the wounded from the battlefield in the Armed Forces of the Russian Federation // Issues of defense technology. Episode 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 7–8 (183–184). Pp. 97–103.
6. Korchak V.Yu., Lapshov V.S., Rubtsov I.V. Prospects for the development of ground-based robotic complexes for military and special purposes // News of the Southern Federal University. Technical sciences. 2015. № 10 (171). Pp. 83–95.
7. Analytical research: The global robotics market. Moscow: NAURR, 2016. 157 p.
8. Chirov D.S., Novak K.V. Promising directions for the development of special-purpose robotic complexes // Security issues. 2018. No 2. Pp. 50–59.
9. Kalyaev A.V., Noskov V.P., Chernukhin Yu.V., Kalyaev I.A. Homogeneous control structures of adaptive robots. M.: Nauka, 1990. 147 p.
10. Nakano E. Introduction to robotics. Moscow: Mir, 1988. 334 p.

УДК 355.415.6; 331.45-057.36(045)

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11-12\_168

## ЛЕЧЕБНО-ЭВАКУАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ В ФОРМАТЕ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВОЕННОЙ СЛУЖБЫ

## MEDICAL EVACUATION MEASURES IN THE FORMAT OF THE MILITARY SERVICE SECURITY SYSTEM

*Д-р мед. наук С.А. Цуциев*

*D.Sc. S.A. Tsutsiev*

*ГНИИИ ВМ Минобороны России*

В статье обосновывается необходимость рассмотрения лечебно-эвакуационных мероприятий, проводимых в Вооруженных Силах РФ, в формате системы управления «Безопасность военной службы». Раненые (пораженные) военнослужащие, попавшие на этапы медицинской эвакуации, законодательно сохраняют статус «исполняющие служебные обязанности» и, следовательно, наравне со здоровыми, выполняющими боевую задачу, также обладают юридическим правом, в частности, на безопасные условия военной службы, которые командование воинской части обязано им предоставить. Поэтому, планируя лечебно-эвакуационные мероприятия, необходимо их рассматривать как опасный фактор военной службы, обуславливающий целый пакет соответствующих рисков повреждения здоровья. Однако лечебно-эвакуационные мероприятия до сих пор планируются по-прежнему, без учета требований безопасности, законодательно закрепленных, что, в принципе, недопустимо.

**Ключевые слова:** лечебно-эвакуационные мероприятия, безопасность военной службы, этапы медицинской эвакуации, опасности, профессиональные риски.

The article substantiates the need to consider medical evacuation measures carried out in the Armed Forces of the Russian Federation in the format of the management system «Security of military service». Wounded (stricken) military personnel who have entered the stages of medical evacuation legally retain the status of «performing official duties» and, therefore, on an equal basis with healthy ones performing a combat mission, they also have a legal right, in particular, to safe conditions of military service, which the command of a military unit is obliged to provide them. Therefore, when planning medical evacuation measures, it is necessary to consider them as a dangerous factor of military service, which causes a whole package of relevant risks of damage to health. However, medical evacuation measures are still planned as before without taking into account the safety requirements that are legally fixed, which, in principle, is unacceptable.

**Keyword:** medical evacuation measures, safety of military service, stages of medical evacuation, hazards, occupational risks.

### Введение

Настоящая статья является логическим продолжением серии публикаций, ранее посвящен-

ных анализу отдельных составляющих элементов системы медицинского обеспечения войск в формате действующей модели системы управления безопасностью военной службы (далее:

БВС) [1–3]. Главным образом это касалось контрольной (надзорной) функции за здоровыми военнослужащими Вооруженных сил (далее: ВС) РФ, исполняющими должностные и специальные обязанности применительно к конкретному рабочему месту.

Касаемо лечебно-эвакуационных мероприятий (далее: ЛЭМ), то на наш взгляд здесь имеет место внутреннее противоречие, суть которого заключается в том, что они (ЛЭМ), с одной стороны, распространяются на раненых (пораженных) военнослужащих, которые, в принципе, не в состоянии в полном объеме (в зависимости от тяжести нанесенного повреждения здоровья) выполнять как должностные, так и специальные обязанности, а с другой стороны — эти военнослужащие, несмотря на названное выше обстоятельство, в соответствии с Уставом [4, ст. 8], обладают юридическим статусом — «исполняющие служебные обязанности», как лица, находящиеся на лечении, а также при следовании к месту лечения и обратно, со всеми вытекающими последствиями. В первую очередь имеется в виду право на безопасные условия военной службы, которые командование обязано им не только создать, но и систематически контролировать, добиваясь поддержания их в рабочем состоянии. Обращаем внимание на важность этого положения: военнослужащий считается исполняющим служебные обязанности, например, в случаях участия в боевых действиях, несения боевого дежурства (службы), службы в гарнизонном наряде, в составе суточного наряда, исполнения должностных обязанностей и др.

И еще одно обстоятельство, важное для нас: по приказу командира (начальника) военнослужащий, при необходимости, обязан приступить к исполнению обязанностей военной службы в любое время [4, ст. 8]. Полагаем, что в формате рассматриваемой проблемы это требование означает только одно: наличие ранения (поражения) не является для военнослужащего безусловным основанием для отказа выполнять приказ командира выполнять боевую задачу и убыть из зоны боевого соприкосновения.

Цель исследования. Предоставление свидетельств актуализации ЛЭМ под влиянием действующей модели системы управления БВС.

Материал и методы исследования. Были проанализированы руководящие документы

РФ, Минобороны России по вопросам БВС, организации медицинского обеспечения войск, в частности, ЛЭМ в мирное и военное время.

Использованные методы: научного анализа и сопоставления.

Результаты исследования. Несмотря на то, что с момента создания и внедрения в ВС РФ системы обеспечения БВС прошло порядка тридцати лет, в вопросах организации и проведения ЛЭМ соответствующих изменений как в мирное, так и военное время не произошло: деятельность медицинской службы в этом направлении, в частности, происходит без учета требований Концепции БВС, что, на наш взгляд, негативно сказывается на результативности проводимых мероприятий, так как многие опасности военной службы и соответствующие им риски повреждения здоровья остаются вне «поля зрения» органов военного управления.

Обсуждение. Как известно, единоначалие является, пожалуй, одним из основных принципов военного строительства, определяющим организацию взаимодействия между военнослужащими. Реализация этого принципа наделяет командира (начальника) всей полнотой распорядительной власти в отношении подчиненных и возлагает на него персональную ответственность перед государством за все стороны жизнедеятельности личного состава [4, с. 33], хотя зачастую фактическим их исполнителем являются совершенно другие должностные лица (начальники служб и др.). Так, например, на медицинскую службу возложено решение вопросов организации и проведения ЛЭМ в войсках как в мирное, так и в военное время, как составной части (элемента) медицинского обеспечения войск.

Анализ руководящих документов Министерства обороны (далее: Минобороны) РФ показал, что в настоящее время в основе управления деятельностью медицинской службы воинской части заложен преимущественно так называемый «функциональный» подход, который позволяет добиться неплохих результатов, но преимущественно в пределах структурного подразделения, так как интересы иных служб, структурных подразделений, а также воинской части в целом отодвигаются на второй план. Это ведет к функциональной разобщенности (обособленности) отделов (служб), укреплению вертикальных связей и ослаблению горизонтальных. Казалось

бы: все решают одну задачу, но все делают это по-разному, так как цели и задачи у всех разные. Это логично вытекает из вопросов целеполагания: целью планирования работы медицинской службы по-прежнему является качественное и своевременное выполнение задач, стоящих перед медицинской службой за календарный период [5, п. 25], то есть имеет место исключительно «функционально-индивидуальное» планирование, направленное на решение конкретной задачи медицинской службы, а именно — сохранение жизни и здоровья военнослужащих. Логично, что вся полнота ответственности за результативность ЛЭМ возлагается преимущественно на медицинскую службу во главе с ее начальником, впрочем, равно как и за все медицинское обеспечение личного состава воинской части в целом.

Получив боевую задачу на организацию и проведение лечебно-эвакуационных мероприятий, начальник медицинской службы уточняет сроки проведения боевых действий, направление, задействованные силы (вооружение, живая сила и пр.), характер боевых действий, делает прогноз санитарных потерь, их структуру, маршруты эвакуации, при необходимости запрашивает дополнительные силы и средства у командира части, а также у вышестоящего медицинского начальника и пр.

Проект индивидуального плана начальник медицинской службы согласовывает со всеми заинтересованными должностными лицами (сторонами), но этот аспект планирования в деталях не раскрывается: что, когда и с кем обсуждается и согласовывается, в доступных руководящих документах медицинской службы не уточняется [5]. В целом отличительные признаки изложения рассматриваемой процедуры — безадресность: все как-то само собой делается, так как предполагается, что все знают всё; недосказанность: отсутствие детализации процедуры объясняется ложной очевидностью событий; приблизительность: отсутствие точных и надежных критериев для обоснования тех или иных предложений и др.

Мы обратили внимание, что военных врачей интересуют главным образом клинические вопросы ЛЭМ: объем и виды оказываемой помощи, стратегия и тактика оказания видов медицинской помощи с учетом особенностей поражающих факторов новых видов огнестрельного и др. видов оружия. Разрабатываются схемы реализа-

ции различных этапов медицинской эвакуации. Сама эвакуация рассматривается преимущественно как способ максимально «приблизить» тот или иной вид медицинской помощи более высокого уровня к раненому (пораженному) военнослужащему, например, концепция оказания медицинской помощи раненым с повреждениями опорно-двигательного аппарата: раненым в конечности необходимо оказать комплексную специализированную, в том числе высокотехнологическую медицинскую помощь [6–8].

При этом форма изложения процедуры в документах преимущественно описательно-повествовательная, зачастую не учитывающая особенности тех или иных обстоятельств быстро изменяющейся обстановки военного времени. Как следствие, важнейшие вопросы — организация питания, водообеспечения, временного размещения, обогрева и пр. раненых (пораженных) — рассматриваются, на наш взгляд, недостаточно предметно, как очевидные, пожалуй, второстепенные вещи. Миротворческие операции последних лет наших ВС в странах с жарким климатом и горно-пустынным ландшафтом — яркое тому доказательство: например, отсутствие стабильного водоснабжения доброкачественной водой в достаточном количестве стремительно оказывает негативное воздействие в равной степени на весь личный состав этапа медицинской эвакуации (ЭМЭ) — и на раненых (пораженных), и на медицинский персонал; на приготовление пищи, и на приготовление лекарственных препаратов; на мытье рук хирурга, и на мытье столово-кухонной посуды и пр. Другой пример: резкий суточный (день-ночь) температурный градиент воздуха, окружающих предметов — практически полностью исключает пребывание человека (и раненого, и медицинский персонал) в помещении без средств коррекции параметров микроклимата. Состояние дорог (маршруты движения) зачастую оценивается как безупречное, транспорт исправен и из строя не выходит, топливо не заканчивается, медицинский и иной обслуживающий персонал риску гибели, увечья и пр. не подвержены, они не устают, имеют хорошее и стабильно-позитивное настроение и пр.

Все перечисленное постоянно окружает раненого (пораженного) на каждом ЭМЭ, на путях эвакуации, зачастую сводя на нет всю ранее

проделанную работу по оказанию различных видов медицинской помощи (особенно хирургической). Однако знать специфику ЛЭМ мало: задача заключается в том, что все эти «узкие места» надлежит с помощью определенных критериев вычленивать, учесть, оценить и в дальнейшем реализовывать при планировании.

Система управления БВС предлагает в качестве критерия принять опасные факторы военной службы (вызывают гибель военнослужащего или его увечье с трудопотерями) [4, 9–10]. Полагаем, этого недостаточно. Предлагаем «риск-ориентированный» подход, учитывающий все опасности и соответствующие им риски повреждения здоровья [11]. Необходимо тщательно проанализировать всю деятельность по организации и проведению ЛЭМ, вычленивать и учесть все, что негативно влияет на их проведение и обуславливает соответствующие риски повреждения здоровья раненым (пораженным) военнослужащим. Риски надлежит оценить на предмет вероятности их реализации и тяжести проявления, выделив допустимые и недопустимые. Как итог, мы имеем не «приблизительное» планирование, а четко сформулированный план ЛЭМ, основанный на системе управления рисками повреждения здоровья раненых (пораженных) военнослужащих на ЭМЭ. Такой подход предполагает применение, так называемого, «проактивного» метода управления, предполагающего недопущение реализации (профилактика) нежелательных событий. Характерной чертой современной системы ЛЭМ, на наш взгляд, до сих пор является применение преимущественно так называемого «реактивного» метода управления. Имеет место исключительно устранение последствий неадекватно протекающего процесса, когда проведение упреждающих мероприятий практически невозможно. Это свидетельствует об отсутствии точных и надежных критериев оценки обстановки, позволяющих заблаговременно принимать управляющие действия.

В настоящее время существуют многочисленные экспериментальные данные о величине и структуре санитарных потерь при применении различного типа огнестрельного и других видов оружия, которые, как правило, имеют статус «ограниченный доступ». Официальной методики по расчету вероятности и тяжести нанесения повреждений личному составу пока нет, равно

как и методики расчета потребности в силах и средствах для проведения ЛЭМ. Представление о характере ЛЭМ, максимально приближенных к реальным событиям военного времени, дает анализ результатов масштабных террористических актов с применением взрывных устройств, обычных средств поражения: порядка 71 % (от общего числа пострадавших) составили санитарные потери; из них было госпитализировано около 76 %.

Все исследователи отмечают следующий интересный факт: если количество пострадавших, нуждающихся в госпитализации, находилось в пределах 50 человек, то привлекаемый для эвакуации санитарный автотранспорт успевал выполнить 2 и более рейсов для доставки пострадавших в лечебно-профилактические учреждения. Если количество нуждающихся в госпитализации достигало 100 человек и более, то для эвакуации нуждающихся в стационарном лечении требуется, как правило, минимум 50–60 санитарных автомобилей. По меркам военного времени это очень много. Невозможно даже предположить скопление на переднем крае хотя бы половины от такого количества санитарного транспорта, так как последствия будут, безусловно, очевидны. И это также следует рассматривать как опасность военной службы.

По данным МЧС, самым популярным транспортом является санитарный автотранспорт: на него приходится в среднем порядка 76 % от всех эвакуированных пострадавших. Далее следует воздушный транспорт — порядка 23 %, соответственно. Оставшиеся примерно 1 % пострадавших были эвакуированы всеми прочими видами транспорта.

Однако исследователи этой проблемы едины в понимании того бесспорного факта, что все приведенные расчеты и полученные результаты нельзя возводить в категорию догмы: их можно использовать только для понимания тенденций в развитии ситуаций, аналогичных ранее изученным и описанным. В реальности динамика событий может неожиданно и многократно меняться в любую сторону. Тем не менее необходимо учитывать максимально полные сведения о факторах военной службы, реализуемых в предстоящих событиях с высокой вероятностью.

Проанализируем в качестве примера данные о частоте применения транспорта в качестве

средства эвакуации. Если их рассматривать так, как они представлены, то невольно напрашивается вывод о высокой надежности автомобильного и воздушного транспорта, все остальные — малопригодны в силу разных причин. На наш взгляд, это не совсем так. Применение того или иного транспорта зависит от многих условий: во-первых, его достаточность; во-вторых, наличие развитой системы автомобильного (или иного) сервиса (ремонт, техническое обслуживание, ГСМ и пр.), в-третьих, состояние дорог (автомобильный транспорт): развитость, характер и состояние покрытия и пр.; в-четвертых, развитость инфраструктуры, предполагающая относительно небольшие перемещения (высокий оборот) и пр. Особенности региона имеют значение: плотность населения, ландшафт (горно-пустынная местность), количество осадков, гидрологические особенности и пр.

Кроме того, не будем забывать: сам транспорт является источником опасностей, которые имеют свойство под влиянием фактов окружающей среды значительно усиливаться, например, шум, вибрации (при пробуксовке и пр.), толчки (разбитые дороги и др.).

Таким образом, ЛЭМ в общепринятом формате рассматриваются как система эшелонированного оказания медицинской помощи раненым (пораженным) в процессе их поступательного движения из мест нанесения повреждений (поле боя и пр.) в соответствующие лечебные учреждения. Предлагаемые к реализации лечебные и эвакуационные мероприятия, на наш взгляд, как правило, не имеют должного обоснования. Однако этот вывод касается преимущественно передовых ЭМЭ, где разобраться в фактической обстановке очень непросто.

Касаемо тыловых ЭМЭ, ситуация совершенно иная: например, разработанная и внедренная Концепция оказания медицинской помощи раненым с повреждениями опорно-двигательного аппарата имеет весьма убедительную научную базу: в ее основе лежит 8 принципов, однако отличительным признаком которых является термин «раннее». Суть концепции заключается в следующем: для оказания раненым в конечности комплексной специализированной, в том числе высокотехнологической, медицинской помощи необходимо создать условия для раннего оказания специализированной медицинской по-

мощи на передовых ЭМЭ, а также раннее применение авиационного медицинского транспорта в центральные военно-медицинские организации (ВМО), минуя промежуточные этапы [6–8]. Таким образом, мы снова вернулись к передовым ЭМЭ, без четкой, слаженной, а главное, обоснованной работы на которых невозможны никакие результативные ЛЭМ на тыловых ЭМЭ.

Примерно с середины 90-х годов прошлого столетия в ВС РФ начался процесс разработки и внедрения системы управления БВС, цель которой состоит в формировании новой культуры безопасности ратного труда. Деятельность по созданию в войсках безопасных условий военной службы была объявлена наиболее приоритетным направлением современного военного строительства, определяющим престиж службы в отечественных вооруженных силах.

Нужно признать, что несмотря на пройденные годы, затраченные ресурсы и пр., решительных успехов на этом поприще добиться не удалось: многие положения руководящих документов по БВС продолжают оставаться спорными, а порой — противоречивыми; объекты, субъекты и область изучения и оценки до сих пор являются предметом нестихаемых дискуссий; нередко случаются аварии и пр. Тем не менее введенные требования БВС обусловили ряд концептуальных нововведений, затрагивающих все сферы жизнедеятельности войск. Наиболее важными следует, на наш взгляд, считать следующие требования:

— командир (начальник) воинской части в мирное и военное время отвечает за состояние БВС [4, ст. 93]; в своей служебной деятельности он должен отдавать приоритет сохранению жизни и здоровья подчиненных военнослужащих [4, ст. 81];

— принимать все возможные меры по обеспечению защищенности военнослужащих от воздействия опасных факторов военной службы, предупреждению их гибели (смерти) и увечий (ранений, травм, контузий) [4, ст. 81];

— реализуемые командиром (начальником) решения по обеспечению БВС не должны приводить к срыву выполнения боевой задачи [4, ст. 81];

— начальник службы обязан при планировании мероприятий повседневной деятельности уточнять опасные факторы военной службы, ко-

торые могут при этом возникнуть, и определять меры по их ограничению (нейтрализации), обеспечивать создание безопасных условий военной службы на каждом месте исполнения должностных, специальных обязанностей [4, ст. 320]; руководить проведением мероприятий по обеспечению безопасности военной службы в подчиненных подразделениях и службе [4, ст. 113].

Обращаем внимание: перечисленные требования, являются юридически обязательными для реализации в любой воинской части, применительно к деятельности любого командира (начальника), при планировании любых видов деятельности. Тем не менее изучение и тщательный анализ нормативных, правовых и иных актов Минобороны России, регулирующих вопросы медицинского обеспечения войск, показали, что как на документарном уровне, так в прикладном отношении кардинальных изменений в организации и проведении ЛЭМ, в связи с внедрением системы управления БВС, не произошло. На наш взгляд, ситуация должна в корне измениться.

ЛЭМ, будучи элементом системы управления БВС, перестают быть преимущественно «индивидуальным» делом медицинской службы; они становятся частью (элементом) общего дела, возглавляемого органом военного управления воинской части во главе с ее командиром, по созданию безопасных условий военной службы.

Несомненно, многие вопросы организации ЛЭМ далеко выходят за пределы компетенции должностных лиц — военных врачей. Полагаем, что руководителям немедицинских военных специальностей, в силу определенных обстоятельств, гораздо проще решать эти вопросы, например, выделения (ремонта) транспортных средств эвакуации (медицинский, немедицинский, автомобильный на колесном (гусеничном) шасси и пр.), снабжения горюче-смазочными материалами, организации питания, водообеспечения, охраны и обороны и многое другое.

Планирование мероприятий по обеспечению БВС является составной частью общего планирования повседневной деятельности в воинской части (организации) на период обучения (учебный год) и осуществляется совместно с планированием боевой подготовки [4, 9–10]. Логично, что одновременно должны отрабатываться и ЛЭМ.

Нестандартность нового взгляда на ЛЭМ заключается еще в том, что речь идет о создании безопасных условий военной службы не у здоровых представителей военно-медицинской и иных служб, организующих и реализующих ЛЭМ (что разумеется само по себе) на конкретных рабочих местах, а главным образом у раненых (пораженных) военнослужащих, поступивших на ЭМЭ, так как военнослужащие, находящиеся на излечении в лечебных учреждениях Минобороны России, а также в пути следования (туда и обратно), юридически считаются лицами, «исполняющими служебные обязанности» и, следовательно, обладающими правами на законодательно установленные социальные льготы и компенсации, в том числе и на создание безопасных условий военной службы.

Целью ЛЭМ должно стать не сохранение жизни и здоровья раненых (пораженных) военнослужащих на ЭМЭ (как это сейчас считается), а обеспечение защищенности от воздействия опасных факторов военной службы.

Следует признать, что не все раненые (пораженные) военнослужащие, попавшие на ЭМЭ, благополучно добиваются до установленного места назначения (лечебное учреждение), выздоравливают и возвращаются в строй. Случается, как это печально ни звучит, и иной (драматичный) сценарий развития событий. Полагаем, что причина кроется, преимущественно, не в допущенных медицинской службой промахах и врачебных ошибках: все дело в несовершенстве ныне действующей системы обнаружения неблагоприятных факторов военной службы (опасностей), оказывающих негативное влияние на жизнь раненых (пораженных) военнослужащих на ЭМЭ. Многие аспекты остаются вне поля зрения органов военного управления. Предлагаемый к реализации «риск-ориентированный» подход заключается в системном анализе всех объектов, субъектов, событий, окружающих ЭМЭ, в качестве потенциальных опасностей, представляющих угрозу жизни раненых (пораженных) военнослужащих. Обращаем внимание, что идентификацией опасностей должны заниматься все начальники служб (структурных подразделений), в части их касающейся. Соответствующие им риски повреждения здоровья выявляются и оцениваются. Представителем медицинской службы составляется Единый перечень таковых с дифференциацией, при необходимости, по этапам, например, на поле

боя (линии огня, в «красной» зоне и пр.), при медицинской эвакуации, в лечебном учреждении и др. В итоге мы имеем конкретный план ЛЭМ, основанный на выявленных опасностях и соответствующих им профессиональных рисках повреждения здоровья военнослужащих (гибель, увечье).

В основе управления ЛЭМ должны быть заложены «системный» и «процессный» подходы, позволяющие преодолеть функциональную разобщенность различных служб и структурных подразделений воинской части, превращая ЛЭМ в единый процесс (поток) по недопущению «превращения» раненого (пораженного) военнослужащего в погибшего на ЭМЭ. В целом должен применяться так называемый «проактивный» метод управления, позволяющий работать на опережение и не допускать реализации недопустимых рисков.

Планируемые ЛЭМ не должны препятствовать выполнению поставленной боевой задачи. При кажущейся необычности этого тезиса иначе и быть не может: воинская дисциплина обязывает каждого военнослужащего беспрекословно выполнять поставленные задачи в любых условиях, в том числе с риском для жизни, стойко переносить трудности военной службы [4, 9–10]. Это требование наполняет особым смыслом любую деятельность в ВС. Применительно к рассматриваемой проблеме — дается четкий ответ на непростой вопрос: является ли наличие у военнослужащего раны (травмы и пр.) безусловным показанием для прекращения выполнения боевой задачи, покидания поля боя и перемещения на ЭМЭ. Безвозвратных потерь личного состава не избежать — это невозможно, но каждый факт гибели или увечья должен быть, насколько это возможно, случаем допустимого риска.

### Заключение

Проведенное исследование показало, что планирование и реализация ЛЭМ в ВС РФ до сих пор осуществляется без учета требований БВС, что считаем концептуально неверным. Актуализация руководящих документов, регламентирующих ЛЭМ, на наш взгляд, меняет смысл этой непростой процедуры: пребывание раненого (пораженного) военнослужащего на ЭМЭ, на наш взгляд, следует рассматривать не как локальное (частное) мероприятие, организуемое и проводимое преимущественно медицинской службой, по

его эвакуации с места нанесения повреждения в лечебное учреждение для последующего лечения и выздоровления (насколько это возможно), а как комплексный широкомасштабный процесс, возглавляемый органом военного управления во главе с командиром воинской части, по выявлению опасностей и соответствующих им рисков повреждения здоровья для обоснования разработки и реализации предупреждающих (корректирующих) действий по недопущению «превращения» раненого (пораженного) военнослужащего в погибшего на ЭМЭ.

Происходит трансформация смысла ЛЭМ: имеет место замена представления о ЛЭМ как о процессе «рафинированного» лечения с полным отстранением (эвакуацией) раненого (пораженного) от условий боевой обстановки в глубокий тыл (например, спасатели МЧС), на формат процесса обеспечения защищенности раненых (пораженных) военнослужащих от воздействия опасных факторов военной службы в рамках системы управления БВС, с готовностью выполнить, при необходимости, поставленную боевую задачу.

Наличие ранения (поражения) и отсутствие личного оружия делает военнослужащих на ЭМЭ особо уязвимыми перед опасностями военной службы. Поэтому все мероприятия по планированию ЛЭМ в формате системы управления БВС должны осуществляться с особой тщательностью, комплексно, по согласованию со всеми службами и иными структурными подразделениями, задействованными в этом мероприятии, которые предоставляют свои предложения по выявленным ими опасностям и профессиональным рискам повреждения здоровья для раненых (пораженных) на ЭМЭ.

### Список источников

1. Цуциев С.А., Юдин А.Б. Гигиенический контроль за условиями военного труда в формате системы обеспечения безопасности военной службы // Вестник Академии военных наук. 2023. № 2 (83). С. 118–125.
2. Цуциев С.А. Медицинский контроль за военно-профессиональной деятельностью войск: состояние и перспективы // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 9–10 (183–184). С. 27–33.

3. Цуциев С.А. Концептуальные предложения по совершенствованию контрольной (надзорной) деятельности медицинской службы в Вооруженных Силах Российской Федерации // Электронное научное издание Военное право. 2023. № 6 (82). С. 55–64.

4. Указ Президента РФ от 10.11.2007 № 1495 «Об утверждении общевоинских уставов ВС РФ».

5. Руководство по медицинскому обеспечению Вооруженных Сил РФ на мирное время, 2017 г. 39 с.

6. Тришкин Д.В., Крюков Е.В., Чуприна А.П. и др. Эволюция концепции оказания медицинской помощи раненым и пострадавшим с повреждениями опорно-двигательного аппарата // Военно-медицинский журнал. 2020. Т. 341. № 2. С. 4–11.

7. Тришкин Д.В. Итоги деятельности медицинской службы Вооруженных Сил Российской Федерации в 2023 году и задачи на 2024 год // Военно-медицинский журнал. 2024. Т. 345. № 1. С. 4–21.

8. Крюков Е.В., Давыдов Д.В., Хоминец В.В. и др. Этапное лечение раненых с повреждениями опорно-двигательной системы в современном вооруженном конфликте // Военно-медицинский журнал. 2023. Т. 344. № 3. С. 4–14.

9. Приказ Министра обороны РФ от 22 июля 2015 г. № 444 «Об утверждении Руководства по обеспечению безопасности военной службы в ВС РФ».

10. Методические рекомендации по организации и выполнению мероприятий повседневной деятельности в соединениях и воинских частях Вооруженных сил РФ. Служба войск и обеспечение безопасности военной службы / Для изучения и применения в соответствии с указанием первого заместителя Министра обороны РФ от 20.12.2018. № 205/2/585.

11. Цуциев С.А. Безопасность военной службы в формате «риск-ориентированного» подхода // Военная мысль. 2022. № 6. С. 99–105.

## References

1. Tsutsiev S.A., Yudin A.B. Hygienic control over military working conditions in the format of

military service security system // Vestnik akademii voennyh nauk. 2023. Vol. 2. No 83. Pp. 118–125.

2. Tsutsiev S.A. Medical control over professional military activities of troops: current state and trends // Voprosy oboronnoj tehniki. Seriya 16: Tehnicheskie sredstva protivodejstvija terrorizmu. 2023. No 9–10 (183–184). Pp. 27–33.

3. Tsutsiev S.A. Conceptual proposals for improving the control (supervisory) activities of the medical service in the Armed Forces of the Russian Federation // Jelektronnoe nauchnoe izdanie Voennoe pravo. 2023. No 6 (82). Pp. 55–64.

4. RF Presidential Edict No 1495 of 10 November 2007 «On approval of the Russian Armed Forces' Basic Military regulations».

5. Manual of medical support for the Russian Armed Forces in peacetime. 2017. 39 p.

6. Trishkin D.V., Krjukov E.V., Chuprina A.P. et al. The evolution of the concept of medical care for the wounded and injured with injuries of the musculoskeletal system // Voennno-medicinskij zhurnal. 2020. Vol 341. No 2. Pp. 4–11.

7. Trishkin D.V. Results of the medical service activities of the Armed Forces of the Russian Federation in 2023 and goals for 2024 // Voennno-medicinskij zhurnal. 2024. Vol. 345. No 1. Pp. 4–21.

8. Krjukov E.V., Davydov D.V., Hominec V.V. et al. Staged treatment of the wounded with injuries of the musculoskeletal systems in modern armed conflict // Voennno-medicinskij zhurnal. 2023. Vol. 344. No 3. Pp. 4–14.

9. The Russian Federation Ministry of Defense's Order No 444 of 22 July 2015 «On approval of the military service security regulations in the Russian Armed Forces».

10. The methodology recommendations on the organization and implementation of the Russian Army units' daily activities. Troop service and military service security assurance / for the purpose of studying and applying under provisions of the First Deputy Defense Minister of the Russian Federation dated 20 December 2018. No 205/2/585.

11. Tsutsiev S.A. Military service security in a format of the «risk-oriented approach» // Voennaya mysl'. 2022. No 6. Pp. 99–105.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ГЕОПОЛИТИКА И ОБОРОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

*Петров Д.М., Бирюков А.Н., Гаврилов А.В., Петлик С.С.* Методика определения объема внутренних ресурсов организации требуемых для обеспечения выпуска топографо-геодезической и картографической продукции в условиях риска.....3

*Фокина С.И., Выволокина А.В.* Оценка качества работы сотрудника департамента информационных технологий промышленного предприятия при обеспечении информационной безопасности.....9

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, РАСЧЕТЫ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

*Тимошенко А.В., Захаров А.С., Ходатаев Н.А., Байкалов И.А.* Применение метода средне-дисперсионного анализа вариантов модернизации радиолокационной станции мониторинга космического пространства в нечетких множествах ..... 14

*Чуднов А.М.* Комментарии к статье Н.Н. Плотникова, А.В. Войнова и А.Н. Путилина «Выбор алгоритма адаптации по рабочей частоте в однополосной радиолнии тропосферной связи» .....20

*Меделяев И.А., Макаров Д.В., Шопик М.С.* Разработка программного модуля, реализующего методику идентификации неисправностей силовых трансформаторов .....31

*Минаков Е.П., Александров М.А., Мищеряков А.В., Зубачев А.М.* Модель определения времен пролетов космических аппаратов дистанционного зондирования земли, движущихся по круговым орбитам над зоной экстренного оповещения населения.....38

*Чернышов М.В., Савелова К.Э.* Тройные конфигурации ударных и взрывных волн с равенством скоростных напоров за падающей, отраженной волнами и в набегающем потоке.....49

*Барабанов О.О., Барабанова Л.П.* Новый эффективный алгоритм артиллерийской звуковой разведки .....57

*Михайлов А.А., Козлов С.А.* Оценка эффективности использования боеприпасов с готовыми поражающими элементами .....64

*Васильева С.Н., Гук И.В.* Ударная труба — инструмент изучения ударно-волновых процессов. Обзор .....71

*Загер И.Б., Петров Д.А., Панкратов В.А., Шафир Р.С.* Оценка показателей надежности при проектировании сложных радиоэлектронных систем на основе имитационного моделирования.....83

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ТЕРРОРИЗМУ

*Курков С.Н., Искоркин Д.В., Моргунов Д.В.* Модель определения вероятностей нахождения боевого охранения автоколонны в состояниях противодействия с диверсионно-разведывательной группой.....92

*Гусейнов О.А. оглы.* Оптимизация издержек разведывательной деятельности группы БПЛА .....99

*Седнев В.А., Лысенко И.А., Кошечкина Е.И., Седнев А.В.* Пути совершенствования организации защиты объектов системы управления ..... 104

*Маслаков П.А., Гриднев М.В., Агеев Ф.И.* Помехоустойчивость системы цифрового спутникового телевизионного вещания с обратным каналом в условиях воздействия непреднамеренных нестационарных помех ..... 112

*Пучков А.С., Спивак А.И., Печеник Р.А., Котова А.А.* Некоторые актуальные вопросы совершенствования средств защиты органов таза из состава боевой индивидуальной экипировки..... 121

## ВООРУЖЕНИЕ, ВОЕННАЯ И СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

*Гханем Ф.Н., Эдигаров В.Р.* Адаптивное управление элементами системы охлаждения дизельного двигателя многоцелевых гусеничных машин..... 135

## МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНОЛОГИИ И ИССЛЕДОВАНИЯ

*Пучков А.С., Спивак А.И., Васильева С.Н., Фроленков Ю.А.* Некоторые особенности уничтожения отказавших артиллерийских снарядов с использованием инженерных кумулятивных зарядов ..... 143

*Андрюшкин А.Ю., Булыгин В.В., Чжэньнин Ли.* Экспериментальная оценка механических свойств напыленных на алюминиевую основу многослойных полимерных покрытий техники специального назначения ..... 152

## СООБЩЕНИЯ

*Рахимжанов Н.Е.* Пути совершенствования боевых роботов..... 161

*Цуциев С.А.* Лечебно-эвакуационные мероприятия в формате системы обеспечения безопасности военной службы ..... 168

## СПИСОК АВТОРОВ СТАТЕЙ

**Агеев Фёдор Иванович**, преподаватель кафедры «Систем и средств радиоэлектронной борьбы», Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7(911) 945-43-80.

**Александров Максим Андреевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7(961) 609-24-22. E-mail: vka@mail.ru

**Андрюшкин Александр Юрьевич**, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой А2 «Технологии конструкционных материалов и производства ракетно-космической техники» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Тел.: +7(921) 634-14-80. E-mail: Sascha1a@mail.ru

**Байкалов Иван Андреевич**, студент, кафедре системного инжиниринга, ВШСИ МФТИ. Тел.: +7(903) 517-42-11. E-mail: bajekalov.i@yandex.ru

**Барabanов Олег Олегович**, канд. физ.-мат. наук, доцент, пенсионер. Тел.: +7(910) 773-37-23. E-mail: barabanovoo@yandex.ru

**Барabanова Любовь Петровна**, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры, КГТА им. Дегтярева. Тел.: +7(915) 758-73-48. E-mail: lpbarabanowa@yandex.ru

**Бирюков Александр Николаевич**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры, Военный институт (инженерно-технический) ВА МТО им. А.В. Хрулева. Тел.: +7(921) 751-67-52. E-mail: aleks\_bir@mail.ru

**Булыгин Владимир Вячеславович**, аспирант, кафедра А2 «Технологии конструкционных материалов и производства ракетно-космической техники» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Тел.: +7(911) 681-90-91. E-mail: skaevod3000@gmail.com

**Васильева Светлана Николаевна**, младший научный сотрудник научно-исследовательского института специальных материалов АО «НПО Спецматериалов». Тел.: +7(812) 542-87-70, доб. 2268. E-mail: VasilyevaSN@npo-sm.ru

**Выволокина Альбина Витальевна**, студент, Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет. E-mail: albina.vyvolokina@mail.ru

**Гаврилов Алексей Витальевич**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры, Военно-

космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7(911) 083-68-54. E-mail: alepiter@mail.ru

**Гриднев Михаил Владимирович**, канд. воен. наук, преподаватель кафедры «Космических радиотехнических систем» Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7(812) 347-95-32.

**Гук Игорь Владимирович**, канд. техн. наук, заместитель директора научно-исследовательского института специальных материалов АО «НПО Спецматериалов». Тел.: +7(812) 542-87-70, доб. 2364. E-mail: guk@npo-sm.ru

**Гусейнов Омар Анар оглы**, докторант, Национальное Аэрокосмическое Агентство (г. Баку). Тел.: +9(9450) 324-72-40. E-mail: Omer.huseynov.77@mail.ru

**Гханем Ферас Назевич**, адъюнкт кафедры Омский автобронетанковый инженерный институт (филиал) ВА МТО им. А.В. Хрулева. E-mail: ferasghanem6@gmail.com

**Загер Игорь Борисович**, канд. техн. наук, заместитель начальника кафедры, ВКС ВУЦ при МГУ им. М.В. Ломоносова. E-mail: vucmsu@vucmsu.ru

**Захаров Александр Сергеевич**, инженер отдела АО «НПО дальней радиолокации». Тел.: +7(910) 467-00-87. E-mail: zakharov.as17@physics.msu.ru

**Зубачев Алексей Михайлович**, канд. техн. наук, заместитель начальника кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7(812) 347-95-58. E-mail: vka@mail.ru

**Искоркин Дмитрий Викторович**, д-р техн. наук, доцент, Военная академия материально-технического обеспечения им. А.В. Хрулева, (филиал г. Пенза). E-mail: antares.75@mail.ru

**Козлов Сергей Александрович**, старший научный сотрудник центра вооружения и индивидуальной бронезащиты, НИИСТ, ФКУ НПО «СТиС» МВД России. Тел.: +7(495) 031-91-10. E-mail: skozlov104@mvd.ru

**Котова Анастасия Андреевна**, инженер научно-исследовательского института специальных материалов АО «НПО Спецматериалов». Тел.: +7(812) 542-87-70, доб. 2322. E-mail: kotova@npo-sm.ru

**Кошечкина Елена Ивановна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры гражданской обороны, защиты населения и территорий, Академия государственной противопожарной службы МЧС России. E-mail: e.i.koshevaya@mail.ru

**Курков Сергей Николаевич**, д-р техн. наук, профессор, Военная академия материально-технического обеспечения им. А.В. Хрулева, (филиал г. Пенза). Тел.: +7(965) 634-13-50. E-mail: doc.kurkov@mail.ru

**Лысенко Игорь Александрович**, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры гражданской обороны, защиты населения и территорий, Академия государственной противопожарной службы МЧС России. E-mail: lisenko70@inbox.ru

**Макаров Дмитрий Владимирович**, д-р техн. наук, Военная академия Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого. Тел.: +7(915) 438-48-00. E-mail: cetre@mail.ru

**Маслаков Павел Андреевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Космические радиотехнические системы», Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7(911) 083-36-89. E-mail: maslakov345@yandex.ru

**Медведев Игорь Алексеевич**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры, Военная академия Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого. Тел.: +7(926) 650-68-83. E-mail: medd\_ia@mail.ru

**Минаков Евгений Петрович**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7(812) 347-95-58. E-mail: vka@mail.ru

**Михайлов Алексей Алексеевич**, научный сотрудник отдела развития инновационных решений, цифровых технологий и программного обеспечения ФКУ «НИЦ «Охрана» Росгвардии. Тел.: +7(917) 528-05-54. E-mail: vh48905@yandex.ru

**Мищеряков Александр Владимирович**, адъюнкт кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7(812) 347-95-58. E-mail: vka@mail.ru

**Моргунов Дмитрий Валерьевич**, адъюнкт, Военная академия материально-технического обеспечения им. А.В. Хрулева, (филиал г. Вольск). Тел.: +7(999) 371-69-75. E-mail: morgan152@mail.ru

**Панкратов Валерий Анатольевич**, лаборант факультета космических исследований МГУ им. М.В. Ломоносова. E-mail: valerqa@gmail.com

**Петлик Степан Сергеевич**, канд. воен. наук, доцент кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7(911) 083-68-54. E-mail: petlik@yandex.ru

**Петров Дмитрий Александрович**, начальник управления АО «ОКБ-Планета». E-mail: petrovda@okbplaneta.ru

**Петров Дмитрий Михайлович**, д-р экон. наук, доцент, профессор кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Тел.: +7(921) 934-06-75. E-mail: pdm64office@mail.ru

**Печеник Руслан Александрович**, канд. техн. наук, научный сотрудник научно-исследовательского института специальных материалов АО «НПО Спецматериалов». Тел.: +7(812) 542-87-70, доб. 2322. E-mail: pechenik@npo-sm.ru

**Пучков Андрей Сергеевич**, директор научно-исследовательского института специальных материалов АО «НПО Спецматериалов». Тел.: +7(812) 542-87-70.

**Рахимжанов Нуржан Есмагулович**, канд. техн. наук, докторант кафедры (боевых гусеничных колесных машин и военных автомобилей), Омский автобронетанковый инженерный институт. Тел.: +7(908) 312-97-72. E-mail: nurjanrakimjanov@mail.ru

**Савелова Карина Эдуардовна**, аспирант кафедры «Плазмогазодинамика и теплотехника», БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Тел.: +7(921) 887-84-19. E-mail: karinkamurz@yandex.ru

**Седнев Алексей Владимирович**, студент, МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alexsei.ss@yandex.ru

**Седнев Владимир Анатольевич**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры гражданской обороны, защиты населения и территорий, Академия государственной противопожарной службы МЧС России. E-mail: sednev70@yandex.ru

**Спивак Александр Иванович**, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского института специальных материалов АО «НПО Спецматериалов». Тел.: +7(812) 291-45-03.

**Тимошенко Александр Васильевич**, д-р техн. наук, профессор Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. Тел.: +7(903) 209-71-16. E-mail: u567ku78@gmail.com

**Фокина София Игоревна**, студент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. E-mail: sofia.fockina@gmail.ru

**Фроленков Юрий Алексеевич**, инженер войсковой части 93268. Тел.: +7(921) 652-71-91.

**Ходатаев Николай Андреевич**, канд. техн. наук, АО «НПО дальней радиолокации». E-mail: nkhadataev@npodar.ru

**Цуциев Сергей Александрович**, д-р мед. наук, старший научный сотрудник «Государственного научно-исследовательского испытательного института военной медицины» Министерства обороны Российской Федерации. Тел.: +7(981) 749-72-25. E-mail: sdsot@yandex.ru

**Чернышов Михаил Викторович**, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Плазмогазодинамика и теплотехника», БГТУ

«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Тел.: +7(921) 862-91-95. E-mail: mvcher@mail.ru

**Чжэньин Ли**, аспирант, кафедра А2 «Технологии конструкционных материалов и производства ракетно-космической техники» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Тел.: +7(999) 007-25-77. E-mail: 2973787410@qq.com

**Чуднов Александр Михайлович**, д-р техн. наук, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного. E-mail: chudnow@yandex.ru

**Шафир Роман Сергеевич**, лаборант факультета космических исследований МГУ им. М.В. Ломоносова. E-mail: romanshafir@mail.ru

**Шопик Максим Сергеевич**, адъюнкт, Военная академия Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого. Тел.: +7(999) 978-59-97. E-mail: mshopik@mail.ru

**Эдигаров Вячеслав Робертович**, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры, Омский автобронетактовый инженерный институт (филиал) ВА МТО им. А.В. Хрулева. Тел.: +7(913) 637-71-16. E-mail: otium@mail.ru

## LIST OF AUTHORS OF ARTICLES

**Ageev Fyodor Ivanovich**, teacher in Voenno-kosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhajskogo. Ph.: +7 (911) 945-43-80.

**Aleksandrov Maksim Andreevich**, Candidate of Sciences, docent in Voenno-kosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhajskogo. E-mail: vka@mail.ru

**Andryushkin Aleksandr Yur'evich**, Candidate of Sciences, docent, Head of the Department in Baltijskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet «VOENMEX» im. D.F. Ustinova. Ph.: +7 (921) 634-14-80. E-mail: Sascha1a@mail.ru

**Bajkalov Ivan Andreevich**, student in MFTI, VShSI. E-mail: bajkalov.i@yandex.ru

**Barabanov Oleg Olegovich**, Candidate of Sciences, docent, pensioner. in Ph.: +7 (910) 773-37-23. E-mail: barabanovoo@yandex.ru

**Barabanova Lyubov' Petrovna**, Candidate of Sciences, docent, docent in KGTA im. Degtyareva. E-mail: lpbarabanowa@yandex.ru

**Biryukov Aleksandr Nikolaevich**, Doctor of Sciences, professor, professor in Voennyj institut (inzhenerno-tekhnicheskij) VA MTO im. A.V. Xruleva. E-mail: aleks\_bir@mail.ru

**Bulygin Vladimir Vyacheslavovich**, graduate student in Baltijskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet «VOENMEX» im. D.F. Ustinova. E-mail: skaevod3000@gmail.com

**Cherny'shov Mixail Viktorovich**, Doctor of Sciences, docent, professor in Baltijskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet «VOENMEX» im. D.F. Ustinova. Ph.: +7 (921) 862-91-95. E-mail: mvcher@mail.ru

**Chudnov Aleksandr Mixajlovich**, Doctor of Sciences, in Voennaya akademiya svyazi im. Marshala Sovetskogo Soyuza S.M. Budennogo. E-mail: chudnow@yandex.ru

**Chzhe'n'nin Li**, graduate student in Baltijskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet «VOENMEX» im. D.F. Ustinova. Ph.: +7 (999) 007-25-77. E-mail: 2973787410@qq.com

**Czuciev Sergej Aleksandrovich**, Doctor of Sciences, Senior Researcher in «Gosudarstvennyj nauchno-issledovatel'skij ispytatel'nyj institut voennoj mediciny» Ministerstva oborony Rossijskoj Federacii. E-mail: sdsot@yandex.ru

**E'digarov Vyacheslav Robertovich**, Candidate of Sciences, Head of the Department of

Engines in Omsk Armored Engineering Institute. E-mail: otuu@mail.ru

**Fokina Sofiya Igorevna**, student in Sankt-Peterburgskij Gosudarstvennyj Morskij Tekhnicheskij Universitet. E-mail: sofia.fockina@gmail.ru

**Frolenkov Yuriy Alekseevich**, engineer in vojskovaya chast 93268. Ph.: +7 (921) 652-71-91.

**Gavrilov Aleksej Vital'evich**, Candidate of Sciences, docent, docent in Voenno-kosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhajskogo. E-mail: alepiter@mail.ru

**Gridnev Mixail Vladimirovich**, Candidate of Sciences, teacher in Voenno-kosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhajskogo. Ph.: +7 (812) 347-95-32.

**Guk Igor' Vladimirovich**, Candidate of Sciences, Deputy Head in AO «NPO Speczmaterialov». Ph.: +7 (812) 542-87-70. E-mail: guk@npo-sm.ru

**Gusejnov Omar Anar ogly'**, doctoral students, Nacional'noe Aerokosmicheskoe Agentstvo (g. Baku). E-mail: Omer.huseynov.77@mail.ru

**Gxanem Feras Nazevich**, Adjunct of the Department of Engines, Omsk Armored Engineering Institute. E-mail: ferasghanem6@gmail.com

**Iskorkin Dmitrij Viktorovich**, Doctor of Sciences, docent, in Voennaya akademiya material'no-tekhnicheskogo obespecheniya im. A.V. Xruleva, (filial g. Penza). Ph.: +7 E-mail: antares.75@mail.ru

**Koshevaya Elena Ivanovna**, Candidate of Sciences, docent, docent in Akademiya gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MChS Rossii. E-mail: e.i.koshevaya@mail.ru

**Kotova Anastasiya Andreevna**, engineer in AO «NPO Speczmaterialov». E-mail: kotova@npo-sm.ru

**Kozlov Sergej Aleksandrovich**, Senior Researcher in FKU NPO «STiS» MVD Rossii. E-mail: skozlov104@mvd.ru

**Kurkov Sergej Nikolaevich**, Doctor of Sciences, professor, in Voennaya akademiya material'no-tekhnicheskogo obespecheniya im. A.V. Xruleva (g. Penza). E-mail: doc.kurkov@mail.ru

**Ly'senko Igor' Aleksandrovich**, Candidate of Sciences, docent, professor in Akademiya gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MChS Rossii. E-mail: lisenko70@inbox.ru

**Makarov Dmitrij Vladimirovich**, Doctor of Sciences, in Voennaya akademiya Raketny`x vojsk strategicheskogo naznacheniya im. Petra Velikogo. Ph.: +7 (915) 438-48-00. E-mail: cetre@mail.ru

**Maslakov Pavel Andreevich**, Candidate of Sciences, docent in Voенno-kosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhajskogo. Ph.: +7 (911) 083-36-89. E-mail: maslakov345@yandex.ru

**Medelyaev Igor` Alekseevich**, Doctor of Sciences, professor, professor in Voennaya akademiya Raketny`x vojsk strategicheskogo naznacheniya im. Petra Velikogo. E-mail: medd\_ia@mail.ru

**Minakov Evgenij Petrovich**, Doctor of Sciences, professor, professor in Voенno-kosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhajskogo. Ph.: +7 (812) 347-95-58. E-mail: vka@mail.ru

**Mishheryakov Aleksandr Vladimirovich**, Adjunct in Voенno-kosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhajskogo. E-mail: vka@mail.ru

**Mixajlov Aleksej Alekseevich**, researcher in FKU «NICz «Oxrana» Rosgvardii. Ph.: +7 (917) 528-05-54. E-mail: vh48905@yandex.ru

**Morgunov Dmitrij Valer`evich**, Adjunct in Voennaya akademiya material`no-tekhnicheskogo obespecheniya im. A.V. Xruleva (filial g. Vol'sk). Ph.: +7 (999) 371-69-75. E-mail: morgan152@mail.ru

**Pankratov Valerij Anatol`evich**, laboratory assistant in Moscow State University. E-mail: valerqa@gmail.com

**Pechenik Ruslan Aleksandrovich**, Candidate of Sciences, Researcher in AO «NPO Speczmaterialov». E-mail: pechenik@npodsm.ru

**Petlik Stepan Sergeevich**, Candidate of Sciences, docent in Voенno-kosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhajskogo. E-mail: petlik@yandex.ru

**Petrov Dmitrij Aleksandrovich**, Head of the department in Joint-Stock Company OKB-Planeta. E-mail: petrovda@okbplaneta.ru

**Petrov Dmitrij Mixajlovich**, Doctor of Sciences, docent, professor in Voенno-kosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhajskogo. Ph.: +7 (921) 934-06-75. E-mail: pdm64office@mail.ru

**Puchkov Andrej Sergeevich**, Director of the Research Institute of Special Materials JSC AO «NPO Speczmaterialov». Ph.: +7 (812) 542-87-70.

**Rakimzhanov Nurzhan Esmagulovich**, Candidate of Sciences, in Omskij avtobronetanko-

vy`j inzhenerny`j institut. Ph.: +7 (908) 312-97-72. E-mail: nurjanrakimjanov@mail.ru

**Savelova Karina Eduardovna**, graduate student in Baltijskij gosudarstvenny`j tekhnicheskij universitet «VOENMEX» im. D.F. Ustinova. Ph.: +7 (921) 887-84-19. E-mail: karinkamurz@yandex.ru

**Sednev Aleksej Vladimirovich**, student in MGTU im. N.E`. Bauman. E-mail: alexsei.ss@yandex.ru

**Sednev Vladimir Anatol`evich**, Doctor of Sciences, professor, professor in Akademiya gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby` MChS Rossii. E-mail: sednev70@yandex.ru

**Shafir Roman Sergeevich**, laboratory assistant, in Moscow State University. E-mail: romanshafir@mail.ru

**Shopik Maksim Sergeevich**, Adjunct in Voennaya akademiya Raketny`x vojsk strategicheskogo naznacheniya im. Petra Velikogo. Ph.: +7 (999) 978-59-97. E-mail: mshopik@mail.ru

**Spivak Aleksandr Ivanovich**, Candidate of Sciences, docent, Senior Researcher in AO «NPO Speczmaterialov». Ph.: +7 (812) 291-45-03.

**Timoshenko Aleksandr Vasil`evich**, Doctor of Sciences, professor in Yaroslavskoye vy`shee voennoe uchilishe protivovozdushnoj oborony`. Ph.: +7 (903) 209-71-16. E-mail: u567ku78@gmail.com

**Vasil`eva Svetlana Nikolaevna**, Junior Researcher in AO «NPO Speczmaterialov». Ph.: +7 (812) 542-87-70. E-mail: VasilyevaSN@npodsm.ru

**Vy`volokina Al`bina Vital`evna**, student in Sankt-Peterburgskij Gosudarstvenny`j Morskoy Tekhnicheskij Universitet. E-mail: albina.vyvolokina@mail.ru

**Xodataev Nikolaj Andreevich**, Candidate of Sciences, in AO «NPO dal`nej radiolokacii». E-mail: nkhadataev@npodar.ru

**Zager Igor` Borisovich**, Candidate of Sciences, Deputy Head of the Department in Moscow State University. E-mail: vucmsu@vucmsu.ru

**Zaxarov Aleksandr Sergeevich**, AO «NPO dal`nej radiolokacii». Ph.: +7 (910) 467-00-87. E-mail: zakharov.as17@physics.msu.ru

**Zubachev Aleksej Mixajlovich**, Candidate of Sciences, Deputy Head in Voенno-kosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhajskogo. Ph.: +7 (812) 347-95-58. E-mail: vka@mail.ru

# ПАМЯТКА АВТОРУ

## по подготовке к публикации научно-технической статьи

### Структура статьи

**1. Аннотация (реферат).** Повествует о содержании работы и показывает, что, по мнению автора, наиболее ценно и применимо в выполненной им работе.

**2. Вводная часть.** Обоснование актуальности темы: важность, особенность, известный вариант решения, недостатки его.

**3. Основная часть.** Описание предлагаемого варианта решения: начальные условия решения задачи, проведение исследования (место исследования, основные данные о предмете исследования), сущность предлагаемого варианта решения, методы (наблюдение, эксперимент, моделирование, расчёт, разработка, конструирование, проектирование, изготовление, методы управления и пр.), технические средства реализации, экспериментальная проверка.

Оценка предлагаемого варианта решения (определение степени новизны результата): особенности предлагаемого варианта решения (преимущества перед аналогами, эквивалентные результаты, недостатки явные, предполагаемые), сведения об авторских свидетельствах и патентах, экономическая, технологическая оценка, внедрения.

Необходимо представить результаты в наглядной форме: в виде таблиц, графиков, диаграмм. Применение математики для объяснения полученных результатов должно быть минимальным (не загромождать текст формулами).

Не следует приводить пространные рассуждения и описания, повторять в тексте подрисовочные подписи при ссылках на рисунки, один и тот же материал представлять в различной форме: в тексте и таблице, в формуле и графике, в таблице и графике и т.п.

**4. Выводы.** Должны показывать, что получено и иметь характер тезисов, не могут быть слишком многочисленными.

**5. Список литературы.** Важно правильно оформить ссылку на источник в списке, указывая при этом фамилии и инициалы авторов, название журнала (монографии), год издания, выпуск (том), номер, страницы. Читатель должен иметь возможность найти указанный источник. Количество источников должно быть не менее 10. Оформление библиографических списков необходимо осуществлять по ГОСТам: ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка». Общие требования правила составления и ГОСТ Р 7.0.12-2011 «Библиографическая запись. Сокращение слов и словосочетаний на русском языке. Общие требования и правила».

### Структура представления материалов для публикации

Авторский оригинал статьи должен в обязательном порядке содержать следующие элементы:

#### На русском и английском языках:

- название статьи;
- индекс УДК;
- фамилия, имя, отчество авторов полностью, ученая степень, место работы, e-mail;
- аннотация — размером 600–800 знаков;
- ключевые слова;
- список литературы, не менее 10 источников.

#### На русском языке:

- основной текст, содержащий в себе формулы, таблицы и иллюстрации.

## Требования к оформлению публикации

**Заголовок статьи набирать исключительно строчными буквами.**

**Текст:** материалы набираются в текстовом редакторе Microsoft Word с расширением **\*.rtf** или **\*.doc**, шрифт Times New Roman Cyr, размер 12, **без стилового оформления.**

Текст должен быть отредактирован, набран без переносов слов, разрядка текста исключается.

**В статье не должно быть** повторов, излишних подробностей, частных деталей, известных положений, **громоздких таблиц и формул**. Следует избегать сокращений. Все имеющиеся в тексте аббревиатуры, сокращения и условные обозначения должны быть расшифрованы.

Не допускается использование сносок, закладок, нумерованных списков (нумерацию пунктов, подразделов). Для заголовков и подзаголовков **запрещается** использовать специальные стили и подчеркивания. Ссылки в тексте на литературу даются в квадратных скобках.

**Таблицы** представляются **без использования сканирования**, цветного фона, размер шрифта — 10 пт (параметры таблицы, ширина × высота, не более 165 × 240 мм).

**Иллюстрации (графики, рисунки)** должны быть черно-белые и выполнены в форматах **\*.jpeg** или **\*.tif** с разрешением не менее 300 dpi для штриховых изображений (схем, чертежей, графиков) и не менее 600 dpi для полутоновых (фотографии и т.п.); иметь линейные размеры не превышающие 165 × 240 мм. Дополнительно каждая иллюстрация прилагается отдельным файлом. В имени файла следует указать порядковый номер иллюстрации.

Все буквенные и цифровые обозначения, приведенные на иллюстрациях, поясняются или в основном тексте, или в 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@npo-sm.ru**

**Плата за публикацию статей с авторов, в том числе с аспирантов не взимается.**

**Материалы, не отвечающие требованиям, не рассматриваются**

ISSN 2306-1456

ПОДПИСКА  
на 2025 год

**ВОПРОСЫ ОБОРОННОЙ ТЕХНИКИ**  
**Серия 16. Технические средства**  
**противодействия терроризму**

Подписной индекс № 41271  
в объединенном каталоге  
«Пресса России»

**НПО Спецматериалов**

195277, г. Санкт-Петербург, Б. Сампсониевский пр., д. 28-а, литера Б

**БАНКОВСКИЕ РЕКВИЗИТЫ**

АО «НПО Спецматериалов»

|                                                      |                 |                             |
|------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------|
| Р/с 40702810900000000547                             | БИК 044030889   | К/счет 30101810400000000889 |
| В ЗАО «Экспортно-импортный банк», г. Санкт-Петербург |                 |                             |
| ИНН 7806125671                                       | Код ОКОНХ 17210 | Код по ОКПО 31041642        |
|                                                      |                 | КПП 780201001               |

СЧЕТ № \*

Дата: «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

| Предмет счета                                                                                  | Кол-во комплектов | Цена одного комплекта (руб.) | Сумма (руб.) |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------|--------------|
| Подписка на журнал<br>«ВОТ. Серия 16»<br>На 2025 год – 6 сдвоенных<br>номеров (январь–декабрь) |                   | 6360-00                      |              |
| НДС 10%                                                                                        |                   | 636,00                       |              |
| Итого с учетом НДС                                                                             |                   | 6996,00                      |              |

Всего к оплате (в т.ч. НДС): шесть тысяч девятьсот девяносто шесть рублей 00 копеек

*\*Счёт на подписку будет выставлен после подачи заявки на эл. почту: [commerce@npo-sm.ru](mailto:commerce@npo-sm.ru)*

Начальник ЦРСИ

Бухгалтер



/В. П. Кныш/

/Г. И. Фёдорова/

**ВНИМАНИЕ!**

В платежном поручении в графе «Назначение платежа» обязательно укажите:

- \* наименование издания в период подписки
- \* номер счета, на основании которого производится оплата
- \* контактный телефон
- \* подробный почтовый адрес, на который будет высылаться журнал

**ОТДЕЛ АДРЕСНОЙ ПОДПИСКИ**

Тел. : (812) 600-75-54  
Факс: (812) 542-75-58  
E-mail: [vot@npo-sm.ru](mailto:vot@npo-sm.ru)

## ДЛЯ ЗАМЕТОК

---

Ответственность за достоверность информации, точность фактов, цифр и цитат, а также за то, что в материалах нет данных, не подлежащих открытой публикации, несут авторы. В соответствии с Законом РФ «О средствах массовой информации» редакция имеет право не вступать в переписку с авторами. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Вопросы оборонной техники» обязательна.

**Вопросы оборонной техники. Серия 16.**  
**Технические средства противодействия терроризму. 2024. Вып. 11–12 (197–198)**

Компьютерная верстка — М.А. Лаурман  
Корректор — Е.А. Красикова, А.К. Райхчин

---

Подписано в печать 05.12.2024  
Формат 60х90 1/8. Печать цифровая.  
Усл. печ. л.  
Тираж 600 экз. Заказ №  
Отпечатано в типографии «Любавич».  
ООО «Первый издательско-полиграфический холдинг»,  
Санкт-Петербург, Б. Сампсониевский пр., 60, лит. «У».  
Тел.: (812) 603 25 25.  
Цена свободная.