



Основан в 2016 году

Выходит 4 раза в год

Научный журнал
Вестник
Университета гражданской защиты
МЧС Беларуси
(Journal of Civil Protection)
Том 10, № 2, 2026

Редакционная коллегия:

главный редактор:

Полевода

Иван Иванович

доктор технических наук,
профессор

зам. главного редактора:

Гончаренко

Игорь Андреевич

доктор физико-математических наук,
профессор

Платонов

Александр Сергеевич

кандидат физико-математических
наук, доцент

Редакционный совет:

Ковтун Вадим Анатольевич, доктор технических наук, профессор – председатель; Богданова Валентина Владимировна, доктор химических наук, профессор – зам. председателя; Акулов Артем Юрьевич, кандидат технических наук (Россия); Байков Валентин Иванович, доктор технических наук, старший научный сотрудник; Барановский Николай Викторович, кандидат физико-математических наук (Россия); Батуро Алексей Николаевич, кандидат технических наук (Россия); Бирюк Виктор Алексеевич, кандидат технических наук, доцент; Бордак Сергей Сергеевич, кандидат военных наук, доцент; Волочко Александр Тихонович, доктор технических наук, профессор; Волянин Ежи, доктор технических наук, профессор (Польша); Иваницкий Александр Григорьевич, кандидат технических наук, доцент; Иванов Юрий Сергеевич, кандидат технических наук; Ильюшонок Александр Васильевич, кандидат физико-математических наук, доцент; Каван Степан, доктор технических наук (Чехия); Калач Андрей Владимирович, доктор химических наук, доцент (Россия); Камлюк Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент; Карпиленя Николай Васильевич, доктор военных наук, профессор; Кремень Маркс Аронович, доктор психологических наук, профессор; Кудряшов Вадим Александрович, кандидат технических наук, доцент; Кузьмицкий Валерий Александрович, доктор физико-математических наук, доцент; Лебедева Наталья Шамильевна, доктор химических наук, доцент (Россия); Мурзич Игорь Константинович, доктор военных наук, профессор; Пасовец Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент; Поздеев Сергей Валерьевич, доктор технических наук, профессор (Украина); Соколов Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор (Россия); Тихонов Максим Михайлович, кандидат технических наук, доцент; Тур Виктор Владимирович, доктор технических наук, профессор; Усеня Владимир Владимирович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик НАН Беларуси; Федюк Роман Сергеевич, доктор технических наук, профессор (Россия); Фурманов Игорь Александрович, доктор психологических наук, профессор; Чень Цзяньго, доктор технических наук, профессор (Китай); Шарипханов Сырым Дюсенгазиевич, доктор технических наук (Казахстан).

Учредитель – Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь»

Решением коллегии Высшей аттестационной комиссии № 18/8 от 9 декабря 2016 г.
журнал включен в перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 1835 от 19 сентября 2016 г.

Журнал включен в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по психологическим, техническим (по научным направлениям – безопасность в чрезвычайных ситуациях; пожарная и промышленная безопасность; гражданская оборона) и военным (по научному направлению – гражданская оборона) наукам.

С декабря 2023 г. журнал включен в российский 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, по 5 научным специальностям отрасли технических наук: 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества, 2.10.1. Пожарная безопасность, 2.10.2. Экологическая безопасность, 2.10.3. Безопасность труда, 3.2.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.

Ответственность за подбор и точность приведенных данных, а также за использование сведений, не подлежащих открытой публикации, несут авторы опубликованных материалов.

Статьи, поступающие для публикации в журнале, рецензируются.

Полная или частичная перепечатка, размножение, воспроизведение или иное использование опубликованных материалов допускаются с обязательной ссылкой на журнал «Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси».

Адрес редакции: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск

Контактные телефоны: +37517 340-53-93 (главный редактор)
+37517 341-32-99

Подписной индекс в РУП «Белпочта»: 00136 (индивидуальная подписка),
001362 (ведомственная подписка).

Сайт Университета гражданской защиты: www.ucsp.by

Email редакции: vestnik@ucsp.by

ISSN 2519-237X (print)

ISSN 2708-017X (online)

© Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы и вещества, применяемые в сфере предупреждения и ликвидации ЧС, производстве техники. Технологии их применения

Камлюк А.Н., Лихоманов А.О. Математическая модель для прогнозирования кратности огнетушащей пены, получаемой в розеточных оросителях 165

Иванов И.Ю., Навроцкий О.Д., Лихоманов А.О., Гараев Ю.В. Натурные испытания огнетушащих составов, подаваемых на тушение путем мелкодисперсного распыления 178

Рева О.В., Врублевский А.В. Закономерности электрокристаллизации твердых сплавов Ni-Co и Ni-Co-P для упрочнения деталей аварийно-спасательного оборудования .. 190

Технологии и программное обеспечение в сфере предупреждения и ликвидации ЧС, промышленной и пожарной безопасности

Камлюк А.Н., Гусаров И.С., Масюк С.А. О режимах генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены..... 204

Шамсудинов Г.Ю., Яровой В.Ю., Михайлова А.К. Применение систем SLAM в беспилотных авиационных комплексах для оценки обстановки при чрезвычайных ситуациях 215

Промышленная безопасность. Повышение надежности технических объектов и оборудования. Охрана труда

Мартыненко Т.М., Смиловенко О.О., Пронкевич С.А., Мартыненко И.М., Лосик С.А. Оценка прочности и устойчивости наружных информационно-рекламных конструкций на основе моделирования в среде ANSYS 226

Шакирова А.И., Антонова И.И., Шагиахметова А.Р., Гумеров Т.Ю. Научное обоснование нутрициологической разработки как элемента системы защиты в чрезвычайных ситуациях 237

Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Экологическая безопасность

Ковтун В.А., Бугай А.Н., Ильючик Е.А. Обеспечение собственной радиационной безопасности в органах пограничной службы путем оптимизации дозовых нагрузок. 257

Сидоренко А.С., Силин Н.В. К вопросу экологической безопасности на электрических подстанциях напряжением 110 кВ и выше 269

Научное обеспечение гражданской защиты

Булва А.Д. Теоретико-методические основы комплексной защиты организаций, подлежащих переводу на работу в условиях военного времени..... 277

Нормативно-правовое и методическое обеспечение деятельности МЧС

Сафонов Р.А., Крысин А.И., Гурьева О.Н. Состояние и перспективы научно-технической поддержки эксплуатации Белорусской атомной электростанции 292

Правила предоставления статей 305

CONTENTS

Materials and substances used for emergency prevention and elimination, as well as equipment production. Application technologies of these materials

Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O. Mathematical model for predicting fire-extinguishing foam expansion rate in deflector type sprinklers 165

Ivanov I.Yu., Navrotskiy O.D., Likhomanov A.O., Garaev Yu.V. Field tests of fire extinguishing compositions delivered for extinguishing by fine spraying. 178

Reva O.V., Vrublevskiy A.V. Electrocrystallization regularities of hard Ni-Co and Ni-Co-P alloys for strengthening of parts of emergency rescue equipment 190

Technologies and software in the sphere of emergency prevention and elimination, industrial and fire safety

Kamlyuk A.N., Gusarov I.S., Masyuk S.A. On bubble generation regimes in a surfactant solution for producing compression foam 204

Shamsudinov G.Yu., Yarovoy V.Yu., Mikhaylova A.K. Using SLAM systems in unmanned aircraft complexes to assess situation in emergencies. 215

Industrial safety. Improving the reliability of technical facilities and equipment. Labor protection

Martynenko T.M., Smilovenko O.O., Pronkevich S.A., Martynenko I.M., Losik S.A. Assessment of strength and stability of external information and advertising structures based on modeling in ANSYS environment 226

Shakirova A.I., Antonova I.I., Shagiakhmetova A.R., Gumerov T.Yu. Scientific justification of nutritional development as an element of the protection system in emergency situations 237

Safety in emergencies. Ecological safety

Kovtun V.A., Bugay A.N., Il'yuchik E.A. Ensuring radiation safety in border service agencies by optimizing radiation doses 257

Sidorenko A.S., Silin N.V. On the issue of environmental safety at electrical substations with a voltage of 110 kV and above 269

Scientific support of civil defense

Bulva A.D. Theoretical and methodological foundations of complex protection of organizations subject to shift working under wartime conditions. 277

Legal and methodic support of the activity of the Ministry of Emergency Situations

Safonov R.A., Krysin A.I., Gur'eva O.N. Status and prospects of scientific and technical support for operation of the Belarusian nuclear power plant. 292

Rules of submitting articles for publication 305

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КРАТНОСТИ ОГНЕТУШАЩЕЙ ПЕНЫ, ПОЛУЧАЕМОЙ В РОЗЕТОЧНЫХ ОРОСИТЕЛЯХ**Камлюк А.Н., Лихоманов А.О.**

Цель. На основе результатов экспериментальных исследований разработать математическую модель для прогнозирования кратности пены с учетом основных параметров процесса пенообразования в оросителях розеточного типа для автоматических установок пожаротушения.

Методы. Общая методология работы предусматривала использование теоретических (анализ, синтез, сравнение) и экспериментальных методов исследования. Кратность пены определялась экспериментальным путем по разработанной методике. Статистический анализ экспериментальных данных и создание математической модели включали регрессионный и корреляционный анализы, а также анализ остатков, в том числе нормальность их распределения с помощью критерия Пирсона.

Результаты. На основе экспериментальных данных разработана математическая модель, позволяющая оценивать кратность пены в зависимости от геометрических параметров оросителя, гидродинамических условий и физико-механических свойств пенообразующего раствора. Структура модели включает безразмерные комплексы, отражающие влияние коэффициента рабочей поверхности розетки K_s , относительной длины дужек L_f/D , относительного диаметра розетки $D/D_{\max}$ и числа капиллярности Ca , что обеспечивает комплексный учет геометрии оросителя и режимных параметров процесса пенообразования. Среднее отклонение расчетных значений кратности пены от экспериментальных составляет 11 %, а максимальное – 27 %. Анализ остатков показал отсутствие систематической зависимости между остатками и прогнозными значениями, а также подтвердил нормальность распределения остатков. Кроме того, выявленные в ходе эксперимента зависимости указывают на сложный характер влияния геометрических параметров оросителя, в частности относительной длины дужек L_f/D , на кратность пены. Наиболее значимый прирост кратности обеспечивается при увеличении числа капиллярности и коэффициента рабочей поверхности розетки, тогда как влияние относительного диаметра розетки носит менее выраженный характер.

Область применения исследований. Проектирование и эксплуатация оросителей розеточного типа для автоматических установок пожаротушения. Предложенная модель позволяет подбирать необходимую конфигурацию процесса пенообразования с учетом применяемого пенообразователя, условий подачи пенообразующего раствора, а также основных геометрических параметров оросителя для получения пены с заданной кратностью.

Ключевые слова: автоматическая установка пожаротушения, ороситель, розетка, кратность пены, математическая модель.

(Поступила в редакцию 12 марта 2026 г.)

Введение

Для тушения пожаров твердых и жидких горючих веществ, не взаимодействующих с водой, применяют воздушно-механическую пену низкой кратности (от 4 до 20), причем в этом диапазоне более высокая кратность, как правило, обеспечивает большую огнетушащую эффективность [1–4]. На практике пену получают с помощью оросителей в автоматических установках пожаротушения, сеток в насадках пожарных стволов или в установках генерирования компрессионной пены. Последние позволяют регулировать подачу воды, пенообразователя и воздуха в реальном времени, тем самым контролируется кратность пены. В отличие от таких установок, в оросителях и насадках пожарных стволов такая возможность отсутствует. В связи с этим устройства пенообразования разделяют на две категории: с регулируемой и нерегулируемой кратностью пены [5].

При возможности регулирования повышения огнетушащей эффективности достигается, например, за счет управления расходом воздуха непосредственно при тушении. В случае применения устройств без возможности регулирования кратности ключевое значение приобретает заблаговременный выбор параметров устройств и средств пожаротушения, что выдвигает на первый план необходимость прогнозирования кратности пены. Для этого требуется использовать модели, учитывающие геометрические особенности применяемых

устройств, гидродинамические параметры подачи раствора пенообразователя и его физико-механические свойства.

Так, с целью прогнозирования значения кратности пены, генерируемой оросителями для автоматических установок пожаротушения, в работе [6] исследована зависимость данной характеристики от геометрических параметров розеточного оросителя, а также параметров, влияющих на процесс образования пены (скорости подачи и свойств раствора пенообразователя). В исследовании использовались оросители с розетками с внешним диаметром от 20 до 400 мм. В итоге предложена математическая модель для прогнозирования кратности пены:

$$K = 0,026\gamma_{e.r} K_s^{0,5} \left(\frac{L_f}{D} \right)^g \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^{-0,05} We^{0,32}, \quad g = \begin{cases} 0,1 & \text{при } L_f / D \leq 3,0; \\ -0,03 & \text{при } 3,0 < L_f / D \leq 7,5, \end{cases} \quad (1)$$

где $\gamma_{e.r}$ – коэффициент для учета свойств пенообразователя;

K_s – коэффициент рабочей поверхности розетки;

L_f – длина дужек;

D – внешний диаметр розетки;

$D_{\max}$ – наибольший диаметр розетки ($D_{\max} = 400$ мм);

We – число Вебера.

Данная модель построена на основе результатов анализа большого массива экспериментальных данных, а значения степеней при безразмерных членах уравнения определены с помощью метода логарифмирования. Таким образом, она учитывает не только соотношение геометрических параметров элементов оросителя, но и гидродинамику процесса генерирования пены с помощью критерия подобия We , а также свойства применяемого пенообразующего раствора через эмпирический коэффициент $\gamma_{e.r}$.

В данной работе описаны результаты исследований, основной целью которых являлось построение аналогичной математической модели для прогнозирования кратности пены, получаемой при использовании оросителей розеточного типа, для учета гидродинамики струи пенообразующего раствора и его свойств применялось число капиллярности Ca – гидродинамический критерий подобия, определяемый по формуле [7; 8]:

$$Ca = \eta v / \sigma, \quad (2)$$

где η – коэффициент динамической вязкости жидкости;

v – средняя скорость потока жидкости;

σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Число капиллярности наряду с числом Бонда или числом Вебера используется для описания гидродинамики изучаемых процессов. Оно позволяет определить характер деформации струй жидкости. При малых значениях Ca поверхностное натяжение жидкости стремится придать струе цилиндрическую форму, разрушая ее на достаточно крупные капли, а при высоких, когда преобладают вязкие силы, происходит интенсивное рассеивание струи на мелкие частички и капли с большей площадью свободной поверхности (рис. 1) [9].

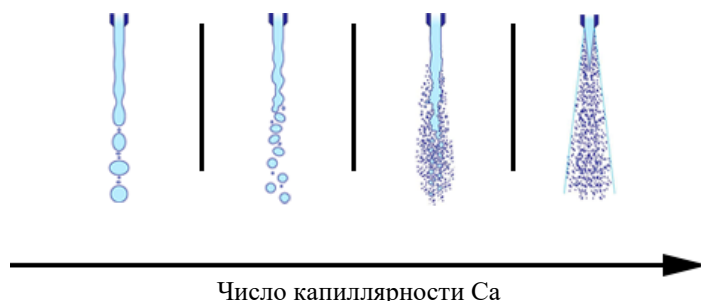
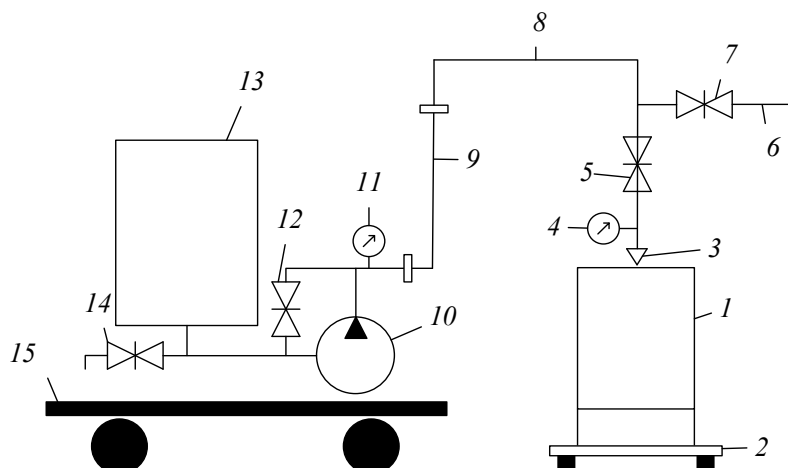


Рисунок 1. – Характер деформации струи жидкости при изменении числа капиллярности

Основная часть

Экспериментальное определение кратности пены. Экспериментальное определение зависимости кратности пены от геометрических параметров розеточного оросителя, гидродинамических параметров и свойств пенообразующего раствора выполнялось на установке, схема которой представлена на рисунке 2.



1 – мерная емкость; 2 – весы; 3 – ороситель; 4, 11 – манометр; 5, 7, 12, 14 – запорный вентиль; 6, 8 – трубопровод; 9 – напорный рукав; 10 – насос; 13 – емкость с рабочим раствором пенообразователя; 15 – каркас установки
Рисунок 2. – Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования процесса образования пены в розеточных оросителях

При проведении экспериментальных исследований использовались штуцеры оросителя с различным диаметром выходного отверстия $d_{\text{вых}}$ (рис. 2), что позволило изменять гидродинамические параметры потока (давление и скорость) на выходе из оросителя при постоянном давлении, создаваемом насосной установкой.

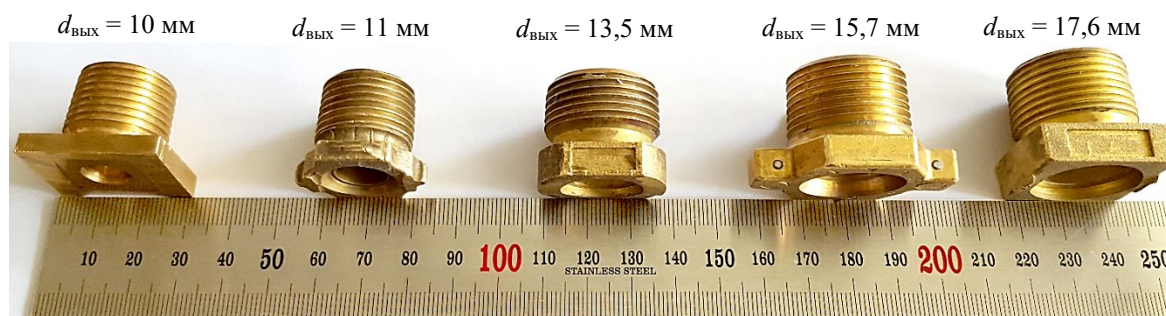


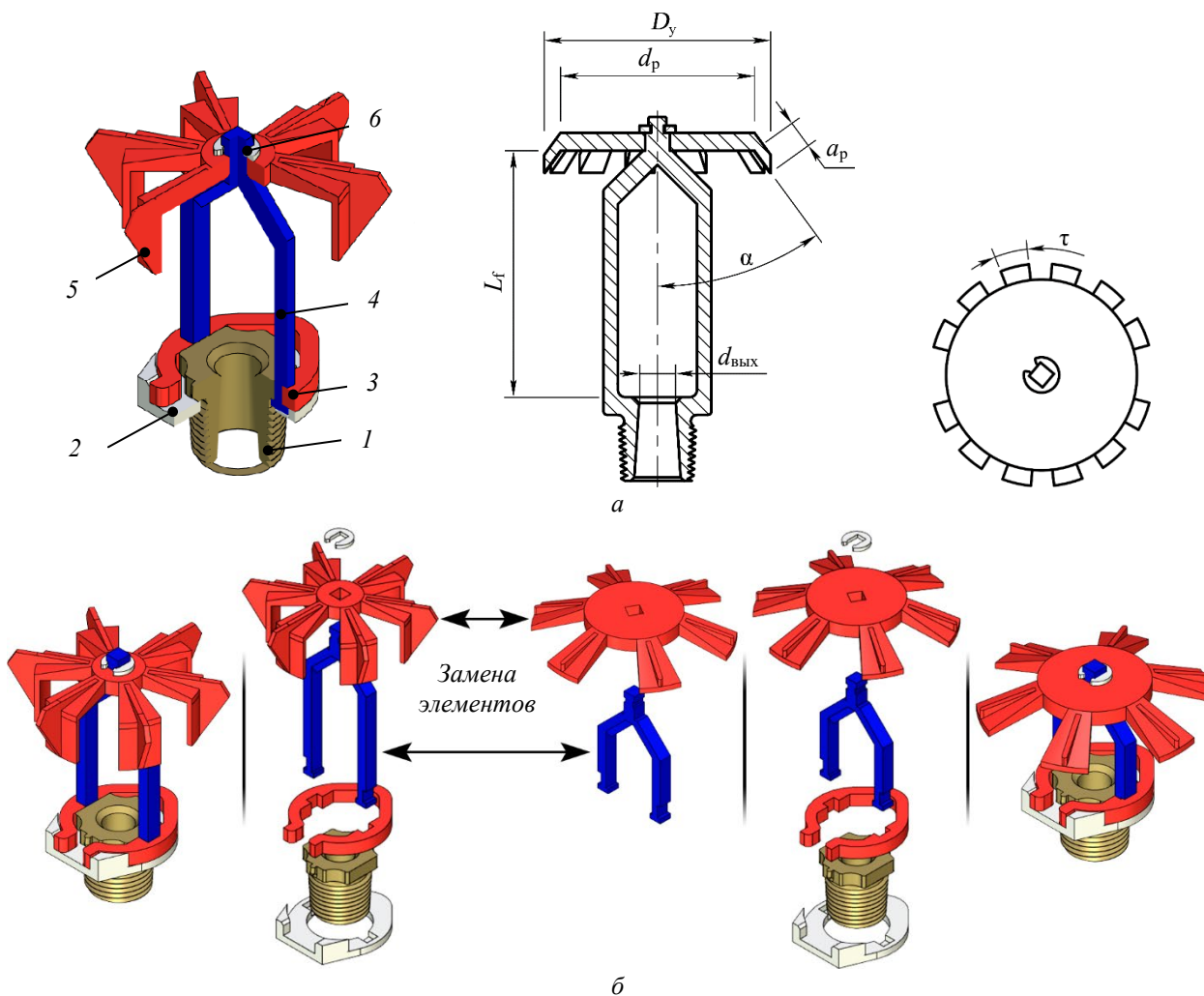
Рисунок 2. – Внешний вид штуцеров оросителя для исследования процесса образования пены в розеточных оросителях

Изменяя геометрию основных составных элементов розеточного оросителя, дужек и розетки, для проведения эксперимента удалось путем использования конструкции сборно-разборного оросителя¹ (рис. 3), позволяющего комбинировать элементы с различными размерами, что существенно снизило количество необходимых экспериментальных образцов. Для исследований основными параметрами геометрии оросителя были приняты: L_f – длина дужек; D – внешний диаметр розетки, выражаемый через ее внутренний диаметр и длину лопастей: $D = d_p + 2a_p$; K_s – коэффициент рабочей поверхности розетки, который представляет собой отношение площади поверхности розетки, взаимодействующей с потоком жидкости в процессе разбрызгивания раствора пенообразователя, и мнимой площади заполненной поверхности розетки (без пустых промежутков между лопастями) и рассчитывается по формуле [1]:

$$K_s = \frac{360d_p^2 \sin \alpha + \sum \tau (D_y^2 - d_p^2)}{360(d_p^2 \sin \alpha + D_y^2 - d_p^2)} \cdot 100\%. \quad (3)$$

где D_y – диаметр проекции розетки на горизонтальную плоскость;
 d_p – внутренний диаметр розетки;
 τ – угол лопасти розетки;
 α – угол конусности лопастей розетки.

¹ Патент ВУ 11801, МПК А 62С 31/00 (2006.01): Сборно-разборный дренчерный ороситель: № и 20180045: заявлено 14.02.2018: опубл. 30.10.2018 / Камлюк А.Н., Грачулин А.В., Лихоманов А.О., Говор Э.Г.; заявитель: Университет гражданской защиты. – URL: <https://search.ncip.by/database/index.php?pref=mod&lng=ru&page=3&target=17510> (дата обращения: 05.03.2026).



1 – штуцер; 2 – дужки; 3 – розетка; 4 – фиксатор; 5 – прижим; 6 – шайба;
 D_y – диаметр проекции розетки на горизонтальную плоскость; a_p – длина лопасти розетки; d_p – внутренний диаметр розетки; τ – угол лопасти розетки; α – угол конусности лопастей розетки; L_f – длина дужек
Рисунок 3. – Внешний вид и геометрические параметры сборно-разборного оросителя (а), а также примерная схема замены его составных элементов в процессе исследования (б)

При проведении экспериментальных исследований использовались конфигурации розеточного оросителя, имеющие следующие значения параметров геометрии: $L_f = 30, 50, 80, 100, 150$ мм; $K_s = 50, 64, 87, 100$ %; $D = 20, 30, 50, 100$ мм.

Для приготовления пенообразующего раствора использовались пенообразователи различных марок, отличающихся как химическим составом, так и назначением. В частности, были отобраны наиболее широко используемые пенообразователи общего назначения (тип S) по СТБ 2459² двух марок, ПО-6РЗ (6 %) и Синтек-6НС (6 %), а также пенообразователь, применяемый для тушения пожаров в качестве смачивателя (тип WA) марки ОПС-0,4 (1 %). В процессе исследований для получения пены использовался рабочий раствор пенообразователя, т.е. водный раствор с рекомендуемой производителем концентрацией пенообразователя в нем (указана в скобках в названии марки пенообразователя). Как правило, при отклонении концентрации пенообразователя от рекомендуемой производителем наблюдается существенное ухудшение пенообразования, в том числе кратности пены. По этой причине растворы пенообразователей с иной концентрацией активного компонента не рассматривались в данной работе.

В таблице 1 представлены основные физические характеристики рабочих растворов отобранных пенообразователей. Значения коэффициентов поверхностного натяжения и динамической вязкости, а также плотность водного раствора каждого пенообразователя были

² Вещества огнетушащие. Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования. Методы испытаний: СТБ 2459-2016. – Взамен СТБ ГОСТ Р 50588-99; введ. 12.08.2016. – Мн.: Госстандарт, 2016. – III, 42 с.

определены экспериментально при использовании сертифицированного и поверенного в установленном порядке лабораторного оборудования: автоматического тензиометра Kruss K20, весов лабораторных МАССА-К ВК-1500, колбы мерной 1000 мл, капиллярного вискозиметра ВПЖ-4 1.47 и секундомера механического СОПр-2а-3-000. Следует отметить, что рассматриваемые растворы пенообразователей относятся к ньютоновским жидкостям, вязкость которых не зависит от скорости деформации (т.е. коэффициент динамической вязкости остается постоянным независимо от скорости потока жидкости). Значения коэффициента динамической вязкости в таблице 1 получены из значений коэффициента кинематической вязкости, определенных с помощью капиллярного вискозиметра, с учетом плотности растворов.

Таблица 1. – Физические характеристики водных растворов пенообразователей

Характеристика раствора пенообразователя	Марка пенообразователя		
	ПО-6РЗ (6 %)	Синтек-6НС (6 %)	ОПС-0,4 (1 %)
Плотность ρ , кг/м ³	1000,7±0,1	1003,4±0,1	1000,1±0,1
Поверхностное натяжение $\sigma \times 10^3$, Н/м	22,46±0,05	29,05±0,02	31,23±0,11
Динамическая вязкость $\eta \times 10^3$, (Па·с)	1,01±0,01	1,04±0,01	1,02±0,01

Методика определения кратности пены заключалась в следующем. При использовании экспериментальной установки (рис. 1) рабочий раствор пенообразователя подавался из емкости 13 с помощью насоса 10 по напорному рукаву 9 и трубопроводу 8 к запорным вентилям 5 и 7, которые находились в закрытом положении. Далее с целью настройки равномерной работы установки и создания необходимого рабочего давления открывался запорный вентиль 7 и раствор подавался через трубопровод 6 в дренаж не менее 20 с. Одновременно с помощью вентилей 12 по показаниям манометра 11 устанавливалось давление 0,15 МПа. После настройки установки вентиль 7 закрывался, а вентиль 5 открывался, тем самым раствор пенообразователя подавался через ороситель 3, с помощью которого генерировалась пена и попадала в мерную емкость 1. Опыт прекращался при заполнении мерной емкости. Затем кратность пены определялась по формуле:

$$K = \frac{V_e \cdot \rho_{p-pa}}{m_2 - m_1}, \quad (4)$$

где V_e – объем мерной емкости;

m_1 – масса мерной емкости;

m_2 – масса мерной емкости, заполненной пеной;

ρ_{p-pa} – плотность раствора пенообразователя.

Эксперимент проводился сериями по пять опытов. Все измерения проводились с помощью поверенного в установленном порядке оборудования.

Средняя скорость потока жидкости на выходе из насадка определялась исходя из расхода раствора пенообразователя через ороситель при давлении на насосе 0,15 МПа (выбор давления связан с техническими ограничениями насосной установки). Для этого емкость 13 (рис. 2) заполнялась рабочим раствором пенообразователя. На емкости предварительно были проставлены верхняя и нижняя метки объема жидкости 30 л таким образом, чтобы верхняя граница была ниже уровня жидкости при заполненной емкости, а нижняя – выше дна емкости. Производился пуск установки и подача раствора пенообразователя через ороситель 3 в мерную емкость 1. С помощью секундомера определялось время прохождения уровня жидкости в емкости 13 от верхней до нижней меток, а также фиксировалось давление перед оросителем по манометру 4. Далее скорость потока жидкости из выходного отверстия насадка определялась по формуле:

$$v = \frac{4V_{yч}}{\pi d_{вых}^2 t}, \quad (5)$$

где $V_{yч}$ – объем жидкости между верхней и нижней метками в емкости 13 (рис. 2);

t – время прохождения уровня жидкости от верхней до нижней меток в емкости 13.

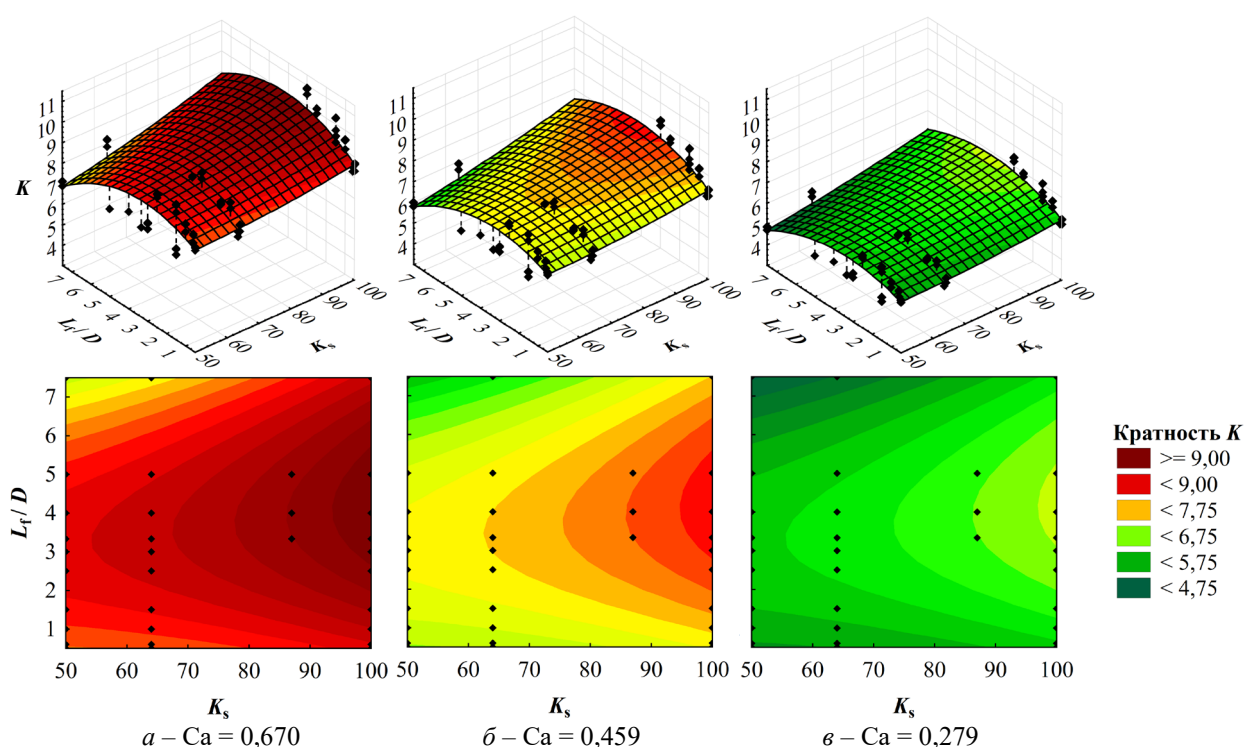
Экспериментальные значения расхода, средней скорости и давления потока жидкости перед насадком представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Экспериментальные значения средней скорости, давления перед оросителем, расхода и числа капиллярности

Диаметр выходного отверстия насадки, мм	Средняя скорость, м/с	Давление перед оросителем, МПа	Расход, (м ³ /с) × 10 ⁻⁴	Число капиллярности		
				ПО-6РЗ (6 %)	Синтек-6НС (6 %)	ОПС-0,4 (1 %)
10,0	14,9	0,10	11,70	0,279	0,358	0,382
11,0	13,8	0,10	13,11	0,382	0,394	0,428
13,5	10,2	0,05	14,60	0,459	0,483	0,477
15,7	8,5	0,04	16,46	0,621	0,562	0,538
17,6	6,2	0,02	15,08	0,670	0,630	0,493

Результаты эксперимента по определению кратности пены с использованием оросителей представлены на рисунках 4 и 5. Для удобства визуального анализа по экспериментальным значениям (отмечены закрашенными черными ромбами) построены трехмерные и двухмерные поверхности с помощью метода квадратичной аппроксимации данных. Точность описания данными поверхностями фактически полученных экспериментальных значений достаточна для анализа тенденции изменения зависимой переменной от исследуемых факторов (значения коэффициента детерминации составляют не менее 60 %).

При рассмотрении полученных зависимостей видно, что наибольшие значения кратности пены наблюдаются при максимальном значении числа капиллярности в рамках исследуемого диапазона значений данного параметра независимо от рассматриваемой области поверхностей. При этом уменьшение числа капиллярности приводит к постепенному снижению кратности пены. Аналогичная ситуация и с параметром рабочей поверхности розетки. При прочих равных условиях наименьшие значения кратности пены наблюдаются при значениях K_s ближе к нижней границе исследуемого диапазона, а наибольшие – при K_s близких к 100 %. Таким образом, при составлении математической модели необходимо учитывать положительную тенденцию изменения кратности пены с ростом параметров Ca и K_s .

**Рисунок 4. – Зависимость кратности пены от безразмерных параметров L_f/D и K_s при различных значениях числа капиллярности**

Зависимость кратности пены от параметра $D/D_{\max}$ имеет иной характер. Как видно на рисунке 5, при прочих равных наибольшие значения кратности пены сохраняются при изменении указанного параметра в достаточно широком диапазоне от 0,1 до 0,7, а затем несущественно снижаются в диапазоне от 0,7 до 1,0, что свидетельствует об обратной зависимости.

Наиболее сложной является зависимость кратности пены от длины дужек приведенной к внешнему диаметру розетки (L_f/D). В данном случае имеется две области: первая – от 0,5 до 3,0, где наблюдается постепенное повышение кратности пены до наибольших значений, и вторая – от 3,0 до 7,5, где кратность пены снижается с пиковых значений до минимальных.

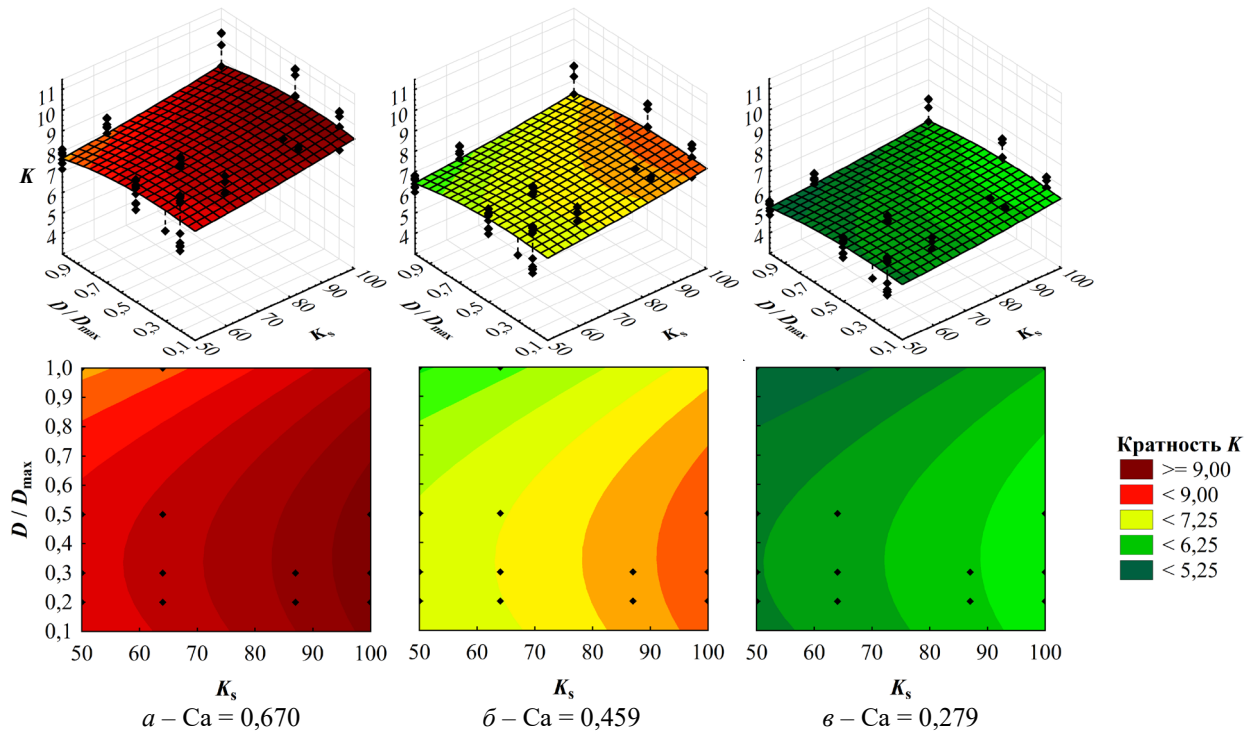


Рисунок 5. – Зависимость кратности пены от безразмерных параметров $D/D_{\max}$ и K_s при различных значениях числа капиллярности

С учетом выявленных тенденций изменения кратности пены при варьировании основных параметров геометрии оросителя, гидродинамики струи и свойств пенообразователя далее представлены результаты разработки модели для прогнозирования данной характеристики пены при генерировании в оросителях розеточного типа, а также проведена оценка ее точности и адекватности.

Разработка математической модели. Принимая во внимание ранее обозначенные основные исследуемые параметры процесса образования пены в оросителях, а также модель согласно [6], обобщенный вид математической модели для прогнозирования кратности огнетушащей пены может быть представлен следующим образом:

$$K = Ca^a K_s^b \left(\frac{L_f}{D} \right)^c \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^d, \quad (6)$$

где a, b, c, d – значения степеней при безразмерных членах уравнения.

Поиск значений степеней в уравнении (6) выполнялся с помощью логарифмирования и сопоставления с полученными экспериментальными зависимостями кратности пены от включенных в данное уравнение переменных величин. Значения степеней приняты равными угловым коэффициентам прямых линий регрессии для соответствующих зависимостей в логарифмическом масштабе. Принимая во внимание то, что в текущей работе диапазоны и конкретные значения параметров эксперимента были аналогичны принятым в работе [6], значения степеней при факторах K_s , L_f/D и $D/D_{\max}$ остались неизменными по сравнению с формулой (1). Для зависимости $\ln(K) = f(Ca)$ построена прямая линии регрессии с использованием метода наименьших квадратов и установлен угловой коэффициент – $a = 0,3$ (рис. 6).

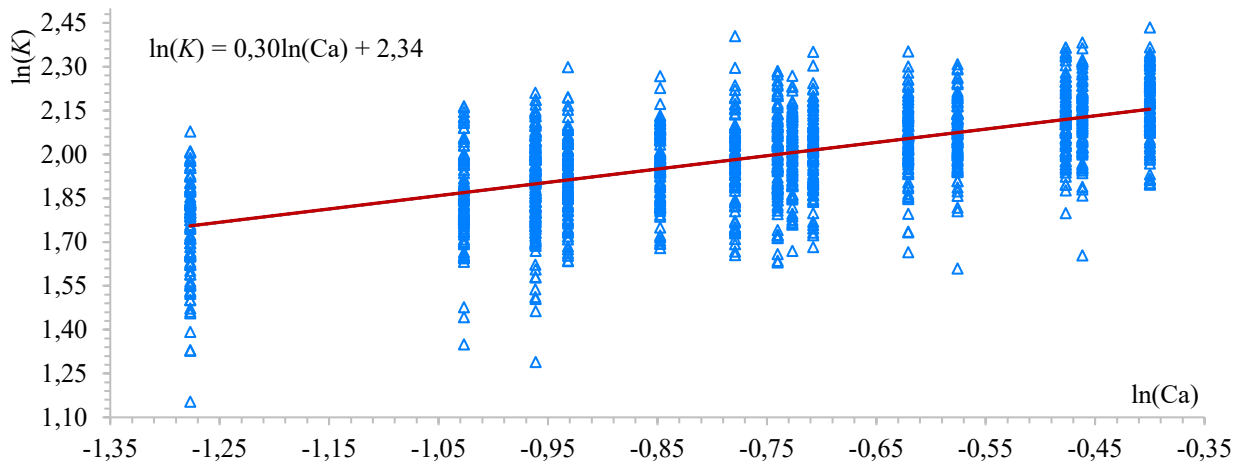


Рисунок 6. – Зависимость логарифма кратности пены от логарифма числа капиллярности

Таким образом, математическая модель для прогнозирования кратности пены имеет следующий вид:

$$K = Ca^{0,3} K_s^{0,5} \left(\frac{L_f}{D} \right)^c \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^{(-0,05)}, \quad c = \begin{cases} 0,1 & \text{при } L_f / D \leq 3,0; \\ -0,03 & \text{при } 3,0 < L_f / D \leq 7,5. \end{cases} \quad (7)$$

Среднее отклонение теоретических значений кратности пены, рассчитанных по формуле (7), от экспериментальных составляет 11 %, при этом максимальное отклонение – 27 %. Область адекватности модели ограничивается следующими диапазонами значений факторов: $Ca = 0,279-0,670$; $K_s = 50-100$ %, $L_f = 30-150$ мм; $D = 20-100$ мм.

Для подтверждения адекватности разработанной модели проведен анализ остатков (разность между экспериментальными значениями зависимой переменной и их прогнозными значениями по модели). Остатки – случайные величины, не должны зависеть от прогнозных по моделям значений зависимой переменной. Исходя из представленных на рисунке 6а данных видно, что систематической зависимости значений остатков от прогнозных значений зависимой переменной не наблюдается (коэффициент корреляции $r = -0,02$), следовательно, по данному критерию модель (7) можно считать адекватной.

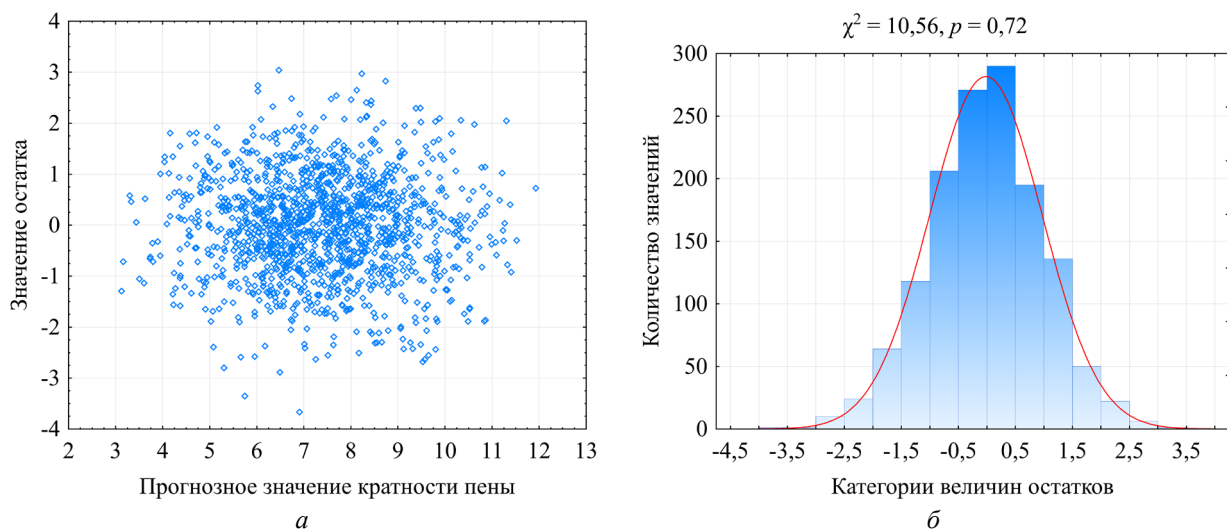


Рисунок 7. – График рассеяния остатков в зависимости от прогнозных значений зависимой переменной (а) и гистограмма распределения остатков (б)

Еще одним критерием адекватности моделей является нормальность распределения величин остатков. С целью оценки нормальности их распределения проведена процедура вычисления значения критерия согласия и проверки гипотезы о соответствии распределения остатков нормальному закону. Для этого было использовано программное обеспечение STATISTICA, а именно модуль «Подгонка распределения» [10]. С помощью данного модуля

построена гистограмма распределения остатков, которая представлена на рисунке 7б. Здесь указаны значения критерия согласия χ^2 и уровень значимости критерия p . В данном случае нулевая гипотеза означает, что распределение остатков соответствует нормальному закону. Так как значения уровня значимости критерия p значительно больше 0,05, вероятность ошибиться, отбросив нулевую гипотезу, велика, поэтому принята гипотеза о нормальности рассматриваемого распределения остатков.

Таким образом, результаты проведенного анализа остатков подтверждают адекватность построенной модели для прогнозирования значений зависимой переменной (кратности пены).

Заключение

В рамках текущей работы представлены результаты исследований, позволяющие продвинуться в решении актуальной задачи прогнозирования кратности воздушно-механической пены, генерируемой розеточными оросителями. На основе экспериментальных данных разработана математическая модель, позволяющая с высокой степенью достоверности оценивать кратность пены в зависимости от геометрических параметров оросителя, гидродинамических условий и физико-механических свойств пенообразующего раствора.

В отличие от известных подходов, в предложенной модели (7) для описания гидродинамики струи и свойств жидкости использовано число капиллярности Ca . Данный критерий учитывает соотношение вязких сил и сил поверхностного натяжения, что позволяет более точно характеризовать процесс деформации и диспергирования струи раствора пенообразователя. Структура модели помимо числа капиллярности включает безразмерные комплексы, отражающие влияние коэффициента рабочей поверхности розетки K_s , относительной длины дужек L_f/D и относительного диаметра розетки $D/D_{\max}$, что обеспечивает комплексный учет геометрии оросителя и режимных параметров процесса пенообразования.

Статистическая верификация разработанной модели подтвердила ее высокую точность и адекватность. Среднее отклонение расчетных значений кратности пены от экспериментальных составляет 11 %, максимальное – 27 %, что является приемлемым для инженерных расчетов. Анализ остатков показал отсутствие систематической зависимости между остатками и прогнозными значениями (коэффициент корреляции $r = -0,02$), а также подтвердил нормальность распределения остатков (значения уровня значимости критерия χ^2 превышают 0,05). Это свидетельствует о корректности выбранной формы модели и значимости входящих в нее факторов.

Полученные результаты подтверждают принципиальную возможность использования числа капиллярности в качестве обобщающего критерия при моделировании процессов пенообразования в розеточных оросителях. Выявленные в ходе эксперимента зависимости указывают на сложный немонотонный характер влияния геометрических параметров, в частности отношения длины дужек к диаметру розетки L_f/D , что требует особого внимания при проектировании устройств с целью достижения максимальной кратности пены. Установлено, что наиболее значимый прирост кратности обеспечивается при увеличении числа капиллярности и коэффициента рабочей поверхности розетки, тогда как влияние относительного диаметра розетки носит менее выраженный характер. Эти закономерности могут служить практическими ориентирами для оптимизации конструкции оросителей еще на этапе проектирования.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на расширение границ адекватности модели за счет включения в экспериментальную базу данных оросителей с большим диапазоном геометрических параметров, а также пенообразователей различных типов, включая фторсинтетические и пленкообразующие составы. Кроме того, представляет интерес дальнейшее совершенствование модели путем введения дополнительных критериев подобию, учитывающих влияние турбулентности потока и геометрии проточного тракта, а также разработка на основе предложенной модели инженерной методики расчета, адаптированной для практического использования при проектировании автоматических установок пожаротушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Камлюк, А.Н. Пенные оросители для автоматических установок пожаротушения: монография / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов, А.В. Грачулин. – Мн.: УГЗ, 2023. – 244 с. – ISBN: 978-985-590-186-1.

2. Камлюк, А.Н. Компрессионная пена для нужд пожарных подразделений: монография / А.Н. Камлюк, А.В. Грачулин. – Мн.: УГЗ, 2019. – 224 с. – ISBN: 978-985-590-050-5.
3. Камлюк, А.Н. Ствол пожарный ручной универсальный комбинированный с возможностью изменения расхода огнетушащего средства: от моделирования до огневых испытаний: монография / А.Н. Камлюк, А.А. Морозов, В.В. Пармон. – Мн.: УГЗ, 2024. – 189 с. – ISBN: 978-985-590-220-2.
4. Корольченко, Д.А. Тушение пламени гидрофобных материалов водными растворами смачивателей / Д.А. Корольченко, А.Ф. Шароварников // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24, № 3. – С. 61–68. – EDN: TUBQAX.
5. Камлюк, А.Н. Математическая модель для прогнозирования кратности огнетушащей пены, получаемой в устройствах с сетками / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов, Д.А. Вашкевич, Ю.В. Гараев // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2026. – Т. 10, № 1. – С. 53–64. – DOI: 10.33408/2519-237X.2026.10-1.53. – EDN: HVT TAR.
6. Kamluk, A.N. Mathematical model of foam expansion rate generated in sprinklers / A.N. Kamluk, A.O. Likhomanov, E.G. Govor, A.V. Grachulin // Magazine of Civil Engineering. – 2025. – Vol. 17, No. 07. – Article 13102. – 11 p. – DOI: 10.34910/MCE.131.2.
7. Камлюк, А.Н. Зависимость объемной устойчивости низкократных пен от их кратности / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов, Э.Г. Говор // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 194–205. DOI: 10.29235/1561-8358-2024-69-3-194-205. – EDN: SQVQWY.
8. Камлюк, А.Н. Количественное описание механизмов образования воздушно-механической пены низкой кратности для нужд пожаротушения / А.Н. Камлюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2024. – Т. 8, № 3. – С. 276–288. DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-3.276. – EDN: EJOWFD.
9. Lin, S.P. Drop and spray formation from a liquid jet / S.P. Lin, R.D. Reitz // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1998. – Vol. 30. – P. 85–105. – DOI: 10.1146/annurev.fluid.30.1.85.
10. Яновский, Т.А. Многомерный регрессионный анализ и его приложения на основе пакета STATISTICA: учеб. пособие / Т.А. Яновский, А.Г. Яновский. – Волгоград: ВолгГТУ, 2015. – 64 с. – EDN: VHVBJF.

**Математическая модель для прогнозирования кратности огнетушащей пены,
получаемой в розеточных оросителях**

**Mathematical model for predicting fire-extinguishing foam expansion rate
in deflector type sprinklers**

Камлюк Андрей Николаевич

кандидат физико-математических наук,
доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», ученый секретарь

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: kan@ucp.by

SPIN-код: 8858-0296

Andrey N. Kamlyuk

PhD in Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Scientific Secretary

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: kan@ucp.by

ORCID: 0000-0002-9347-0778

ScopusID: 57218325403

Лихоманов Алексей Олегович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: alexlikh20@gmail.com

SPIN-код: 1837-8150

Aleksey O. Likhomanov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic System Security,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: alexlikh20@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9374-1486

ScopusID: 57210911673

MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING FIRE-EXTINGUISHING FOAM EXPANSION RATE IN DEFLECTOR TYPE SPRINKLERS**Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O.**

Purpose. Based on the results of experimental studies, develop a mathematical model for predicting the foam multiplicity, taking into account the main parameters of the foam formation process in deflector type sprinklers for automatic fire extinguishing systems.

Methods. The general methodology of the work included the theoretical (analysis, synthesis, comparison) and experimental research methods. The foam expansion rate was determined experimentally using the developed method. Statistical analysis of experimental data and formulation of the mathematical model included regression and correlation analyses, as well as analysis of residuals, including the normality of their distribution using the Pearson criterion.

Findings. Based on experimental data, the mathematical model has been developed for predicting fire-extinguishing foam expansion rate based on sprinkler geometry, hydrodynamic conditions, and the physical and mechanical properties of the foaming solution. The model's structure includes dimensionless complexes reflecting the influence of the effective surface area coefficient of the deflector K_s , the relative length of the frame arms L_f/D , the relative diameter of the deflector $D/D_{\max}$, and the capillarity number Ca , providing a comprehensive account of the sprinkler geometry and foaming process parameters. The average deviation of the calculated foam expansion rate values from the experimental data does not exceed 11 %, and the maximum deviation is 27 %. An analysis of the residuals revealed no systematic relationship between the residuals and the predicted values and confirmed the normality of the residual distribution. Furthermore, the relationships identified during the experiment indicate the complex influence of the sprinkler's geometric parameters on foam expansion rate, particularly relative length of the frame arms L_f/D . The most significant increase in foam expansion rate is achieved by increasing the capillarity number and the working surface coefficient of the deflector, while the influence of the relative diameter of the deflector is less pronounced.

Application field of research. Design and operation of deflector sprinklers for automatic fire extinguishing systems. The proposed model allows for the selection of the required foam generation configuration, taking into account the foam concentrate used, the foam solution delivery conditions, and the sprinkler's key geometric parameters to produce foam with a specified expansion rate.

Keywords: automatic extinguishing system, sprinkler, deflector, foam expansion rate, mathematical model.

(The date of submitting: March 12, 2026)

REFERENCES

1. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Grachulin A.V. *Pennye orositeli dlya avtomaticheskikh ustanovok pozharotusheniya* [Foam sprinklers for automatic fire extinguishing installations]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2023. 244 p. (rus). ISBN: 978-985-590-186-1.
2. Kamlyuk A.N., Grachulin A.V. *Kompressionnaya pena dlya nuzhd pozharnykh podrazdeleniy* [Compression foam for the needs of fire departments]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2019. 224 p. (rus). ISBN: 978-985-590-050-5.
3. Kamlyuk A.N., Morozov A.A., Parmon V.V. *Stvol pozharный ruchnoy universal'nyy kombinirovannyi s vozmozhnost'yu izmeneniya raskhoda ognietushashchego sredstva: ot modelirovaniya do ognivykh ispytaniy* [A universal combined hand-held fire nozzle with the ability to change the flow rate of fire extinguishing agent: from modeling to fire testing]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2024. 189 p. (rus). ISBN: 978-985-590-220-2.
4. Korol'chenko D.A., Sharovarnikov A.F. Tushenie plameni gidrofobnykh materialov vodnymi rastvorami smachivateley [Extinguishing flames of hydrophobic materials by water solutions of wetting agent]. *Fire and Explosion Safety*, 2015. Vol. 24, No. 3. Pp. 61–68. (rus). EDN: TUBQAX.
5. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Garaev Yu.V., Vashkevich D.A. Matematicheskaya model' dlya prognozirovaniya kratnosti ognietushashchey peny, poluchaemoy v ustroystvakh s setkami [Mathematical model for predicting the expansion rate of fire extinguishing foam produced in devices with meshes]. *Journal of Civil Protection*, 2026. Vol. 10, No. 1. Pp. 53–64. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2026.10-1.53. EDN: HVT TAR.
6. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Govor E.G., Grachulin A.V. Mathematical model of foam expansion rate generated in sprinklers. *Magazine of Civil Engineering*, 2024. Vol. 17, No. 7. Article 13102. 11 p. DOI: 10.34910/MCE.131.2.

7. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Govor E.G. *Zavisimost' ob"emnoy ustoychivosti nizkokratnykh pen ot ikh kratnosti* [Dependence of the volume stability of low-expansion foam on the expansion rate]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024. Vol. 69, No. 4. Pp. 194–205. (rus). DOI:10.29235/1561-8358-2024-69-3-194-205. EDN: SQVQWY.
8. Kamlyuk A.N. *Kolichestvennoe opisanie mekhanizmov obrazovaniya vozdushno-mekhanicheskoy peny nizkoy kratnosti dlya nuzhd pozharotusheniya* [Quantitative description of the mechanisms of formation of low multiplicity air-mechanical foam for firefighting needs]. *Journal of Civil Protection*, 2024. Vol. 8, No. 3. Pp. 276–288. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-3.276. EDN: EJOWFD.
9. Lin S.P., Reitz R.D. Drop and spray formation from a liquid jet. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1998. Vol. 30. Pp. 85–105. DOI: 10.1146/annurev.fluid.30.1.85.
10. Yanovskiy T.A., Yanovskiy A.G. *Mnogomernyy regressionnyy analiz i ego prilozheniya na osnove paketa STATISTICA* [Multivariate regression analysis and its applications based on the STATISTICA package]: textbook. Volgograd: Volgograd State Technical University, 2015. 64 p. EDN: VHVBJF.

Copyright © 2026 Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОГNETУШАЩИХ СОСТАВОВ, ПОДАВАЕМЫХ НА ТУШЕНИЕ ПУТЕМ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Иванов И.Ю., Навроцкий О.Д., Лихоманов А.О., Гараев Ю.В.

Цель. Разработать методику эксперимента и исследовать влияние рабочего давления перед розеточным оросителем тонкораспыленной воды на размер капель в факеле распыла при использовании ранее разработанного пленкообразующего огнетушащего состава V3. Провести натурные испытания для определения времени тушения модельного очага пожара нерастворимой в воде горючей жидкости с использованием разработанного пленкообразующего огнетушащего состава и серийно выпускаемых аналогов.

Методы. Размер капель в потоке измерялся инструментальным методом с помощью промышленного анализатора размера аэрозольных частиц Winner 319, в основе работы которого лежит принцип лазерной дифракции. Определение времени тушения огнетушащими составами выполнялось экспериментальным путем, а обработка экспериментальных данных проводилась с использованием метода оценивания и выражения неопределенности измерений.

Результаты. Разработана методика измерения размера капель водяных огнетушащих составов, подаваемых на тушение путем распыления. Проведены измерения размеров капель ранее разработанного пленкообразующего огнетушащего состава V3 (с оптимизированным по времени тушения соотношением компонентов) при подаче его через ороситель тонкораспыленной водой «Бриз9/К16». Установлено, что для формирования факела распыла с диаметром капель размером менее 150 мкм с помощью указанного оросителя «Бриз9/К16» пленкообразующий огнетушащий состав V3 необходимо подавать под рабочим давлением от 0,6 до 1,0 МПа. Проведены натурные испытания по тушению модельного очага пожара подкласса В1 четырьмя огнетушащими составами: огнетушащей композицией V3, ПО-6РТС (Россия), ПО-6РТФ (Россия), барьер-пленкообразующим 3 НС (Беларусь). Установлено, что применение разработанной огнетушащей композиции V3 снижает время тушения модельного очага пожара подкласса В1 не менее чем на 38 % по сравнению с аналогами.

Область применения исследований. Разработанная методика исследования физических параметров диспергируемых капель из розеточного оросителя тонкораспыленной воды может быть применена при разработке отечественных ТНПА для исследования параметров факела распыла розеточных оросителей, применяемых в автоматических установках пожаротушения.

Ключевые слова: ороситель, размер капель, эффективность тушения, время тушения, автоматическая установка пожаротушения, натурные испытания.

(Поступила в редакцию 28 января 2026 г.)

Введение

В работе [1] предложена рецептура пленкообразующего огнетушащего состава, отличающаяся от существующих аналогов наименьшим временем тушения при подаче путем распыления в лабораторных условиях. С целью подтверждения возможности применения разработанного огнетушащего состава на практике в автоматических установках пожаротушения и подачи его путем мелкодисперсного распыления проведены экспериментальные исследования по определению зависимости размера капель в образуемом потоке от рабочего давления перед оросителем, а также натурные испытания по тушению модельных очагов пожара подкласса В1 по ГОСТ 27331-87¹.

Для формирования мелкодисперсных капель в факеле распыла в составе испытательной установки применялся ороситель тонкораспыленной воды «Бриз9/К16» производства ЗАО «ПО "Спецавтоматика"» с техническими характеристиками, которые представлены в таблице 1.

¹ Пожарная техника. Классификация пожаров: ГОСТ 27331-87. – Введ. 01.01.1998. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 4 с.

Максимальное рабочее давление перед оросителем при проведении измерений размера капель принято ограничить 1 МПа в соответствии с действующими нормами проектирования водяных и пенных установок пожаротушения².

Таблица 1. – Технические характеристики оросителя тонкораспыленной воды «Бриз9/К16»³

Наименование параметра	Значение параметра
Диапазон рабочих давлений, МПа	0,60–1,60
Защищаемая площадь, м ²	9
К-фактор	0,085
Средняя интенсивность орошения на защищаемой площади при высоте установки оросителя 2,5 м, рабочем давлении 0,6 МПа, дм ³ /(с·м ²)	не менее 0,055
Средний диаметр капель в потоке, мкм	не более 150

Существующие методики определения размеров капель распыленной жидкости. В соответствии с СТБ 11.16.06⁴ по капельной структуре формируемого потока огнетушащего вещества оросители для автоматических установок пожаротушения подразделяются на распылители (средний диаметр капель в распыленном потоке 150 мкм и менее) и разбрызгиватели (более 150 мкм). Дисперсность распыленной струи воды в соответствии с указанным стандартом определяется по методу улавливания капель. В данном методе применяется специальная смесь, состоящая из 1/4 части технического вазелина и 3/4 части вазелинового масла. Для проведения эксперимента используются плошки, на которые наносится слой данной смеси. Каждая плошка должна содержать не менее 3 г смеси и иметь площадь захвата не менее 7 см². Плошки устанавливаются в плоскости, которая перпендикулярна оси оросителя, и размещаются на расстоянии, равном половине дальности эффективного действия струй. Расстановка плошек производится равномерно, начиная от центра и заканчивая на максимальном радиусе факела струи. Для того чтобы обеспечить точность измерений, плошки накрываются специальным отсекателем. Отсекатель убирается только после того, как распылитель выйдет на рабочий режим. Важно, чтобы в плошках было зафиксировано не менее 100 капель, при этом между каплями должно оставаться свободное пространство. После завершения процесса улавливания капель плошки фотографируются, что позволяет зафиксировать положение капель. Затем с помощью микроскопа исследуется количество капель и их размеры. При анализе для каждой плошки рассчитывается средний диаметр капель по формуле:

$$d_{\text{пл}} = \sum_i d_i n_i / \sum_i n_i,$$

где d_i – диаметр капли в заданном интервале размеров, мкм;

n_i – число капель диаметра d_i .

Описанный выше метод анализа микрофотографий осевших капель характеризуется высокой трудоемкостью и низкой точностью и не позволяет получать данные в реальном времени [2].

В соответствии с широко используемыми международными нормами проектирования установок пожаротушения тонкораспыленной водой NFPA 750⁵ к данному типу установок относятся системы с размерами диспергируемых капель от 0,99 до 1000 мкм. Для измерения размера капель применяются три основных способа: оптическая визуализация, дифракция и доплеровская рефракция. Также указанный стандарт определяет три типа установок пожаротушения тонкораспыленной водой в зависимости от рабочего давления в системе: низкого (менее 1,21 МПа), среднего (от 1,21 до 3,45 МПа) и высокого давления (более 3,54 МПа).

² Пожарная автоматика зданий и сооружений: СН 2.02.03-2019. – Введ. 29.11.2019. – Мн.: Минстройархитектуры, 2024. – IV, 105 с. – URL: <https://normy.by/tnpa/1/6626.pdf> (дата обращения: 11.12.2025).

³ Ороситель спринклерный тонкораспыленной воды «Бриз» / ЗАО «ПО "Спецавтоматика"»: [сайт]. – URL: <https://sa-biysk.ru/catalog/1369/> (дата обращения: 11.12.2025).

⁴ Установки водяного и пенного пожаротушения автоматические. Оросители. Общие технические требования. Методы испытаний: СТБ 11.16.06-2011 / ГОСТ Р 51043-2002. – Введ. 30.05.2011. – Мн.: Госстандарт, 2011. – III, 30 с.

⁵ NFPA 750. Standard on Water Mist Fire Protection Systems / National Fire Protection Association. – URL: <https://minhbao.com.vn/wp-content/uploads/2021/01/NFPA-750-HE-THONG-WATER-MIST.pdf> (дата обращения: 11.12.2025).

Для оценки и характеристики процесса распыления жидкости в реальном времени наиболее широко применяются оптические методы измерения капель. Оптические анализаторы размера капель представляют данные в виде процента распределения капель по классам размеров. Данные упорядочиваются в математическое представление, называемое распределением размеров капель. Форма этого распределения может значительно варьироваться в зависимости от типа и модели используемого анализатора. Для более детального сравнения размеров капель в научных и промышленных исследованиях применяются различные средние и характеристические диаметры⁶.

Согласно NFPA 750 измерение распределения размера капель в объеме формируемого потока проводится при минимальном и максимальном давлении в 24 точках на расстоянии 1 м от оросителя (рис. 1). В этих же точках проводится и измерение интенсивности подачи воды.

Средние и средневзвешенные диаметры капель. В соответствии с теорией эквивалентной сферы [3] описание дисперсных систем с частицами сложной формы упрощается за счет использования одного однозначно определяемого параметра – диаметра сферы. Метод заменяет реальные частицы неправильной формы шарами с тем же объемом, массой или площадью поверхности. Для анализа капель производится расчет их среднего диаметра. Каждый метод анализа размеров капель позволяет получать разные значения средних диаметров, в зависимости от того, какой характеризующий частицу физический параметр измеряется.

К ключевым параметрам распределения капель огнетушащего вещества по размеру относятся проценти и средние (взвешенные) диаметры. Проценти показывают, как распределены частицы, и указывают диаметр, меньше которого находится определенный процент капель по выбранному критерию (объем (Volume) или количество (Number)). Средние (взвешенные) диаметры капель представляют собой «усредненные» значения диаметра, которые по-разному чувствительны к мелким или крупным каплям, и рассчитываются по формулам [4]:

– среднеарифметический диаметр

$$D[1,0] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i, \quad (1)$$

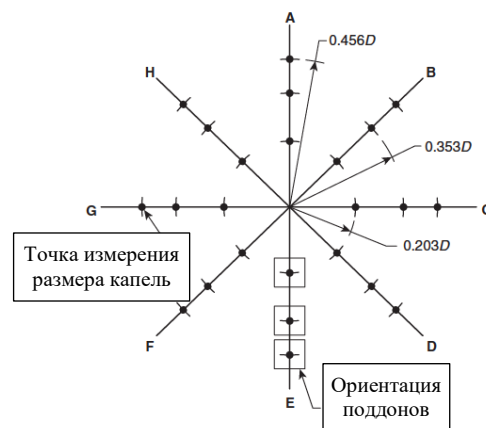
– средневзвешенный на площадь поверхности – средний диаметр Заутера (Sfuter Mean Diameter, SMD)

$$D[3,2] = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^3}{\sum_{i=1}^n d_i^2}, \quad (2)$$

– средневзвешенный на объем (среднеобъемный) – средний диаметр Де Брукера

$$D[4,3] = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^4}{\sum_{i=1}^n d_i^3}, \quad (3)$$

где n – общее число капель; d_i – диаметр измеренной капли, мкм.



A–H – оси радиальной решетки с рассчитанными местами измерения размера капель;
D – диаметр площади, защищаемой оросителем
Рисунок 1. – Схема измерения размера капель и интенсивности орошения водяных огнетушащих составов в соответствии с NFPA 750⁷

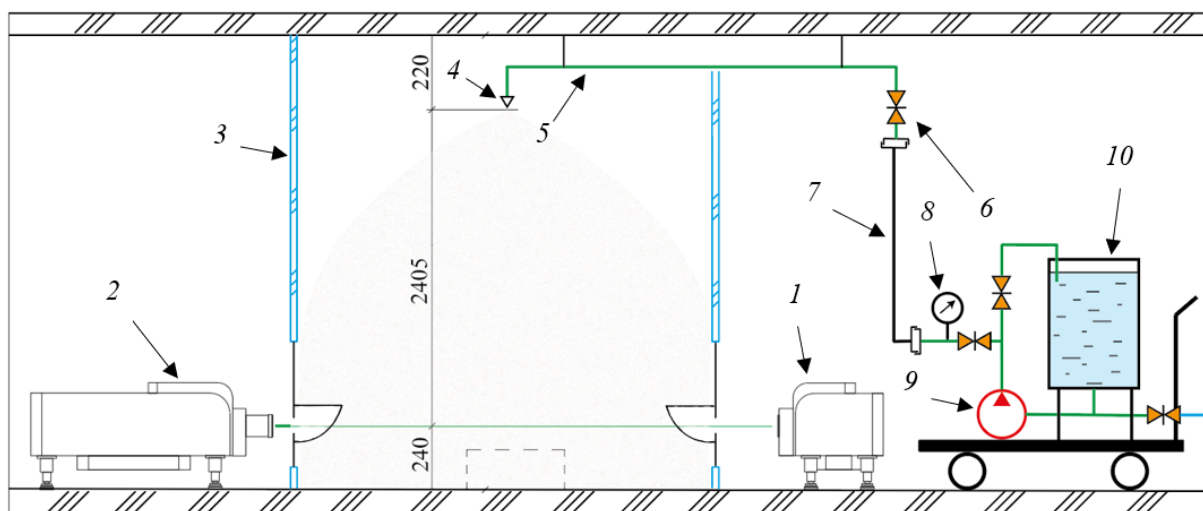
⁶ Schick, R.J. Spray Technology Reference Guide: Understanding Drop Size / R.J. Schick. – USA, Wheaton: Spraying Systems Co., 2008. – 36 p. – URL: https://www.spray.com/uk-ua/-/media/dam/industrial/usa/sales-material/product-market-bulletin/b459c_understanding_drop_size.pdf (date of access: 11.12.2025).

⁷ См. сноску 5.

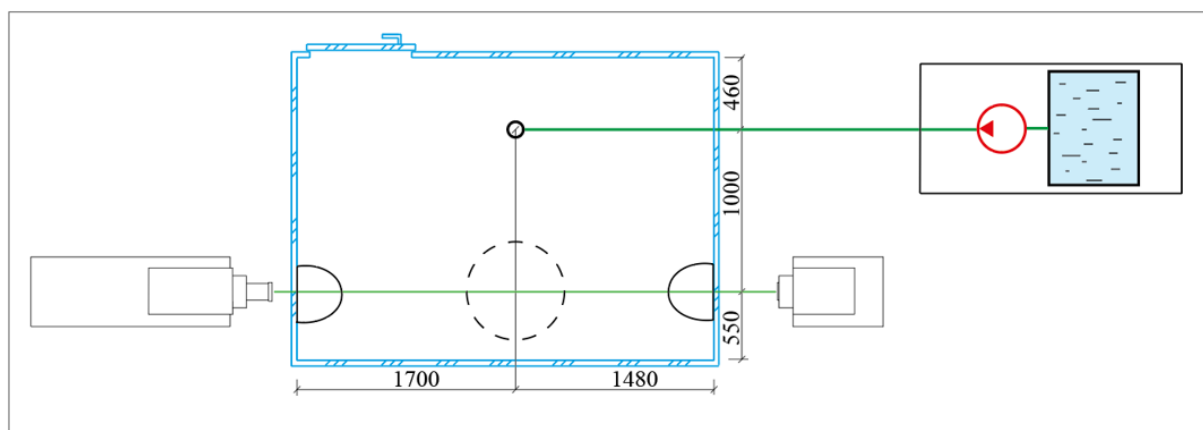
Эти диаметры представляют собой значения, извлеченные из распределения размеров капель, и помогают понять, каково среднее значение и вариация размеров капель в конкретной выборке, и дают возможность более точно оценить характеристики распыла [4].

Основная часть

Методика лабораторного эксперимента по определению влияния рабочего давления перед оросителем на размер капель. После анализа методики проведения измерений в соответствии с NFPA 750 была разработана установка, схема которой представлена на рисунке 2. С целью упрощения и удешевления процесса измерения размера диспергируемых из оросителя капель в факеле распыла исследования решено производить только на одной линии, расположенной на расстоянии 0,1 м над планируемым местом установки очага пожара при натурных испытаниях. Такое расположение измерительного луча по отношению к эюпоре орошения оросителя позволяет определить размер тех капель, которые непосредственно будут участвовать в тушении модельного очага пожара.



а – вид сбоку



б – вид сверху

1 – источник лазерного поляризованного излучения; 2 – многоэлементный детектор; 3 – испытательное помещение; 4 – ороситель тонкораспыленной воды; 5 – трубопровод; 6 – задвижка; 7 – напорный рукав; 8 – манометр; 9 – насосная установка; 10 – емкость с огнетушащим веществом

Рисунок 2. – Схема экспериментальной установки для определения размера диспергируемых оросителем капель (размеры указаны в мм)

Исследования проводились в испытательном помещении, которое представляет собой выгороженное ПВХ-перегородками со стеклянным заполнением помещение с дверью, при следующих параметрах окружающей среды: температура 18–25 °С; влажность 65,0–74,0 %; атмосферное давление 99,0–101,5 кПа. Чтобы избежать искажений в измерениях во время исследований, стеклянные полотна, через которые проходил измерительный луч, были заменены на непрозрачные вставки с отверстиями. Эти вставки дополнительно защищались козырьками, которые предотвращали попадание образующейся пены в отверстия.

Перед началом испытаний по разным сторонам испытательной камеры соосно на одном уровне устанавливались источник лазерного поляризованного излучения и многоэлементный детектор и проводилась их отладка в соответствии с технической документацией производителя. Далее элементы подключались согласно схеме на рисунке 2. Проведение испытаний начиналось с приготовления испытательного раствора путем смешения воды и огнетушащего состава в необходимых пропорциях. Готовый раствор заливался в емкость и в течение 3 мин перемешивался с помощью насосной установки. Далее включался анализатор размера капель, который прогревался в течение 10–15 мин, и компьютер, на котором запускалось программное обеспечение лазерного анализатора размера капель. Запускалась насосная установка, и внутрь испытательного помещения через ороситель распылялся огнетушащий состав. С помощью задвижки после насосной установки выставлялось необходимое рабочее давление. После стабилизации давления в системе в течение 30 с проводились измерения.

Метрологические характеристики средств измерений, применяемых при проведении эксперимента, представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Метрологические характеристики средств измерений

Наименование	Диапазон измерений	Цена деления	Погрешность
Промышленный лазерный анализатор размера аэрозольных частиц Winner319	1–2000 мкм	–	< 3% (для сертифицированного стандартного образца D50)
Секундомер Electronika RI-01	0 ч 00 мин 00 с – 9 ч 59 мин 59,99 с	0,01 с	$\pm (9,6 \cdot 10^{-6} \cdot T_{\text{изм.}} + 0,01 \text{ с})$
Манометр МВПЗ-Ум-1,5-M20×1,5	0–1000 кПа	5 кПа	$\pm 1,5 \% (\pm 15 \text{ кПа})$

Для определения размера капель применялся промышленный анализатор размера частиц аэрозолей Winner319 (размещается в позициях 1 и 2 на рисунке 2), принцип действия которого основан на оптических измерениях спектра рассеяния групп частиц и компьютерной обработке данных⁸. Программное обеспечение автоматически производит расчет распределения капель по размерам и формирует отчет в виде протокола испытаний (рис. 3).

В первой части протокола испытаний анализатора размера частиц Winner319 приводятся все основные характеристики распыла: проценты среднеобъемного диаметра капель $D[4,3]$ (V10, V50, V90), проценты среднего арифметического диаметра капель $D[1,0]$ (N10, N50, N90), среднее арифметическое диаметров всех капель $D[1,0]$ (Number Average Diameter, NAD), средневзвешенный на площадь поверхности диаметр $D[3,2]$ (SMD) и средневзвешенный на объем диаметр $D[4,3]$ (Volume-weighted Average Diameter, VAD). Также приводятся такие расчетные параметры, как вычисляемый по формуле (4) относительный разброс капель (Relative Span, R.S.)⁹ и соотношение медиан N50/V50¹⁰.

$$R.S. = (V90 - V10) / V50. \quad (4)$$

В второй части протокола испытаний приводятся частотное (интервальное) и кумулятивное (иначе – интегральное) распределение капель по размерам. Гистограмма и таблица частотного распределения показывают долю капель из определенного интервала размеров в общем объеме (V%). Кумулятивное распределение капель (графическая кривая) позволяет увидеть, какой процент от общего объема измеренных капель ($\Sigma V\%$) имеет диаметр больше или меньше выбранного значения.

Для характеристики размеров образуемых капель при проведении исследований применялись проценты среднеобъемного диаметра капель $D[4,3]$ (V10, V50, V90).

⁸ Промышленный лазерный анализатор размера аэрозольных частиц Winner319: руководство по эксплуатации / Jinan Winner Particle Instrument Stock Co. Ltd. – Jinan: Winner Particle Instrument Stock, 2023. – 20 с.

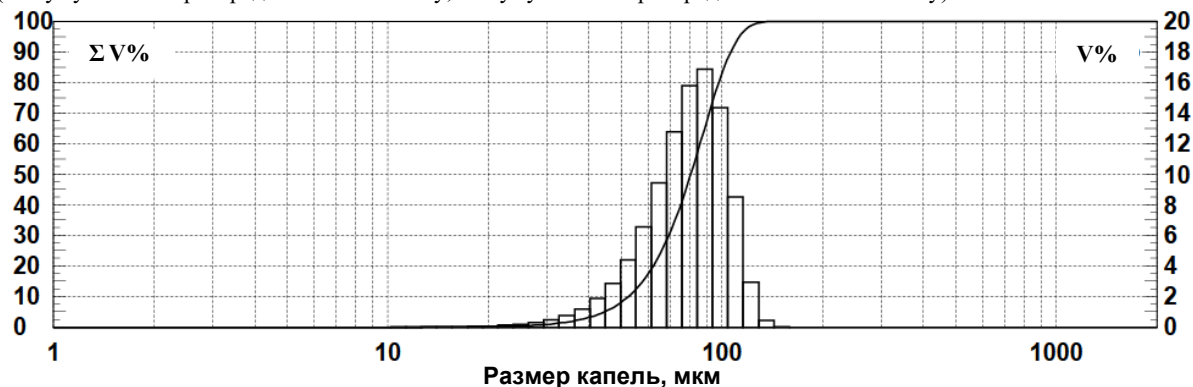
⁹ Относительный разброс указывает на равномерность распределения капель по размерам. Чем меньше относительный разброс, тем более однородны размеры капель.

¹⁰ Соотношение N50/V50 характеризует полидисперсность, т.е. ширину распределения капель по размерам. N50 очень чувствителен к мелким каплям, а V50 – к крупным. Если $N50 \approx V50$ (отношение близко к 1), то система монодисперсная и все частицы примерно одинакового размера. Если $N50 \ll V50$ (отношение значительно меньше 1), то система полидисперсная и в образце много мелких капель, но основной объем занимают крупные.

Результаты анализа

V10 = 52,304 мкм	V50 = 80,579 мкм	V90 = 106,661 мкм	VAD = 79,901 мкм
N10 = 15,707 мкм	N50 = 49,902 мкм	N90 = 86,303 мкм	NAD = 50,666 мкм
R.S. = 0,675	N50/V50 = 0,619	SMD = 73,201	

(V: кумулятивное распределение по объему, N: кумулятивное распределение по количеству)



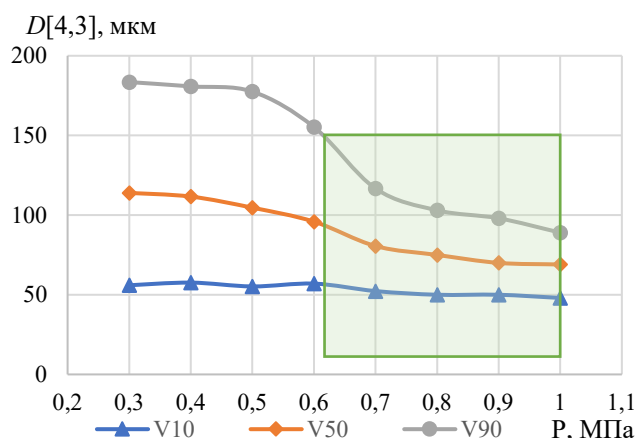
d (мкм)	V%	Σ V%	d (мкм)	V%	Σ V%	d (мкм)	V%	Σ V%
1,111	0,000	0,000	6,017	0,000	0,001	32,582	0,475	1,284
1,235	0,000	0,000	6,687	0,000	0,001	36,209	0,750	2,035
1,373	0,000	0,000	7,432	0,001	0,002	40,241	1,182	3,216
1,525	0,000	0,000	8,259	0,001	0,003	44,721	1,850	5,066
1,695	0,000	0,000	9,179	0,002	0,005	49,701	2,870	7,936
1,884	0,000	0,000	10,201	0,003	0,008	55,234	4,386	12,322
2,094	0,000	0,000	11,337	0,005	0,012	61,384	6,549	18,872
2,327	0,000	0,000	12,599	0,007	0,020	61,384	9,424	28,295
2,586	0,000	0,000	14,002	0,012	0,032	75,815	12,785	41,080
2,874	0,000	0,000	15,561	0,019	0,050	84,256	15,804	56,884
3,194	0,000	0,000	17,294	0,030	0,080	93,637	16,877	73,761
3,550	0,000	0,000	19,219	0,047	0,127	104,063	14,329	88,090
3,945	0,000	0,000	21,359	0,075	0,202	115,649	8,518	96,609
4,384	0,000	0,000	23,737	0,119	0,321	128,526	2,931	99,540
4,872	0,000	0,000	26,380	0,189	0,510	142,836	0,441	99,981
5,415	0,000	0,000	29,317	0,300	0,809	158,740	0,019	100,000

V10, V50, V90 и VAD – проценти (10, 50, 90 %) и значение среднеобъемного диаметра капель $D[4,3]$;
 N10, N50, N90 и NAD – проценти (10, 50, 90 %) и значение среднеарифметического диаметра капель $D[1,0]$;
 SMD – средневзвешенный на площадь поверхности диаметр $D[3,2]$;
 R.S. – относительный разброс капель (см. (4))

Рисунок 3. – Часть протокола испытаний анализатора частиц Winner319 при рабочем давлении 0,7 МПа

Исследования проводились с использованием разработанного пленкообразующего огнетушащего состава V3 [1] и трех его аналогов: ПО-6РТС (Россия), ПО-6РТФ (Россия), барьер-пленкообразующего 3 НС (Беларусь). Результаты проведенных исследований представлены на рисунке 4 (здесь зеленым цветом отмечена область давления перед оросителем, при котором размер 90 % диспергируемых капель меньше 150 мкм).

Из рисунка видно, что размер капель разработанного пленкообразующего огнетушащего состава V3 при подаче его через ороситель тонкораспыленной воды «Бриз9/К16» снижается по мере повышения давления. При этом для образования факела распыла с размером капель менее 150 мкм давление перед оросителем должно быть от 0,6 до 1,0 МПа, что соответствует его рабочим характеристикам. В соответствии с NFPA 750 данная установка пожаротушения тонкораспыленной водой будет являться установкой низкого давления (менее 1,21 МПа).

Рисунок 4. – Зависимости среднеобъемного диаметра капель $D[4,3]$ процентов V10, V50 и V90 от давления перед оросителем

Проведение натурных испытаний и их результаты. С целью возможности сопоставления результатов лабораторных и натурных испытаний интенсивность орошения принята как при лабораторных исследованиях – $0,059 \pm 0,002 \text{ дм}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ [1]. Согласно паспортным данным средняя интенсивность орошения оросителя «Бриз9/К16» составляет примерно $0,055 \text{ дм}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ при давлении 0,6 МПа (табл. 1). Для обеспечения принятой интенсивности орошения $0,059 \pm 0,002 \text{ дм}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ экспериментально установлено, что давление перед оросителем необходимо увеличить с 0,6 до 0,8 МПа. После определения необходимого минимального рабочего давления перед оросителем были проведены натурные испытания в соответствии с методикой, изложенной в работах [5; 6]. В таблице 3 представлены исследованные огнетушащие составы, фактическая интенсивность орошения, время тушения модельного очага пожара подкласса В1, а также наличие повторного воспламенения очага. Очередность испытания огнетушащих составов была установлена случайным образом. Для каждого огнетушащего состава проведено три натурных испытания.

Таблица 3. – Результаты натурных испытаний огнетушащих составов

Наименование состава	ПО-6РТС	ПО-6РТФ	Барьер-пленкообразующий ЗНС	Огнетушащая композиция V3 [1]
Производитель	Российская Федерация	Российская Федерация	ООО «Сплендор», Республика Беларусь	УГЗ*, Республика Беларусь
Рабочая концентрация, %	6	6	3	6
Интенсивность орошения, л/(с·м²)	0,061	0,059	0,060	0,059
Время тушения, с	136±9	91±8	73±5	45±4
Повторное воспламенение	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует

Примечание. * Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь».

Процесс тушения модельного очага пожара исследуемыми составами фиксировался с помощью видеокамеры и представлен в виде интервальной раскладки по 30 с на рисунке 5.

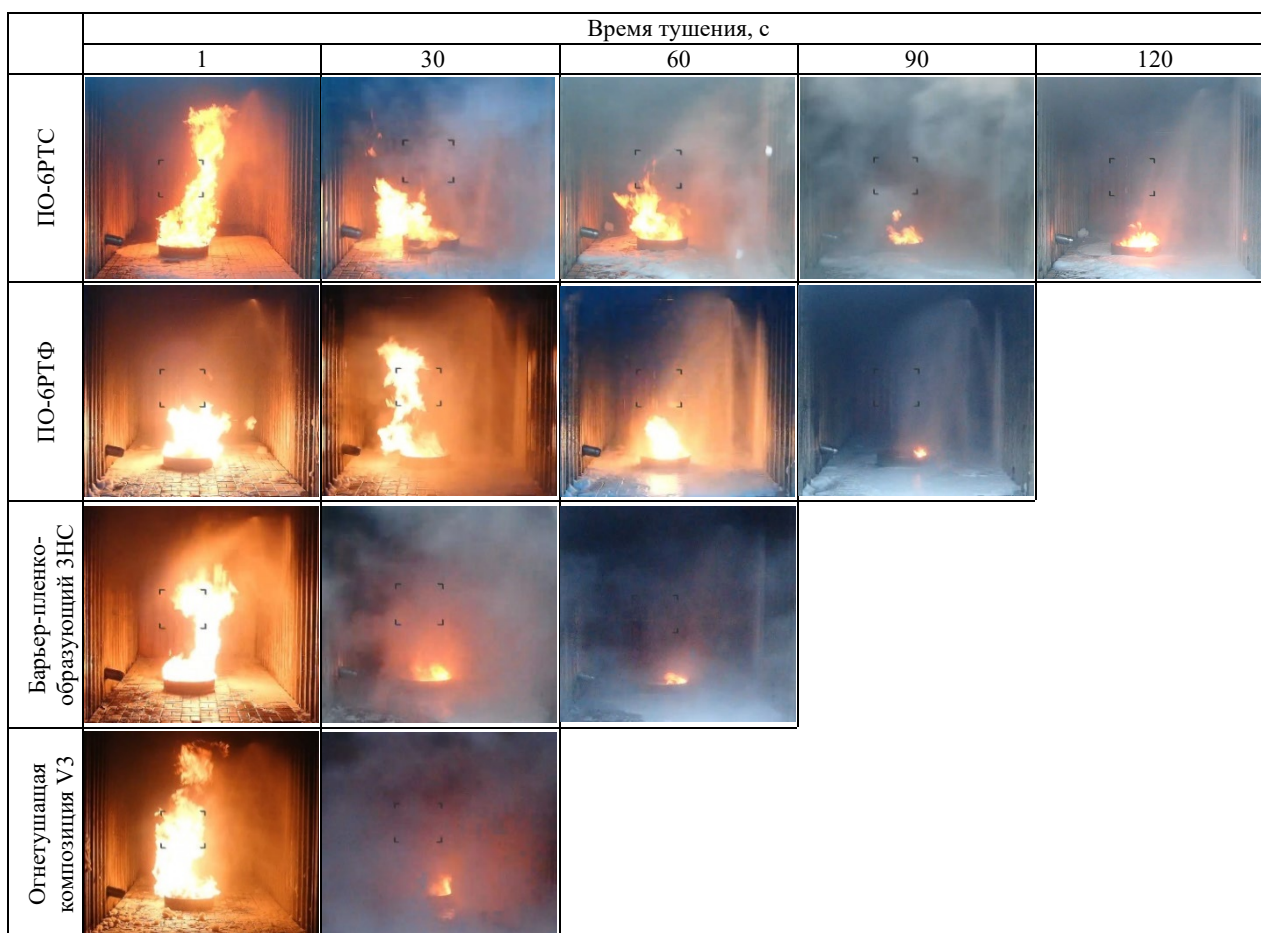


Рисунок 5. – Раскадровка тушения модельного очага пожара различными огнетушащими составами

Согласно проведенным натурным испытаниям наименьшее время тушения модельного очага пожара 45 ± 4 с достигнуто при использовании огнетушащей композиции V3. При использовании пенообразователя «Барьер-пленкообразующий ЗНС» очаг пожара был потушен за 73 ± 5 с, а ПО-6РТФ за 91 ± 8 с, что на 38 и 51 % соответственно дольше по сравнению с огнетушащей композицией V3. Наибольшее время тушения модельного очага пожара составило 136 ± 12 с при применении ПО-6РТС.

Средняя температура на высоте 0,7 м над очагом пожара в процессе тушения модельного очага пожара фиксировалась с помощью термопары. Полученные результаты представлены на рисунке 6.

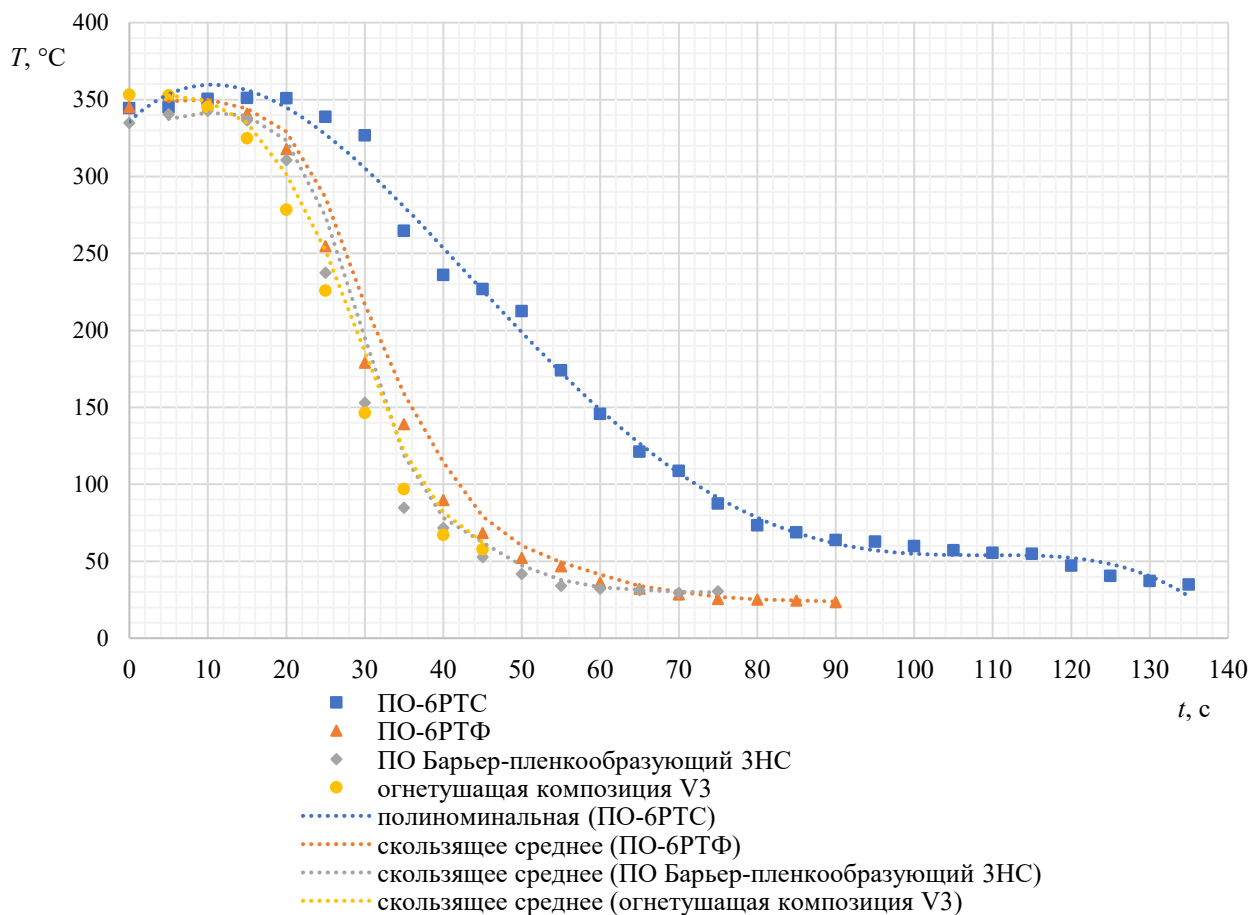


Рисунок 6. – Изменение температуры на высоте 0,7 м над очагом пожара в процессе тушения

Здесь видно, что температура над очагом пожара в процессе тушения пленкообразующими огнетушащими составами (кроме ПО-6РТС) изменяется практически идентично, т.е. исследуемые композиции одинаково хорошо справляются с охлаждением зоны горения. Тем не менее фактическое время ликвидации горения модельного очага пожара заметно отличаются (табл. 4). В частности, разработанный пленкообразующий огнетушащий состав V3 в сравнении с остальными огнетушащими составами позволяет сократить время тушения при одинаковой интенсивности орошения защищаемой зоны, что свидетельствует о его более высокой огнетушащей эффективности.

Заключение

Разработана методика эксперимента и определено влияние рабочего давления перед розеточным оросителем тонкораспыленной воды «Бриз9/К16» на размер капель в факеле распыла. Установлено, что применение ранее разработанного пленкообразующего огнетушащего состава V3 (с оптимизированным по времени тушения соотношением компонентов) позволяет получить диаметр капель размером менее 150 мкм при давлении перед оросителем от 0,6 до 1,0 МПа.

Проведены натурные испытания четырех огнетушащих составов: огнетушащей композиции V3, ПО-6РТС (Россия), ПО-6РТФ (Россия), барьер-пленкообразующего ЗНС (Бела-

реть). В результате натурных испытаний установлено, что применение разработанной огнетушащей композиции V3 снижает время тушения модельного очага пожара подкласса В1 не менее чем на 38 % по сравнению с остальными огнетушащими составами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, И.Ю. Пленкообразующий огнетушащий химический состав для автоматических установок пожаротушения, подаваемый методом распыления / И.Ю. Иванов, О.Д. Навроцкий // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2025. – Т. 9, № 2. – С. 167–183. – DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-2.167. – EDN: DHEWVG.
2. Горовых, О.Г. Проблемные вопросы определения дисперсности капель водных огнетушащих веществ / О.Г. Горовых, И.А. Шмулевцов, С.В. Бобрышева // Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса в АПК: доклады Международной научно-практической конференции, посвященной 55-летию со дня образования БГАТУ и 100-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора В.П. Суслова, Минск, 15–18 апреля 2009 г.: в 2 ч. – Мн.: БГАТУ, 2009. – Ч. 2. – С. 118–122.
3. Jennings, B.R. Particle size measurement: the equivalent spherical diameter / B.R. Jennings, K. Parslow // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. – 1988. – Vol. 419, No. 1856. – P. 137–149. – DOI: 10.1098/rspa.1988.0100.
4. Роул, А. Основные принципы анализа размеров частиц: техническая аннотация / А. Роул. – Malvern Instruments Limited. 2009. – URL: <https://pel.spb.ru/articles/osnovnie-principi-analisa-razmerov-chastic/> (дата обращения: 11.12.2025).
5. Камлюк, А.Н. Экспериментальное определение эффективности тушения пожара класса В пеной низкой кратности, генерируемой розеточными оросителями / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов, А.В. Грачулин // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 3. – С. 251–264. – DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-3.251. – EDN: EPIYWF.
6. Камлюк, А.Н. Комплексная методология оценки эффективности пожаротушения с помощью пены, основанная на качестве пожаротушения и экономической целесообразности / А.Н. Камлюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2026. – Т. 10, № 1. – С. 87–106. – DOI: 10.33408/2519-237X.2026.10-1.87. – EDN: IUDJGC.

**Натурные испытания огнетушащих составов, подаваемых на тушение
путем мелкодисперсного распыления**

Field tests of fire extinguishing compositions delivered for extinguishing by fine spraying

Иванов Игорь Юрьевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: igor.ivanovwork8@gmail.com

SPIN-код: 3880-5485

Igor Yu. Ivanov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic System Security,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: igor.ivanovwork8@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1072-2432

Навроцкий Олег Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: Oleg.Navrotsky@gmail.com

SPIN-код: 4031-1141

Oleg D. Navrotskiy

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic System Security,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: Oleg.Navrotsky@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4137-2519

Лихоманов Алексей Олегович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: alexlikh20@gmail.com

SPIN-код: 1837-8150

Aleksey O. Likhomanov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic System Security,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: alexlikh20@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9374-1486

ScopusID: 57210911673

Гараев Юрий Владимирович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности,
преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: y.garaev@icloud.com

SPIN-код: 8162-6836

Yuriy V. Garaev

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic System Security,
Lecturer

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: y.garaev@icloud.com

ORCID: 0000-0002-4980-2712

FIELD TESTS OF FIRE EXTINGUISHING COMPOSITIONS DELIVERED FOR EXTINGUISHING BY FINE SPRAYING

Ivanov I.Yu., Navrotskiy O.D., Likhomanov A.O., Garaev Yu.V.

Purpose. To develop an experimental methodology and study the effect of the operating pressure before a finely atomized water spray nozzle on the droplet size in the spray cone using the previously developed film-forming fire extinguishing agent V3. To conduct field tests to determine the extinguishing time of a model fire of a water-insoluble flammable liquid using the developed film-forming fire extinguishing agent and commercially available analogs.

Methods. Droplet size in the flow was measured instrumentally using a Winner 319 industrial aerosol particle size analyzer, which operates using laser diffraction. Extinguishing times for fire extinguishing agents were determined experimentally, and the experimental data were processed using the uncertainty estimation and expression method.

Findings. A method for measuring the droplet size of water-based fire extinguishing agents applied by spraying has been developed. Droplet sizes of the previously developed film-forming fire extinguishing agent V3 (with a component ratio optimized for extinguishing time) were measured when applied through a Briz9/K16 fine-mist sprinkler. It was found that to form a spray cone with droplet diameters smaller than 150 µm using the specified Briz9/K16 sprinkler, the V3 film-forming fire extinguishing agent must be supplied under an operating pressure of 0.6 to 1.0 MPa. Field tests were conducted on extinguishing a model Subclass B1 fire using four fire extinguishing agents: the V3 fire extinguishing composition, PO-6RTS (Russia), PO-6RTF (Russia), and the film-forming barrier 3 NS (Belarus). The use of the developed V3 fire extinguishing composition was found to reduce the extinguishing time of a model Subclass B1 fire by at least 38 % compared to similar products.

Application field of research. The developed methodology for studying the physical parameters of dispersed droplets from a deflector sprinkler of finely atomized water can be applied in the development of domestic regulatory legal acts for studying the parameters of the spray torch of deflector sprinklers used in automatic fire extinguishing systems.

Keywords: sprinkler, droplet size, extinguishing efficiency, extinguishing time, automatic fire extinguishing system, field tests.

(The date of submitting: January 28, 2026)

REFERENCES

1. Ivanov I.Yu., Navrotskiy O.D. Plenkoobrazuyushchiy ognnetushashchiy khimicheskiy sostav dlya avtomaticheskikh ustanovok pozharotusheniya, podavaemyy metodom raspyleniya [Film-forming fire extinguishing chemical composition for automatic fire extinguishing systems, supplied by spraying]. *Journal of Civil Protection*, 2025. Vol. 9, No. 2. Pp. 167–183. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-2.167. EDN: DHEWVG.
2. Gorovykh O.G., Shmulevtsov I.A., Bobrysheva S.V. Problemnye voprosy opredeleniya dispersnosti kapel' vodnykh ognnetushashchikh veshchestv [Problematic issues of determining the dispersion of droplets of water fire extinguishing agents]. *Proc. of Intern. scientific-practical conf. dedicated to the 55th anniversary of the founding of BSATU and the 100th anniversary of the birth of Grand PhD in technical sciences, professor V.P. Suslov «Opyt, problemy i perspektivy razvitiya tekhnicheskogo servisa v APK»*. In 2 parts. Minsk: Belarusian State Agrarian Technical University, 2009. Part 2. Pp. 118–122. (rus)
3. Jennings B.R., Parslow K. Particle size measurement: the equivalent spherical diameter. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1988. Vol. 419, No. 1856. Pp. 137–149. DOI: 10.1098/rspa.1988.0100.
4. Rawle A. *Basic of principles of particle-size analysis: technical note*. Malvern Instruments Limited, 2009. (rus). URL: <https://pel.spb.ru/articles/osnovnie-principi-analisa-razmerov-chastich/> (date of access: December 11, 2025).
5. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Grachulin A.V. Eksperimental'noe opredelenie effektivnosti tusheniya pozhara klassa B penoy nizkoy kratnosti, generiruemy rozetochnymi orositelyami [Experimental determination of the Class B fire extinguishing efficiency using low-expansion foam generated by deflector type sprinklers]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 3. Pp. 251–264. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-3.251. EDN: EPIYWF.

6. Kamlyuk A.N. Kompleksnaya metodologiya otsenki effektivnosti pozharotusheniya s pomoshch'yu peny, osnovannaya na kachestve pozharotusheniya i ekonomicheskoy tselesoobraznosti [A comprehensive methodology for assessing the effectiveness of fire suppression with foam based on the quality of fire suppression and economic feasibility]. *Journal of Civil Protection*, 2026. Vol. 10, No. 1. Pp. 87–106. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2026.10-1.87. EDN: IUDJGC.

Copyright © 2026 Ivanov I.Yu., Navrotsky O.D., Likhomanov A.O., Garaev Yu.V.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭЛЕКТРОКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ Ni-Co И Ni-Co-P ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рева О.В., Врублевский А.В.

Цель. Изучить закономерности и определить оптимальные условия гидрометаллургического синтеза защитных и упрочняющих покрытий из сплавов Ni-Co и Ni-Co-P для модификации поверхности деталей аварийно-спасательного оборудования.

Методы. Гравиметрия, вольтамперометрия, рентгеноспектральный анализ.

Результаты. Определено, что в диапазоне плотностей тока ($1-6 \text{ А/дм}^2$) и интервале температур ($20-40^\circ\text{C}$) осаждение сплавов Ni-Co протекает без ограничений по толщине, что свидетельствует об отсутствии катодной пассивации. Для Ni-Co-P оптимальным для получения плотных бездефектных защитных пленок является осаждение сплава при комнатной температуре в диапазоне плотности тока $3-7 \text{ А/дм}^2$ со скоростью $30-60 \text{ мкм/ч}$. Содержание никеля в покрытиях можно варьировать в пределах $\sim 35-75 \text{ ат. \%}$; превалирующее влияние на содержание никеля в сплаве оказывает плотность катодного тока. Формирование сплава Ni-Co происходит с некоторой деполяризацией кобальта, в отсутствие предельных токов диффузии и пассивации катода. Для сплава Ni-Co-P наблюдается существенная деполяризация как кобальта, так и никеля, за счет дополнительного восстановления их гипофосфитом, что существенно увеличивает скорость формирования покрытия по сравнению с Ni-Co.

Область применения исследований. Защита от износа и коррозии, повышение устойчивости к ударным и термическим нагрузкам, трению, деформации деталей из низкоуглеродистых сталей.

Ключевые слова: композиционные упрочняющие покрытия, электрохимическое осаждение защитных пленок, преодоление катодной пассивации, условия сплавообразования, управляемое регулирование содержания компонентов.

(Поступила в редакцию 29 января 2026 г.)

Введение

Аварийно-спасательное оборудование эксплуатируется в достаточно жестких условиях (высокие температуры и резкие их перепады, удары, вибрация, воздействие агрессивных жидкостей и газов), вследствие чего подвержено активному механическому износу и коррозии. Наиболее уязвимы лопатки, рабочие колеса, подшипники, валы и кулачковые передачи вакуумных затворов пожарных насосов; резьбовые соединения водопенных коммуникаций и стволов; механизм спускового крючка, редукционные клапаны и пневмораспределитель выстрела ствола в ранцевых установках пожаротушения; зубчатые передачи барабанов лебедок и др. Изготовление большого количества деталей из химически стойких твердых материалов (высоколегированных нержавеющей сталей, бериллиевой бронзы, никеля, хрома, титана, их сплавов) экономически нецелесообразно, поэтому проблема повышения устойчивости к ударным и термическим нагрузкам, трению, деформации деталей лебедок, подъемников, насосов, распылителей, узлов трения может быть решена нанесением защитных покрытий из жаропрочных твердых сплавов, которые при относительно небольших толщинах ($30-70 \text{ мкм}$) в несколько раз увеличивают срок службы ответственных механизмов.

В настоящий момент известно много способов нанесения защитных металлических покрытий: погружение в расплав олова, алюминия, свинца, цинка; вакуумное, газофазное и электродуговое напыление или наплавка; горячее прессование фольги и металлических порошков; химическое или гальваническое осаждение из водных растворов [1–3]. Каждый из этих методов имеет свои ограничения (например, по толщине покрытий или форме обрабатываемых деталей), достоинства и недостатки.

Так, высокотемпературные методы ограничены по химическому и фазовому составу получаемых материалов; при вакуумном напылении металлов не обеспечивается изотропия физико-механических свойств и стойкость покрытий к ударным нагрузкам. Методы порошковой металлургии характеризуются возможностью создания уникальных композиций

(псевдосплавов), тугоплавких и высокотвердых, отличаются высокой точностью размеров деталей, которые не требуют механической доводки. Главные недостатки этого метода: высокая стоимость порошков и оборудования, необходимость использования инертной атмосферы при спекании, ограничения по размеру деталей и возможность остаточной пористости, снижающей надежность ответственных деталей.

Недостатки гидрометаллургических (химического и электрохимического) способов нанесения покрытий заключаются в возможности водородного охрупчивания за счет параллельного восстановления водорода и включения его в покрытие, зависимости качества получаемого слоя от условий подготовки поверхности и постепенного подкисления или подщелачивания электролита в процессе работы, отслоении или растрескивании покрытия из-за накопления внутренних напряжений, возможности включения в покрытие неметаллических компонентов (в основном продуктов неполного восстановления металлов) [3–12]. Однако данные недостатки путем целенаправленного регулирования скорости и полноты процессов, протекающих на поверхности кристаллизующегося из раствора металла (адсорбции, разрушения сольватной оболочки, восстановления различных комплексных форм, гидролиза, ступенчатого восстановления многозарядных ионов и др.), превращаются в возможность варьирования в широких пределах химического и фазового состава осаждаемых покрытий и дозированного включения в них упрочняющих наночастиц неметаллической природы, что обеспечивает возможность сочетания обычно плохо совместимых физико-механических свойств металлических материалов (твердости с ударопрочностью и способностью к пайке и сварке) и обеспечения высоких физико-механических характеристик [3–12].

Гидрометаллургический синтез металлов и сплавов не требует применения сложного оборудования, вакуумирования, высоких температур; обеспечивает равномерность толщины покрытий на деталях сложной формы; а также предоставляет возможность низкоэнергетического синтеза композиционных материалов необычного фазового состава, не совпадающего с металлургическими аналогами, с изотропными свойствами, и включением нано- или микро-размерной неметаллической составляющей [7–12].

Однако в области совместного осаждения металлов из растворов с формированием двойных и тройных сплавов с регулируемым химическим и фазовым составом все еще имеется много нерешенных проблем. К наиболее трудным и актуальным из них относится воспроизводимость синтеза покрытий с регулируемыми характеристиками, для чего необходимо обеспечить не только совместное восстановление на катоде нескольких катионов, но и упорядоченное формирование кристаллической решетки, где скорости зародышеобразования и роста зародышей примерно равны. Это может быть достигнуто регулированием концентрации комплексных катионов в электролите и величин перенапряжения их разряда на катоде [3–17]. В тех случаях, когда соосаждающиеся металлы способны образовывать твердый раствор или химическое соединение в результате сплавообразования, может происходить самопроизвольное сближение потенциалов их восстановления [4; 6; 12; 16].

Электродные потенциалы кобальта и никеля достаточно близки:

$$E(\text{Co}/\text{Co}^{2+}) = -0,28 \text{ В}; \quad E(\text{Ni}/\text{Ni}^{2+}) = -0,23 \text{ В},$$

что обеспечивает их эффективное соосаждение в сплав и не требует создания электролитов сложного комплексного состава. Так как эти металлы имеют близкую кристаллическую структуру (гранцентрированную кубическую решетку) и взаимно растворяются друг в друге, фазовый состав сплавов никель-кобальт (Ni-Co) в основном включает твердые растворы никеля и кобальта или эвтектические смеси, где оболочкой бикристаллитов выступает никель; но в присутствии легирующих добавок совместно с металлами могут кристаллизоваться и другие фазы, такие как карбиды, фосфиды или интерметаллиды, что существенно повышает твердость и износостойкость покрытий [4; 8; 11; 12; 18].

Наиболее часто в литературных источниках для электрохимического осаждения сплавов никеля и кобальта встречаются сульфатные электролиты, хотя предлагаются также хлоридные, сульфаматные, фторборатные, цитратные, тартратные, малонатные и другие [3; 6; 8; 12; 13; 19; 20]. Многие из них содержат выравнивающие органические добавки (тиомочевина и ее производные, сероуглерод, тиосемикарбазид, роданиды и др.) для получения зеркальных и полублестящих покрытий. В основном авторами уделяется внимание влиянию состава электролита и условий электролиза на магнитные свойства сплава, определяемые соотношением никеля и кобальта; и только в незначительном количестве работ изучены химическая стойкость, твердость и жаропрочность получаемых материалов, которые имеют приоритетное значение для деталей пожарного аварийно-спасательного оборудования.

Формирование тройного гальваносплава Ni-Co-P (в присутствии гипофосфитов натрия или калия) изучено в значительно меньшей степени [21–24], несмотря на то что включение соединений фосфора обычно заметно увеличивает твердость и жаропрочность металлов [18]. В ряде работ для систем Ni-Co и Ni-Co-P отмечается аномальное увеличение скорости восстановления более электроотрицательного кобальта и одновременное уменьшение скорости восстановления более электроположительного никеля [24], а также повышенный выход по току, снижение наводороживания покрытия сверх ожидаемого и уменьшение внутренних напряжений, что пока не находит четких объяснений и нуждается в проведении дополнительных исследований.

С учетом вышеизложенного цель работы состояла в изучении закономерностей и определении оптимальных условий гидрометаллургического синтеза защитных и упрочняющих покрытий из сплавов Ni-Co и Ni-Co-P для модификации поверхности деталей аварийно-спасательного оборудования. Для чего требовалось выявить граничные условия кристаллизации данных сплавов без ограничений по толщине с минимизацией побочных процессов и в отсутствие катодной пассивации из наиболее простого по комплексному составу электролита с высокой буферной емкостью.

Основная часть

Методы исследования. В качестве подложки использовали пластины из низкоуглеродистой стали Ст 3, широко применяющейся в машиностроении. Перед нанесением покрытия пластины обезжиривали в растворе состава: Na_3PO_4 – 0,18 моль/дм³, Na_2CO_3 – 0,28 моль/дм³, синтанол – 2 г/дм³ при 40–50 °С в течение 3–5 мин при температуре 30 °С последующей промывкой теплой проточной водой; после чего подложки протравливали при комнатной температуре в смеси $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}$ 1:1:3 по объему; в течение 2–5 мин с последующей проточной промывкой.

Электрохимическое осаждение сплавов проводили из сульфатного электролита следующего состава: $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,7 моль/дм³, $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,1 моль/дм³, NaCl – 0,25 моль/дм³, H_3BO_3 – 0,4 моль/дм³ при температурах 20–40 °С. Электролит готовили растворением солей никеля и кобальта отдельно в буферном растворе комплексообразователей с последующим осторожным сливанием. Гипофосфит натрия $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ в количествах 0,095–0,28 моль/дм³ добавляли последним в виде раствора. По мере работы электролиты корректировали по кобальту и гипофосфиту. Уровень pH электролита составлял ~3,5–4,5. В процессе нанесения покрытия электролит в гальванованне перемешивался с помощью магнитной мешалки с частотой 4–5 Гц.

Толщину покрытий оценивали весовым методом по приросту массы после окончания осаждения покрытий, принимая плотность покрытий равной 8,9 г/см³ (Co, Ni), поскольку включения неметаллической фазы весьма незначительны. Взвешивание производили на аналитических весах СЕ224-С с погрешностью ±0,02 мг. Толщину осажденных покрытий l_n (мкм) рассчитывали по формуле:

$$l_n = \frac{\Delta m \cdot 10^4}{\rho \cdot S}, \quad (1)$$

где Δm – масса осажденного металла, г;
 ρ – плотность сплава Ni-Co, г/см³;
 S – площадь поверхности образца, см²;
 10^4 – коэффициент перевода см в мкм.

Скорость осаждения покрытий V (мкм/ч) определяли по формуле:

$$V = l_n / t, \quad (2)$$

где t – время осаждения металла, ч.

Электрохимические измерения проводили в трехэлектродной ячейке, включающей платиновый вспомогательный электрод и хлорсеребряный электрод сравнения (ХСЭ): $E^0 = +0,202$ В относительно стандартного водородного электрода. Циклические поляризационные кривые записывали в потенциодинамическом режиме с использованием потенциостата ПИ 50-1 с программатором ПР-8. Скорость развертки составляла 20 мВ/с, что обычно рекомендуется в литературе для подобных исследований. Регистрацию потенциодинамических кривых осуществляли с помощью лабораторного двухкоординатного самописца ЛКД 4-003.

При записи циклических поляризационных кривых в электролитах (индивидуального осаждения компонентов и совместного осаждения сплавов Ni-Co и Ni-Co-P) рабочая поверхность всех электродов составляла $0,5 \text{ см}^2$; нерабочие участки изолировали химически стойким лаком. Все измерения проводили при температуре $19 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ при перемешивании раствора магнитной мешалкой. Для каждого опыта брали новую порцию раствора в количестве 50 мл. Опыты повторяли по 3–5 раз, каждый раз используя новый электрод. Все потенциалы приведены относительно стандартного хлорсеребряного электрода.

Элементный состав покрытий определяли методом электронно-зондового рентгено-спектрального анализа на рентгеновском микроанализаторе (EDX) типа RONTec, являющегося приставкой к электронному микроскопу LEO-1420, глубина индентирования – 3 мкм.

Результаты и обсуждение. При изучении зависимости скорости осаждения покрытий Ni-Co от различных факторов было установлено, что с ростом плотности тока происходит устойчивое увеличение скорости осаждения и толщины покрытий во всем изученном диапазоне температур ($T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_3 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$). Замедление осаждения пленок сплава начинается при $3\text{--}6 \text{ А/дм}^2$ – точки перегиба на кривых (рис. 1), что соответствует классическим закономерностям синтеза гальванопокрытий и связано с интенсификацией выделения водорода и продуктов неполного восстановления никеля и кобальта. Экспериментально были определены оптимальные диапазоны плотностей тока при различных температурах электролита: при $T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ допустимая плотность катодного тока составила $j_1 = 0,5\text{--}2,5 \text{ А/дм}^2$, при $T_2 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ допустимый диапазон расширяется $j_2 = 1\text{--}4,5 \text{ А/дм}^2$, соответственно, при $T_3 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ оптимальный диапазон смещается в сторону больших плотностей тока $j_2 = 2,0\text{--}6,0 \text{ А/дм}^2$.

Скорость роста покрытий достигает $30\text{--}60 \text{ мкм/ч}$ в зависимости от температуры электролита, но при достижении порогового значения плотностей тока покрытие не только осаждается существенно медленнее, но и становится визуальнее более рыхлым, включает темные вкрапления оксо- и гидроксосоединений кобальта или никеля, наблюдается питтинг и охрупчивание покрытия. По всей вероятности, это вызвано тем, что при плотности тока выше оптимальной скорость диффузии гидратированных ионов металлов преобладает над скоростью их десольватации и восстановления, и соответственно, происходит рост количества продуктов неполного восстановления металлов на поверхности катода, формирование которых тормозит осаждение сплава (рис. 1).

Таким образом, для исследованного сульфатного электролита осаждения сплава Ni-Co оптимальным представляется диапазон плотностей тока $1\text{--}6 \text{ А/дм}^2$.

Исследование зависимости скорости осаждения покрытий от времени синтеза при фиксированной плотности тока показало, что по мере утолщения покрытия не наблюдается замедления его осаждения, что часто характерно для гальваносплавов. В оптимальных областях плотностей тока при каждой температуре по мере роста покрытия толщина его увеличивается линейно при практически неизменной скорости (рис. 2). Таким образом, толщина защитных покрытий не лимитирована и может достигать 100 мкм и более, в зависимости только от длительности синтеза.

Скорость осаждения покрытий Ni-Co из сульфатного электролита достаточно высока и при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ достигает 30 мкм/ч при плотности тока 3 А/дм^2 ; при $40 \text{ }^\circ\text{C}$ – 60 мкм/ч при плотности тока $6\text{--}7 \text{ А/дм}^2$. Также из кривых, представленных на рисунке 2, следует, что для простого сульфатного электролита в изученном диапазоне температур при фиксированной плотности тока различия в скорости осаждения и толщине осаждаемых покрытий достаточно незначительные. Таким образом, состав, и как следствие – микроструктура

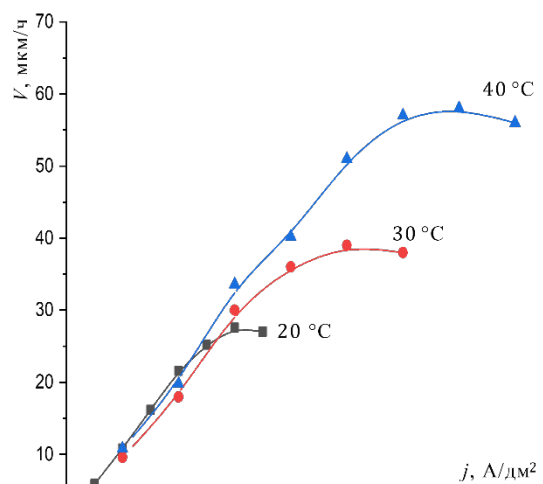


Рисунок 1. – Зависимость скорости осаждения Ni-Co покрытий от плотности катодного тока при разных температурах электролита

и физико-механические свойства полученного защитного покрытия Ni-Co в большей степени должны определяться плотностью катодного тока, что отмечается во множестве работ по электрохимическому синтезу сплавов [3; 4; 6–12].

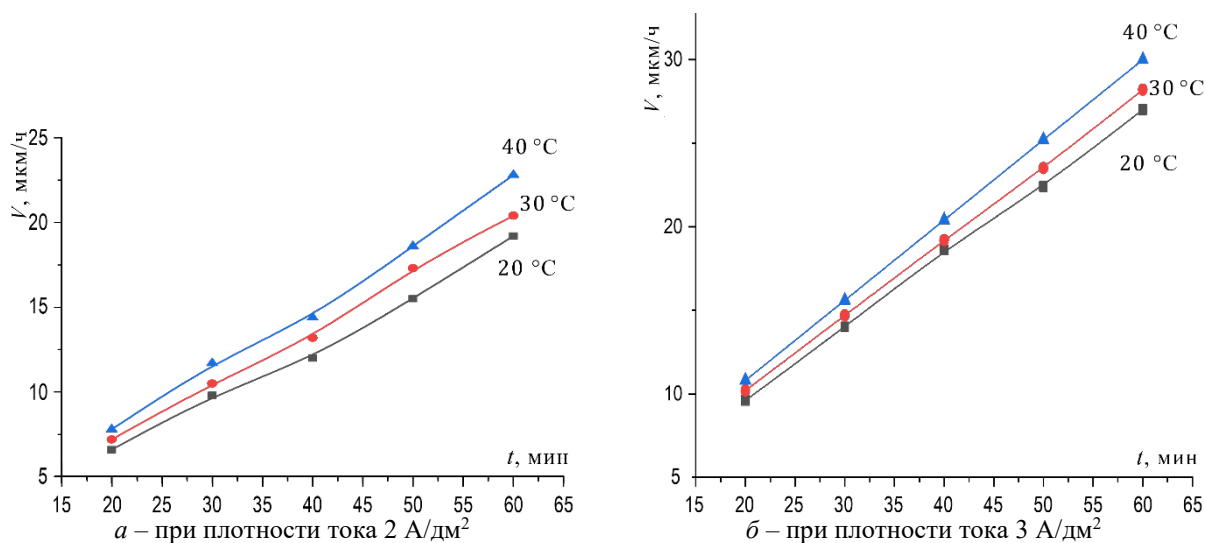


Рисунок 2. – Зависимость скорости осаждения покрытий Ni-Co от времени осаждения

В результате исследования количественного соотношения кобальта и никеля в покрытиях, синтезированных из сульфатного электролита, было установлено следующее. Вне зависимости от температуры электролита, во всех изученных случаях содержание в сплаве менее электроотрицательного компонента (никеля) растет с увеличением плотности катодного тока (табл. 1); в бездефектных плотных покрытиях Ni-Co содержание никеля можно варьировать в пределах 35–75 ат. %.

Таблица 1. Содержание никеля в покрытиях Ni-Co, полученных из сульфатного электролита, ат. %

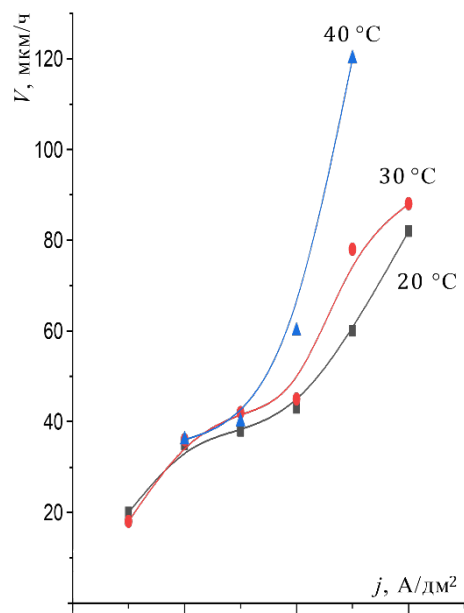
j , A/dm^2	20 °C	30 °C	40 °C
1	35,45	55,01	36,88
2	54,88	62,15	36,85
3	65,56	63,13	54,29
4		64,31	61,83
5		67,67	73,94
7			74,35

С ростом температуры электролита при фиксированной плотности тока концентрация никеля в покрытии сперва возрастает, но по достижении 40 °C несколько снижается, что коррелирует с результатами гравиметрических исследований. По всей вероятности, лимитирующей стадией кристаллизации является скорость роста определенных граней кристаллической решетки, а не скорость диффузии ионов никеля и кобальта, которые очень близки по размерам и массе.

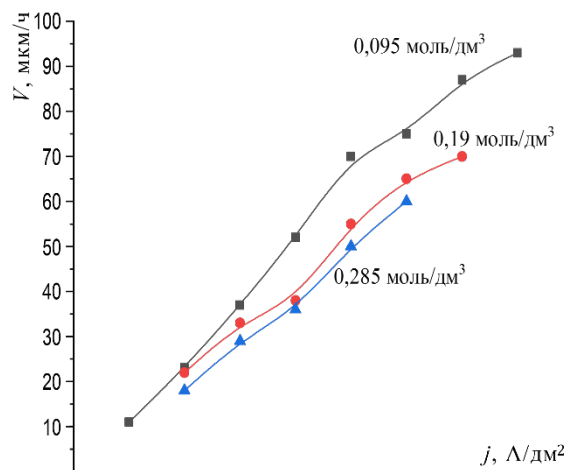
Таким образом, регулируя температуру электролита и в особенности плотность тока, из сульфатного раствора можно получать сплавы с заданным количеством легирующего компонента (никеля) в достаточно широком диапазоне: от 35 до 75 ат. %. Выход сплава по току составляет в среднем $\sim 92 \pm 2$ %, что с учетом процесса восстановления водорода для сплавов металлов подгруппы железа является достаточно высоким показателем.

При изучении зависимости скорости осаждения покрытий Ni-Co-P от различных факторов (плотность тока, температура электролита, концентрация гипофосфита натрия) было установлено, что так же как и для системы Ni-Co, с ростом плотности тока происходит устойчивое увеличение скорости осаждения и толщины покрытий в изученном диапазоне температур. Скорость осаждения защитных покрытий Ni-Co-P достаточно высока и достигает 110–120 $\mu\text{m/h}$ при 40 °C и плотности катодного тока 4–5 A/dm^2 (рис. 3а). При варьировании концентрации гипофосфита натрия в электролите (источника фосфора в покрытиях) установлено, что повышение его концентрации в электролите в 2 раза при фиксированной

температуре приводит практически к такому же снижению скорости осаждения, как и понижение температуры электролита на 10 °С (рис. 3б), что явно связано с интенсификацией выделения водорода при разложении NaH_2PO_2 .



а – при различных температурах с концентрацией NaH_2PO_2 0,19 моль/дм³



б – при комнатной температуре и различных концентрациях гипофосфита натрия

Рисунок 3. – Зависимость скорости осаждения покрытий Ni-Co-P от плотности тока

Следует отметить, что достижение точек перегиба на кривых $V(j)$, соответствующих замедлению электрокристаллизации металлов вследствие преимущественного формирования оксо-гидроксосоединений никеля и кобальта, не произошло ни при одной из изученных концентраций гипофосфита натрия: $C_1 = 0,095$ моль/дм³, $C_2 = 0,19$ моль/дм³, $C_3 = 0,28$ моль/дм³ во всем исследованном диапазоне температур (рис. 3) и плотностей катодного тока $j_0 = 0,5–8$ А/дм². Однако это не означает возможности высокоскоростного синтеза защитных покрытий: в определенный момент плотные полублестящие пленки резко охрупчиваются и осыпаются с поверхности катода в виде мелких чешуек вследствие активного наводороживания и роста внутренних напряжений.

Таким образом, для системы Ni-Co-P повышение как температуры электролита, так и концентрации в нем гипофосфита натрия приводит к снижению допустимой плотности тока. С учетом необходимости получения плотных бездефектных покрытий с незначительными внутренними напряжениями при $T_1 = 20$ °С допустимая плотность катодного тока находится в диапазоне $j_1 = 0,5–6$ А/дм², при $T_2 = 30$ °С – $j_2 = 1–6$ А/дм², соответственно, при $T_3 = 40$ °С допустимый диапазон еще меньше $j_3 = 1–5$ А/дм². Оптимальным для получения плотных бездефектных защитных пленок является осаждение сплава при комнатной температуре в диапазоне плотности тока 3–7 А/дм².

В диапазоне оптимальных плотностей тока повышение концентрации NaH_2PO_2 в растворе приводит к увеличению скорости кристаллизации сплава Ni-Co-P (рис. 4), что, очевидно, вызвано дополнительным восстановлением ионов металлов гипофосфитом натрия.

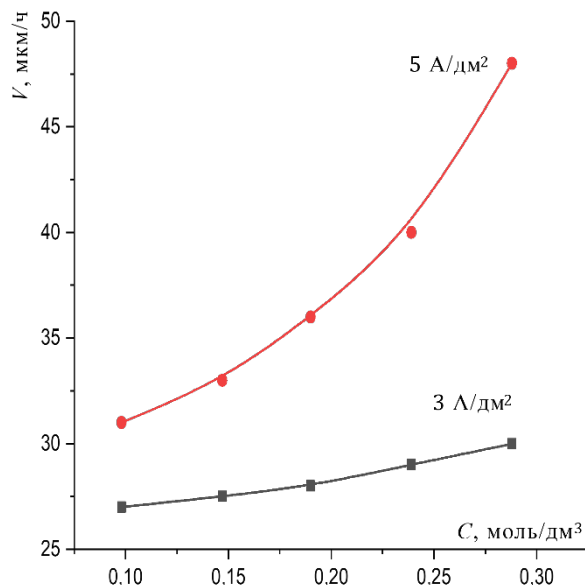


Рисунок 4. – Зависимость скорости осаждения покрытий Ni-Co-P от концентрации гипофосфита натрия в растворе

Так же как и для сплава Ni-Co, для системы Ni-Co-P при фиксированной плотности тока в оптимальном диапазоне по мере утолщения покрытия не наблюдается замедления его осаждения во всем изученном диапазоне температур, что свидетельствует об отсутствии катодной пассивации (рис. 5).

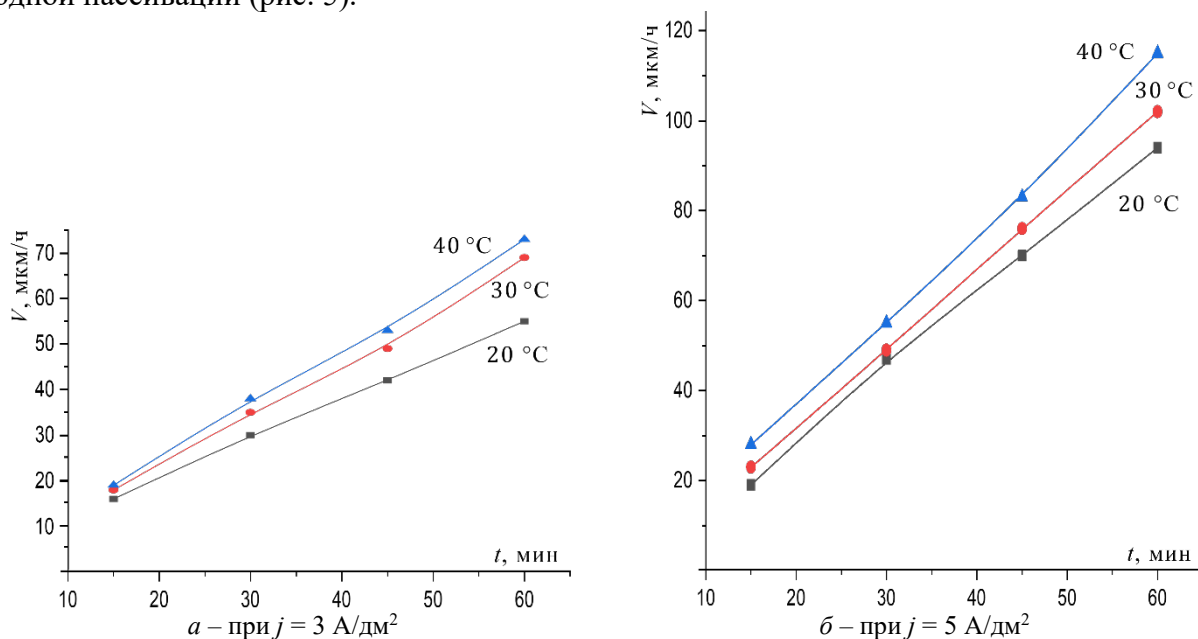


Рисунок 5. – Зависимость скорости осаждения покрытий Ni-Co-P от времени осаждения

Таким образом, толщина защитных покрытий Ni-Co-P не лимитирована и может достигать 100 μm и более в зависимости только от длительности синтеза. Этот факт чрезвычайно важен при нанесении покрытий на подверженные активному механическому износу детали аварийно-спасательного оборудования, где могут потребоваться достаточно большие толщины защитных пленок.

Температура электролита при фиксированной плотности тока, как свидетельствуют наши данные, незначительно влияет на скорость кристаллизации сплава Ni-Co-P (рис. 6), но достаточно сложным нелинейным образом. Прохождение кривой $V(t)$ через пологий минимум при 30 °C было выявлено для всех трех исследованных концентраций гипофосфита натрия (рис. 6а). Также обнаружено, что при небольших плотностях тока (1–2 A/dm^2) наблюдается прохождение кривой $V(t)$ через пологий минимум при 30 °C; тогда как при повышении плотности тока до 3 A/dm^2 при этой же температуре появляется слабовыраженный максимум (рис. 6б).

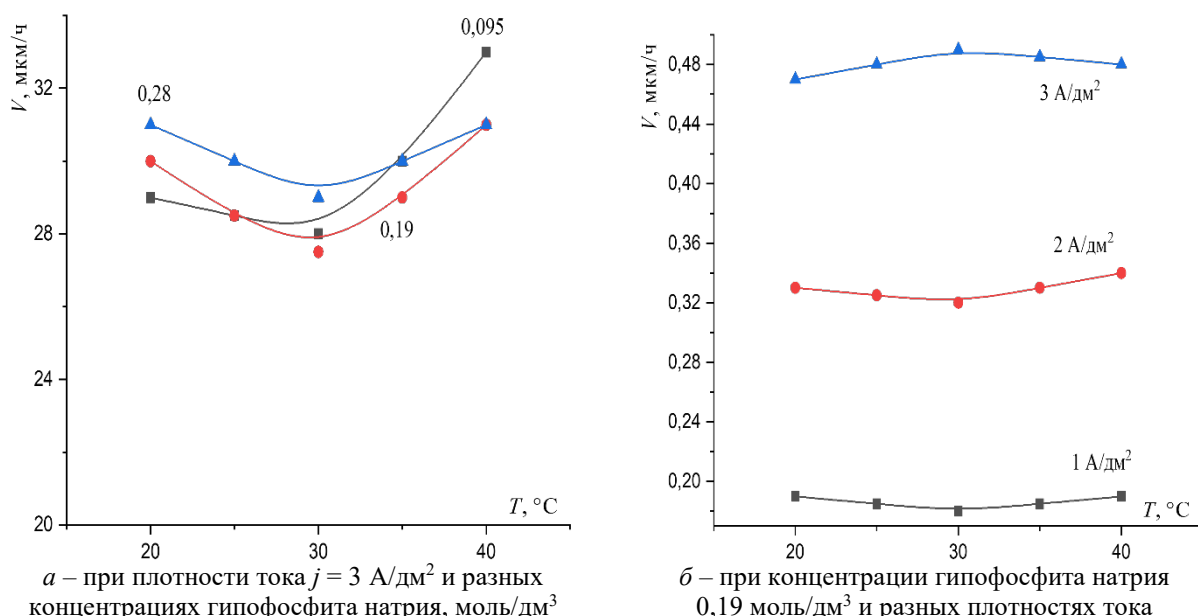
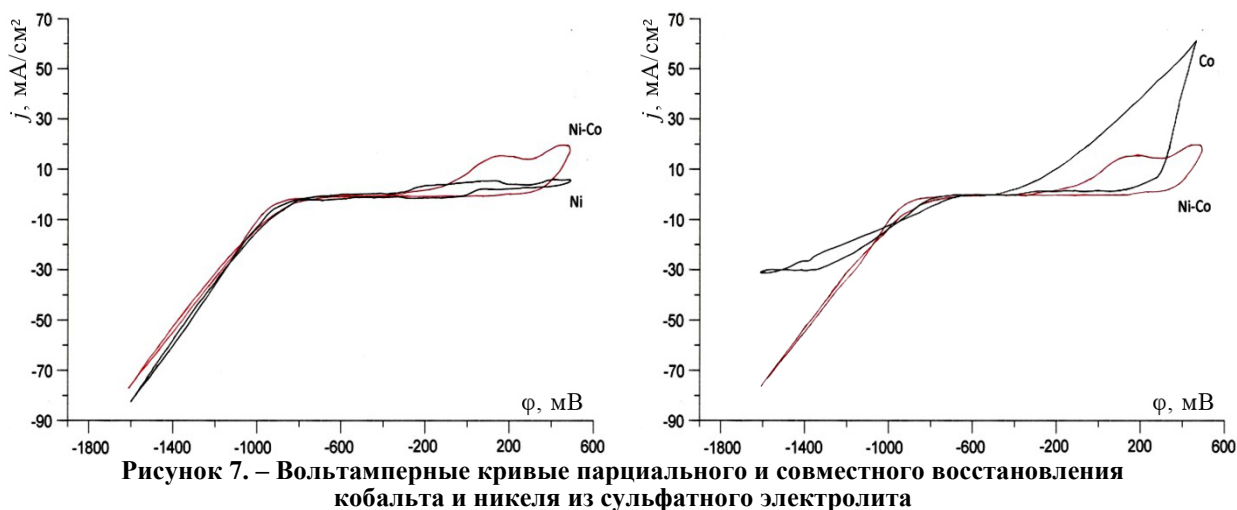


Рисунок 6. – Зависимость скорости осаждения покрытий Ni-Co-P от температуры электролита

По всей вероятности, для данной системы лимитирующей стадией в формировании катодного покрытия является не скорость диффузии ионов металлов к поверхности катода (которая растет с увеличением температуры электролита), а скорость их десольватации и восстановления, являющаяся функцией поляризации катода. Кроме того, по мере увеличения толщины пленки возможно изменение морфологии растущей поверхности и относительных скоростей роста тех или иных граней кристаллической решетки, также больше определяемых плотностью тока и концентрацией гипофосфита, чем температурой электролита. Таким образом, состав, микроструктура и физико-механические свойства полученных защитных покрытий Ni-Co и Ni-Co-P в наибольшей степени будут определяться плотностью катодного тока и в меньшей – прочими факторами [3; 4; 6–12]. В связи с этим было проведено детальное изучение процессов, протекающих на поверхности электродов методом циклической вольтамперометрии.

Данные вольтамперометрического исследования свидетельствуют, что восстановление никеля из слабокислого сульфатного электролита в отсутствие выравнивающих добавок начинается при потенциалах φ ниже -800 мВ, кобальта – ниже -700 мВ; однако токи кристаллизации кобальта почти в 2 раза ниже токов кристаллизации никеля при тех же потенциалах (рис. 7). Восстановление никеля из данного электролита продолжается без каких-либо затруднений до -1200 мВ, после чего наблюдается параллельное восстановлению никеля выделение водорода. Следует отметить обширную область нулевых токов при потенциалах φ от -100 до -800 мВ для никеля и от -300 до -700 мВ для кобальта, в которой не происходит внешне заметного формирования продуктов неполного восстановления никеля и кобальта, что, возможно, связано с кислой средой электролита. Во всем исследованном диапазоне не наблюдается формирования на катоде оксо- и гидроксосоединений – поверхность электрода представляет собой плотную светлую полублестящую пленку осадка. Парциальные вольтамперные кривые восстановления обоих металлов характеризуются отсутствием как пиков пассивации, так и плато предельного тока диффузии (рис. 7).

Анодные области парциальных кривых растворения никеля и кобальта также характеризуются отсутствием каких-либо пиков пассивации и формирования нерастворимых продуктов на поверхности электрода, что свидетельствует об отсутствии лимитирования кристаллизации сплава за счет анодной составляющей (рис. 7).



Совместная вольтамперная кривая восстановления кобальта и никеля находится практически в тех же областях потенциалов, что и парциальная кривая восстановления никеля, и свидетельствует о том, что восстановление никеля и кобальта в сплав из сульфатных или аквакомплексов происходит без сверхполяризации для никеля и с некоторой депольаризацией для кобальта (рис. 7). По мере повышения плотности тока катодный потенциал при осаждении никеля в большей степени, чем при осаждении кобальта, смещается в сторону электроотрицательных значений, но т.к. поляризация никеля все же сравнительно мало превышает поляризацию кобальта, при более высоких плотностях тока легко достигаются более отрицательные значения потенциалов, при которых разряжаются большие количества ионов никеля. Следовательно, с увеличением плотности катодного тока содержание никеля в сплаве должно повышаться.

Таким образом, в концентрированном сульфатном электролите без выравнивающих добавок формирование сплава Ni-Co с использованием только никелевых анодов происходит без сверхполяризации обоих металлов и с некоторой деполяризацией кобальта, без образования продуктов неполного восстановления металлов, пассивирующих катод. Эти результаты согласуются с данными гравиметрических исследований об отсутствии замедления осаждения покрытий по мере увеличения их толщины, что для гальванических сплавов встречается достаточно редко.

При введении в сульфатный электролит NaH_2PO_2 при тех же потенциалах погружения наблюдается резкое уменьшение области нулевых токов на парциальной кривой восстановления как никеля, так и кобальта (рис. 8). Кроме того, происходит существенное возрастание плотности катодных токов для кобальта при тех же потенциалах по сравнению с исходным электролитом (рис. 7, 8), возникновение на обеих парциальных кривых плато предельных токов диффузии в области потенциалов от -1200 до -1500 мВ и смещение анодных пиков в область более отрицательных потенциалов.

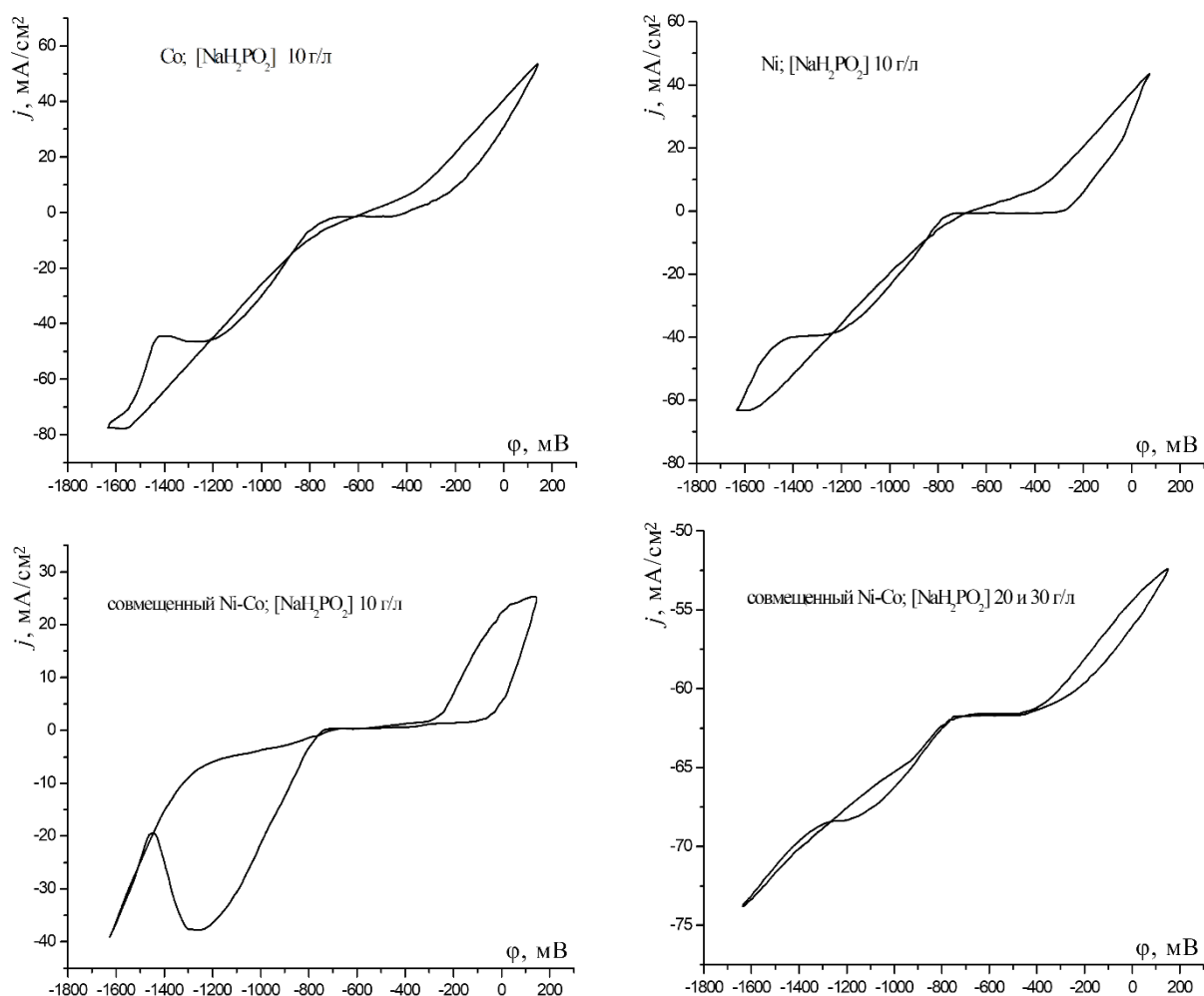


Рисунок 8. – Вольтамперные кривые парциального и совместного восстановления кобальта и никеля из сульфатного электролита при различных концентрациях гипохлорита натрия

Деполяризация парциального восстановления кобальта в присутствии NaH_2PO_2 может быть связана с параллельным протеканием реакции химического восстановления кобальта гипохлоритом. Интересно отметить, что деполяризации парциального восстановления никеля в присутствии NaH_2PO_2 не наблюдается (рис. 8), хотя для никеля химическое восстановление в присутствии гипохлорита обычно более ярко выражено, чем для кобальта [25]. Вероятно, наблюдаемый эффект связан с критической концентрацией гипохлорита натрия в электролите.

Небольшие плато предельных токов диффузии могут быть связаны с образованием на поверхности катода соединений фосфора, поскольку формирования оксо-, гидроксо-соединений никеля и кобальта не отмечается. Анодные области парциальных кривых растворения

как никеля, так и кобальта характеризуются отсутствием каких-либо пиков пассивации и формирования нерастворимых продуктов на поверхности электрода, что свидетельствует об отсутствии лимитирования кристаллизации сплава за счет анодной составляющей. Для совместной кривой восстановления никеля и кобальта при малых концентрациях гипофосфита натрия характерно снижение катодных токов по сравнению с кривой в отсутствие NaH_2PO_2 (рис. 8); и только при снижении потенциала более -1300 мВ катодный ток резко возрастает за счет интенсификации выделения водорода.

При повышении концентрации гипофосфита натрия до 0,19–0,28 моль/дм³ на совместной кривой восстановления никеля и кобальта наблюдается резкое увеличение катодных токов: так, потенциалу -800 мВ соответствует катодный ток плотностью до 65 мА/см²; таким образом, наблюдается существенная деполяризация восстановления как кобальта, так и никеля, вероятно, за счет дополнительного восстановления их ионов NaH_2PO_2 , что согласуется с результатами гравиметрических исследований.

Заключение

Гравиметрическими исследованиями установлено, что из сульфатного концентрированного электролита без выравнивающих добавок в диапазоне плотностей тока 1–6 А/дм² и интервале температур 20–40 °С осаждение сплавов Ni-Co и Ni-Co-P протекает без ограничений по толщине, что свидетельствует об отсутствии катодной пассивации, обычно характерной для синтеза гальваносплавов. Скорость роста покрытий достигает 30–60 мкм/ч, но при достижении порогового значения плотностей тока (более 6–7 А/дм²) замедляется кристаллизация сплава, покрытие становится темным, рыхлым, хрупким, с множеством точек питтинга. Наблюдаемые эффекты являются следствием преобладания скорости диффузии гидратированных ионов металлов над скоростью их десольватации и восстановления, что вызывает формирование значительного количества продуктов неполного восстановления металлов (оксидов и гидроксидов), блокирующих поверхность катода неэлектропроводной пленкой, а также резким ускорением побочного процесса выделения водорода.

Содержание никеля в покрытиях можно варьировать в пределах ~35–75 ат. %; причем превалирующее влияние на содержание никеля в сплаве оказывает плотность катодного тока по сравнению с температурой электролита. Это означает, что лимитирующей стадией кристаллизации сплава является скорость роста определенных граней кристаллической решетки (определяется потенциалом совместного восстановления ионов металлов), а не скорость диффузии ионов никеля и кобальта (определяется температурой электролита и концентрацией ионов металлов).

Методом циклической вольтамперометрии доказано, что во всех исследованных электролитах (как раздельного, так и совместного осаждения компонентов) в оптимальном диапазоне плотностей тока не наблюдается образования на поверхности электрода продуктов неполного восстановления никеля и кобальта. Формирование сплава Ni-Co происходит без сверхполяризации обоих металлов с некоторой деполяризацией кобальта, в отсутствие предельных токов диффузии и пассивации катода. Для сплава Ni-Co-P наблюдается существенная деполяризация как кобальта, так и никеля, вероятно, за счет дополнительного восстановления их ионов NaH_2PO_2 , что существенно увеличивает скорость формирования покрытия по сравнению с Ni-Co; а небольшие плато предельных токов диффузии могут быть косвенным свидетельством формирования на поверхности катода соединений фосфора, возможно фосфидов никеля и кобальта.

Изученная система обеспечивает гальванический синтез пленок Ni-Co и Ni-Co-P с достаточно высокой скоростью без ограничений по толщине и с учетом литературных данных о химической стойкости и физико-механических свойствах этих сплавов является весьма перспективной для получения защитных и упрочняющих покрытий для деталей аварийно-спасательной техники. Особенно высокими характеристиками (химической стойкостью, микротвердостью, износостойкостью, термической стабильностью) должны обладать сплавы Ni-Co-P за счет формирования ультрамелкодисперсных соединений фосфора, включающихся в покрытие, что требует проведения дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лобанов, М.Л. Защитные покрытия: учеб. пособие / М.Л. Лобанов, Н.И. Кардонина, Н.Г. Россина, А.С. Юровских. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 200 с. – ISBN 978-5-7996-1101-9.

2. Козлов, И.А. Холодное газодинамическое напыление покрытий (обзор) / И.А. Козлов, К.А. Лещев, А.А. Никифоров, С.А. Демин // Труды ВИАМ. – 2020. – № 8 (90). – С. 77–93. – DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93. – EDN: WVBSVT.
3. Беленький, М.А. Электроосаждение металлических покрытий: справочник / М.А. Беленький, А.Ф. Иванов. – М.: Металлургия, 1985. – 288 с.
4. Поветкин, В.В. Структура и свойства электролитических сплавов / В.В. Поветкин, Н.М. Ковенский, Ю.Н. Устиновщиков – М.: Наука, 1992. – 254 с.
5. Лошкарёв, Ю.М. Электроосаждение меди в присутствии блескообразующих и выравнивающих добавок. Обзор / Ю.М. Лошкарёв, Е.М. Говорова // Защита металлов. – 1998. – Т. 34, № 5. – С. 451–468.
6. Гальванотехника: справочник / под ред. А.А. Гинберга, А.Ф. Иванова, Л.А. Кравченко. – М.: Металлургия, 1987. – 735 с.
7. Кудрявцев, Н.Т. Электролитические покрытия металлами / Н.Т. Кудрявцев. – М.: Химия, 1979. – 352 с.
8. Мельников, П.С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении / П.С. Мельников. – М.: Машиностроение, 1991. – 380 с.
9. Антропов, Л.И. Теоретическая электрохимия: учеб. для вузов / Л.И. Антропов. – Изд. 4-е, перераб. – М.: Высшая школа, 1984. – 519 с.
10. Грихилес, С.Я. Электролитические и химические покрытия / С.Я. Грихилес, К.И. Тихонов. – Ленинград: Химия. – 1990. – 288 с.
11. Антропов, Л.И. Композиционные электрохимические покрытия и материалы / Л.И. Антропов, Ю.Н. Лебединский. – Киев: Техника. – 1986. – 200 с.
12. Гамбург, Ю.Д. Электрохимическая кристаллизация металлов и сплавов / Ю.Д. Гамбург; Российская академия наук, Институт физической химии. – М.: Янус-К, 1997. – 384 с.
13. Гамбург, Ю.Д. Гальванические покрытия. Справочник по применению / Ю.Д. Гамбург. – М.: Техносфера, 2006. – 216 с.
14. Burghardt, W. Electrodeposition of functional metal coatings / W. Burghardt // Galvanotechnic. – 1993. – Vol. 84, № 8. – P. 2585–2590.
15. Лукомский, Ю.Я. Физико-химические основы электрохимии: учебник / Ю.Я. Лукомский, Ю.Д. Гамбург. – Долгопрудный: Интеллект, 2008. – 423 с.
16. Богеншютц, А.Ф. Электролитические покрытия сплавами: Методы анализа / А.Ф. Богеншютц, У. Георге; пер. с нем. – М.: Металлургия, 1980. – 188 с.
17. Иванова, Н.Д. Электрохимические бифункциональные системы / Н.Д. Иванова, С.В. Иванов // Успехи химии. – 1993. – Т. 62, № 10. – С. 963–974. – DOI: 10.1070/RC1993v062n10ABEH000053.
18. Каблов, Е.Н. Жаропрочность никелевых сплавов / Е.Н. Каблов, Е.Р. Голубовский. – М.: Машиностроение. – 1998. – 464 с.
19. Шеханов, Р.Ф. Электроосаждение сплавов никель-кобальт / Р.Ф. Шеханов, П.С. Яблоков, С.Н. Гридчин // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2007. – Т. 50, № 2. – С. 47–49. – EDN: IAPMIV.
20. Шеханов, Р.Ф. Электроосаждение сплавов кобальт-никель и цинк-никель из сульфатно-хлоридных электролитов / Р.Ф. Шеханов, С.Н. Гридчин, А.В. Балмасов, К.Е. Румянцева // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2014. – Т. 57, № 8. – С. 47–51. – EDN: TJWEDR.
21. Богомазова, Н.В. Электроосаждение никелевых и кобальтовых сплавов в присутствии органических лигандов / Н.В. Богомазова, Е.И. Филь, И.М. Жарский // Труды БГТУ. № 3. Химия и технология неорганических веществ. – 2013. – № 3. – С. 12–15. – EDN: TFSJKD.
22. Гридчин, С.Н. Электроосаждение покрытий никель-кобальт из растворов диглицина / С.Н. Гридчин, Р.Ф. Шеханов, А.В. Балмасов // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2025. – Т. 68, № 11. – С. 121–126. – DOI: 10.6060/ivkkt.20256811.7286. – EDN: SSCDGY.
23. Панасюк, М.И. Электрохимическое получение сферических отложений при осаждении сплава Co-Ni-P / М.И. Панасюк, Т.И. Зубарь, Т.И. Усович [и др.] // Инновационные материалы и технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, г. Минск, 23–24 марта 2022 г. – Мн.: БГТУ, 2022. – С. 30–33. – URI: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/49861>.
24. Авторское свидетельство SU 1726567A1. Электролит для осаждения покрытий на основе никеля, кобальта и фосфора: заявлено 14.02.1992; опубл. 15.04.1992 / Небосенко Ю.А., Иващенко Н.И., Олесов Ю.Г., Плошенко И.Г., Кулик О.П., Балев А.В., Школа О.И., Анисимов А.П., Полушкина Л.А.
25. Свиридов, В.В. Химическое осаждение металлов из водных растворов / В.В. Свиридов, Т.Н. Воробьева, Т.В. Гаевская, Л.И. Степанова. – Мн.: Университетское, 1987. – 270 с.

**Закономерности электрокристаллизации твердых сплавов Ni-Co и Ni-Co-P
для упрочнения деталей аварийно-спасательного оборудования**

**Electrocrystallization regularities of hard Ni-Co and Ni-Co-P alloys
for strengthening of parts of emergency rescue equipment**

Рева Ольга Владимировна

кандидат химических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
химической, биологической, радиационной
и ядерной защиты, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: volha107@rambler.ru

SPIN-код: 9028-4876

Olga V. Reva

PhD in Chemical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Chemical, Biological, Radiation
and Nuclear Protection, Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: volha107@rambler.ru

ORCID: 0000-0003-4006-8678

Врублевский Александр Васильевич

кандидат химических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
химической, биологической, радиационной
и ядерной защиты, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: 63063@mail.ru

SPIN-код: 4899-0018

Alexander V. Vrublevskiy

PhD in Chemical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Chemical, Biological, Radiation
and Nuclear Protection, Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: 63063@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4179-5407

Работа выполнена в рамках задания 3.1.02 «Разработать технологию низкоэнергетического формирования защитных износ- и коррозионностойких покрытий для упрочнения деталей, в том числе аварийно-спасательной техники на основе композитов никеля» подпрограммы «Обеспечение безопасности человека, общества и государства» государственной программы научных исследований «Интеллектуальные информационные и космические технологии, безопасность человека, общества и государства».

ELECTROCRYSTALLIZATION REGULARITIES OF HARD Ni-Co AND Ni-Co-P ALLOYS FOR STRENGTHENING OF PARTS OF EMERGENCY RESCUE EQUIPMENT

Reva O.V., Vrublevskiy A.V.

Purpose. To study the patterns and determine the optimal conditions for hydrometallurgical synthesis of protective and strengthening coatings from Ni-Co and Ni-Co-P alloys for modification surface of emergency rescue equipment parts.

Methods. Gravimetry, voltammetry, X-ray spectral analysis.

Findings. It was determined that within the permissible range of current densities (1–6 A/dm²) and a fairly wide temperature range (up to 40 °C), the deposition of Ni-Co alloys proceeds without thickness limitations, indicating the absence of cathodic passivation. For Ni-Co-P, the optimal method for obtaining dense, defect-free protective films is alloy deposition at room temperature in the current density range of 3–7 A/dm² at a rate of 30–60 µm/h. The nickel content in coatings can vary between 35 and 75 at. %; the cathode current density has the predominant influence on the nickel content in the alloy. The formation of the Ni-Co alloy occurs without some depolarization of cobalt, in the absence of limiting diffusion currents and cathode passivation. For the Ni-Co-P alloy, significant depolarization of both cobalt and nickel is observed due to their additional reduction by hypophosphite, which significantly increases the rate of coating formation compared to Ni-Co.

Application field of research. Protection against wear and corrosion, increased resistance to impact and thermal loads, friction, and deformation of parts made of low-carbon steels.

Keywords: composite strengthening coatings, electrochemical deposition of protective films, overcoming cathodic passivation, alloy formation conditions, controlled regulation of component content.

(The date of submitting: January 29, 2026)

REFERENCES

1. Lobanov M.L., Kardonina N.I., Rossina N.G., Yurovskikh A.S. *Zashchitnyye pokrytiya* [Protective coatings]: tutorial. Ekaterinburg: Ural University, 2014. 200 p. (rus). ISBN 978-5-7996-1101-9.
2. Kozlov I.A., Leshchev K.A., Nikiforov A. A., Demin S.A. Kholodnoye gazodinamicheskoye napyleniye pokrytiy (obzor) [Cold spray coatings (review)]. *Proceedings of VIAM*, 2020. No. 8 (90). Pp. 77–93. (rus). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93. EDN: WVBSVT.
3. Belenkiy M.A., Ivanov A.F. *Elektroosazhdeniye metallicheskih pokrytiy* [Electrodeposition of metallic coatings]: handbook. Moscow: Metallurgiya, 1985. 288 p. (rus)
4. Povetkin V.V., Kovenskiy N.M., Ustinovshchikov Yu.N. *Struktura i svoystva elektroliticheskikh splavov* [Structure and properties of electrolytic alloys]. Moscow: Nauka, 1992. 254 p. (rus)
5. Loshkarev Yu.M., Govorova E.M. The electrodeposition of copper in the presence of brightening and smoothing agents. *Protection of Metals*, 1998. Vol. 34, No. 5. Pp. 399–415. EDN: XKZCDV.
6. *Gal'vanotekhnika* [Electroplating]: handbook. Ed. by A.M. Ginberg, A.F. Ivanova, L.A. Kravchenko. Moscow: Metallurgiya, 1987. 735 p. (rus)
7. Kudryavtsev N.T. *Elektroliticheskie pokrytiya metallami* [Electrolytic coating by metals]. Moscow: Khimiya, 1979. 352 p. (rus)
8. Melnikov P.S. *Spravochnik po gal'vanopokrytiyam v mashinostroyenii*. [Handbook of electroplated coatings in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1991. 380 p. (rus)
9. Antropov L.I. *Teoreticheskaya elektrokhiymiya* [Theoretical electrochemistry]: textbook for universities. 4th edition, revised. Moscow: Vysshaya Shkola, 1984. 519 p. (rus)
10. Grikhiles S.Ya., Tikhonov K.I. *Elektroliticheskiye i khimicheskiye pokrytiya* [Electrolytic and chemical coatings]. Leningrad: Khimiya. 1990. 288 p. (rus)
11. Antropov L.I., Lebedinskiy Yu.N. *Kompozitsionnyye elektrokhimicheskiye pokrytiya i materialy* [Composite electrochemical coatings and materials]. Kiev: Tekhnika, 1986. 200 p. (rus)
12. Gamburg Yu.D. *Elektrokhimicheskaya kristallizatsiya metallov i splavov* [Electrochemical crystallization of metals and alloys]. Moscow: Yanus-K, 1997. 384 p. (rus)
13. Gamburg Yu.D. *Gal'vanicheskiye pokrytiya. Spravochnik po primeneniyu* [Galvanic coatings. Application guide]. Moscow: Tekhnosfera, 2008. 216 p. (rus)
14. Burghardt W. Electrodeposition of functional metal coatings. *Galvanotechnic*, 1993. Vol. 84, № 8. P. 2585–2590.
15. Lukomskiy Yu.Ya., Gamburg Yu.D. *Fiziko-khimicheskiye osnovy elektrokhiimi*. [Physicochemical foundations of electrochemistry]: textbook. Dolgoprudny: Intellekt, 2008. 423 p. (rus)

16. Bogenshütz A.F., George U. *Elektroliticheskiye pokrytiya splavami: Metody analiza* [Electrolytic coatings with alloys: Methods of analysis]: transl. from German. Moscow: Metallurgiya, 1980. 188 p. (rus)
17. Ivanova N.D., Ivanov S.V. Bifunctional electrochemical systems. *Russian Chemical Reviews*, 1993. Vol. 62, No. 10. Pp. 907–918. DOI: 10.1070/RC1993v062n10ABEH000053.
18. Kablov E.N., Golubovskiy E.R. *Zharoprochnost' nikel'nykh splavov* [Heat resistance of nickel alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1998. 464 p. (rus)
19. Shekhanov R.F., Yablokov P.S., Gridchin S.N. Elektroosazhdeniye splavov nikel'-kobal't [Electrodeposition of nickel-cobalt alloys]. *ChemChemTech (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya)*, 2007. Vol. 50, No. 2. Pp. 47–49. (rus). EDN: IAPMIV.
20. Shekhanov R.F., Gridchin S.N., Balmasov A.V., Rumyantseva K.E. Elektroosazhdeniye splavov kobal't-nikel' i tsink-nikel' iz sul'famatno-khloridnykh elektrolitov [Electrodeposition of cobalt-nickel and zinc-nickel alloys from sulfamate-chloride electrolytes]. *ChemChemTech (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya)*, 2014. Vol. 57, No. 8. Pp. 47–51. (rus). EDN: TJWEDR.
21. Bogomozova N.V., Fil' E.I., Zharskiy I.M. Elektroosazhdeniye nikel'nykh i kobal'tovykh splavov v prisutstvii organicheskikh ligandov [Electrodeposition of nickel and cobalt alloys in the presence of organic ligands]. *Proceedings of BSTU. № 3. Chemistry and Technology of Inorganic Substances*, 2013. No. 3. Pp. 12–15. (rus). EDN: TFSJKD.
22. Gridchin, S.N., Shekhanov, R.F., Balmasov A.V. Elektroosazhdeniye pokrytiy nikel'-kobal't iz rastvorov diglitsina [Electrodeposition of nickel-cobalt coatings from solutions of diglycine]. *ChemChemTech (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya)*, 2025. Vol. 68, No. 11. Pp. 121–126. (rus). DOI: 10.6060/ivkkt.20256811.7286. EDN: SSCDGY.
23. Panasyuk M.I., Zubar' T.I., Usovich T.I., Kotel'nikova A.N., Fed'kin V. A., Kanaf'ev O.D., Trukhanov A.V. Elektrokhimicheskoe poluchenie sfericheskikh otlozheniy pri osazhdenii splava Co-Ni-P [Electrochemical production of spherical deposits during deposition of Co-Ni-P alloy]. Proc. of Intern. scientific and technical. conf. of young scientists «Innovatsionnye materialy i tekhnologii», Minsk, March 23–24, 2022. Minsk: Belarusian State Technological University, 2022. Pp. 30–33. (rus). URI: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/49861>.
24. Nebosenko Yu.A., Ivashchenko N.I., Olesov Yu.G., Ploshenko I.G., Kulik O.P., Balev A.V., Shkola O.I., Anisimov A.P., Polushkina L.A. *Elektrolit dlya osazhdeniya pokrytiy na osnove nikelya, kobal'ta i fosfora* [Electrolyte for precipitation of coatings on the basis nickel, cobalt and phosphorus]: copyright certificate SU 1726567A1. Published April 15, 1992. (rus)
25. Sviridov V.V., Vorob'eva T.N., Gaevskaya T.V., Stepanova L.I. *Khimicheskoye osazhdeniye metallov iz vodnykh rastvorov* [Chemical precipitation of metals from aqueous solutions]. Minsk: Universitetskoe, 1987. 270 p. (rus)

Copyright © 2026 Reva O.V., Vrublevskiy A.V.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

О РЕЖИМАХ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ПУЗЫРЬКОВ В РАСТВОРЕ С ПАВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ

Камлюк А.Н., Гусаров И.С., Масюк С.А.

Цель. Провести исследования режимов генерирования пузырьков в растворе с поверхностно-активным веществом (ПАВ) для получения компрессионной пены¹ и их геометрических характеристик на затопленном отверстии. На основе полученных экспериментальных данных выделить основные режимы генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены и дать их описание. Определить характеристические числа Рейнольдса, Вебера, Фруда, Маха, капиллярности, Бонда и Мортонна, по которым можно судить о режимах генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены и их геометрических характеристиках на затопленном отверстии.

Методы. Общая методология работы предусматривала использование теоретических (анализ, синтез, сравнение) и экспериментальных методов исследования. Применялся метод визуализации и фотосъемки, метод цифровой обработки изображений, расчетный метод.

Результаты. Экспериментально установлены три последовательно сменяющих друг друга режима генерирования пузырьков в растворе ПАВ на затопленном отверстии: пузырьковый, гирляндный (переходный) и струйный. Определены критерии этих режимов: для пузырькового: числа Рейнольдса – $Re < 1000$; Вебера – $We \leq 15$; капиллярности – $Ca_{max} = 0,018$; Маха – $M_{max} = 0,075$ и среднее газосодержание – $\phi_{cp}^{min} = 0,769$; $\phi_{cp}^{max} = 0,997$; для гирляндного: $1000 \leq Re \leq 2000$; $3 \leq We \leq 45$; $Ca_{max} = 0,031$; $M_{max} = 0,129$; $\phi_{cp}^{min} = 0,954$; $\phi_{cp}^{max} = 0,998$; для струйного: $Re > 2000$; $We \geq 80$; $Ca_{min} = 0,029$; $M_{min} = 0,123$; $\phi_{cp}^{min} = 0,998$. Показано, что даже при малых скоростях воздуха в растворе с ПАВ генерируются деформированные (эллиптические) пузырьки, что подтверждается значениями числа Бонда $Bo > 1$ и $Re > 1,1Mo^{-1/5}$. Для каждого режима определены геометрические характеристики: для пузырькового – эквивалентный диаметр пузырька и шаг между пузырьками; для гирляндного – расстояние между гирляндой и пузырьками и высота гирлянды; для струйного – высота факела и угол его раскрытия. Наиболее эффективным с точки зрения газонасыщения и дисперсности пузырьков признан струйный режим.

Область применения исследований. Исследования режимов генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены и их геометрических характеристик на затопленном отверстии могут применяться для оптимизации барботажных процессов для пожаротушения, флотации, пищевых производств и получения пористых материалов.

Ключевые слова: ПАВ, компрессионная пена, пузырьки, барботаж, число Рейнольдса, число Вебера, число Фруда, число Маха, число капиллярности, число Бонда, число Мортонна.

(Поступила в редакцию 12 марта 2026 г.)

Введение

Огнетушащую воздушно-механическую пену можно получать на сетках в насадках на пожарные стволы [1], на розетках оросителей автоматических установок пожаротушения [2], а также в установках генерирования компрессионной пены [3]. Последний способ является новым и эффективным, однако еще не получил широкого распространения в Республике Беларусь, т.к. не исследованы все свойства и качества компрессионной пены [4]. Настоящая работа посвящена изучению режимов генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены и их геометрических характеристик на затопленном отверстии. Одним из основных приближений для генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для

¹ Техника пожарная. Мобильные системы генерирования компрессионной пены. Общие технические требования. Методы испытаний: ГОСТ Р 58792-2019 – Введ. 01.01.2019. – М.: Стандартинформ, 2020. – III, 14 с.

получения компрессионной пены, принятых в данной работе, является постоянство стационарного объема раствора пенообразователя в камере смешения экспериментальной установки (расход жидкой фазы равен нулю). Изменяемым параметром остается расход воздуха, подаваемого в жидкую фазу. В реальных же условиях работы установки генерирования компрессионной пены дополнительно имеется возможность регулирования расходов воды и пенообразователя. Тем не менее, в связи с тем, что изучаются возможные режимы генерирования пены только в камере смешения (не рассматриваются режимы движения пен в рукавных линиях) и геометрические характеристики пузырьков на затопленном отверстии, данное приближение можно считать приемлемым.

Процесс генерирования компрессионной пены при определенных условиях идентичен по механизму фрагментации с барботажем, под которым понимают процесс пропускания газа [5–7] или пара [8] через слой жидкости и применяют в различных видах техники. Для исследований барботажных режимов применяются установки как с постоянным стационарным объемом жидкой фазы [5; 8], так и с заданным расходом [6; 7]. В работах [6; 7] установлено, что отрывной диаметр пузырька уменьшается с ростом расхода потока жидкости как при восходящем, так и опускном течении, однако с повышением расхода газа через отверстие диаметр пузырька увеличивается при постоянном расходе жидкости. Данный эффект связан с изменением режима отрыва пузырьков. Классически различают два режима отрыва пузырьков [9, с. 8–12]. При малых скоростях наблюдается образование и движение отдельных пузырьков – пузырьковый режим, при котором глубина погружения источника газа практически не влияет на диаметр пузырька [10]. При скоростях, превышающих критическое значение, наблюдается образование газового факела – струйный режим, в котором пузырьки всплывают, соприкасаясь друг с другом. Первые попытки теоретического описания режимов представлены в работах: пузырькового – [11; 12, с. 57–61], струйного – [12, с. 62–66]. С учетом развития численного моделирования получены количественные характеристики скорости всплытия пузырьков различных диаметров, частоты и амплитуды их движения [13].

В отличие от барботажа (пузырьки просто всплывают), процесс генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены (сжатый воздух вбивается в поток раствора под давлением) может проводиться со значительно большими скоростями газового потока, численные значения которых могут достигать даже до околосвуковой области. Повышение скорости газового потока связано с необходимостью интенсификации процесса образования пены (повышением кратности пены), однако, как оно влияет на характеристики режимов отрыва пузырьков, а также форму и размеры самих пузырьков, в настоящее время не изучено.

Основная часть

Для определения режимов генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены необходимо определить значения характеризующих этот процесс безразмерных чисел подобия: Рейнольдса (Re), Вебера (We), Бонда (Bo) [14, с. 208–216], капиллярности (Ca) [16] и Мортонна (Mo) [17], для оценки газосодержания – числа Фруда (Fr) [18], а в качестве дополнительного критерия подобия при больших числах Рейнольдса – Маха (M) [19]:

число Рейнольдса

$$Re = \rho_{\Gamma} v_{\Gamma} d_{\text{отв}} / \eta_{\Gamma}, \quad (1)$$

где ρ_{Γ} – плотность газа (воздуха), кг/м³;
 v_{Γ} – характерная скорость потока газа, м/с;
 $d_{\text{отв}}$ – диаметр отверстия, м;
 η_{Γ} – динамическая вязкость газа, Па·с;
 число Вебера

$$We = \rho_{\Gamma} v_{\Gamma}^2 d_{\text{отв}} / \sigma_{\text{ж}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{ж}}$ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости (раствора пенообразователя), Н/м;

число Фруда

$$Fr = v_{\Gamma}^2 / (g d_{\text{отв}}), \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

число Маха

$$M = v_r / v_{зв}, \quad (4)$$

где $v_{зв}$ – скорость звука в воздухе, м/с;
число Бонда

$$Bo = (\rho_{ж} - \rho_r) g d_{п}^2 / \sigma_{ж}, \quad (5)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости (раствора пенообразователя), кг/м³;
 $d_{п}$ – диаметр пузырька, м;
число Мортон

$$Mo = \frac{(\rho_{ж} - \rho_r) g \eta_{ж}^4}{\rho_{ж}^2 \sigma_{ж}^3}, \quad (6)$$

где $\eta_{ж}$ – динамическая вязкость жидкости (раствора пенообразователя), Па·с;
число капиллярности

$$Ca = v_r \eta_r / \sigma_{ж}. \quad (7)$$

Для определения среднего газосодержания использовался подход, описанный в работе [18]:

$$\varphi_{ср} = \sqrt{Fr} / (1 + \sqrt{Fr}). \quad (8)$$

Для расчета теоретического диаметра пузырька применялась следующая формула [20]:

$$d_{п} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{4B}{Q_1}} - Q_1 + \sqrt{Q_1} \right) \quad \text{при} \quad Q_1 = \sqrt[3]{2B^2 + 2\sqrt{2A^3 + B^4}} + \sqrt[3]{2B^2 - 2\sqrt{2A^3 + B^4}}, \quad (9)$$

$$A = \frac{3\eta_{ж} v_r d_{отв}^2}{(\rho_{ж} - \rho_r) g}, \quad B = \frac{3\sigma_{ж} d_{отв}}{(\rho_{ж} - \rho_r) g}.$$

Кроме того, в работе принята во внимание аналогия гидродинамики процессов кипения и барботажной жидкости газом [21], а также процессов испарения и кипения [21].

Известно [22, с. 36], что ПАВ даже при очень незначительной концентрации существенно влияют на движение газового пузырька в жидкости. Так, скорость всплытия одиночного пузырька в 1,5 раза меньше скорости всплытия в жидкостях, полностью свободных от ПАВ [22, с. 61]. Данное явление объясняется тем, что при движении газового пузырька в растворе пенообразователя на поверхности раздела фаз накапливаются молекулы ПАВ (мицеллы), которые лишают границу раздела подвижности – пузырек движется, как бы окруженный жесткой оболочкой.

Исследование режимов генерирования пузырьков в растворе с ПАВ (растворе пенообразователя) для получения компрессионной пены и их геометрических характеристик на затопленном отверстии проводилось в прозрачной емкости объемом $V = 0,003$ м³. Результаты исследований показаны в таблице 1.

В выходное отверстие, расположенное в центре дна емкости, диаметром 4 мм вставлялся сменный насадок (сопло) соответствующего диаметра (рис. 1), изготовленный по технологии 3D-печати с помощью смолы, типичная усадка и погрешность которой составляет не более 1,5 %. Таким образом, имелась возможность подачи воздуха от компрессора через отверстия: $d_{отв1} = 4$ мм (без насадков), а также $d_{отв2} = 2$, $d_{отв3} = 1$ и $d_{отв4} = 0,5$ мм соответственно. Далее емкость заполнялась раствором пенообразователя целевого назначения марки ПО-РЗФ (6 %) ($\sigma_{ж} = 0,0256$ Н/м, $\rho_{ж} = 1000$ кг/м³, $\eta_{ж} = 10^{-3}$ Па·с) объемом $V_{ж} = 0,002$ м³. Следует подчеркнуть, что в исследованиях для получения пены готовился именно рабочий раствор пенообразователя, т.е. водный раствор с рекомендуемой производителем концентрацией пенообразователя в нем (указана в скобках в названии марки пенообразователя).

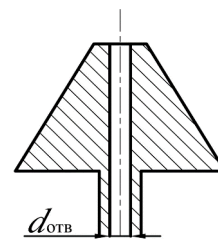
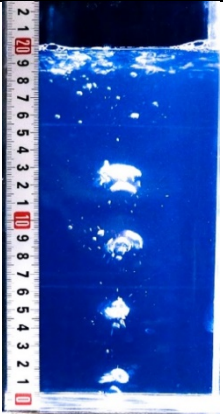
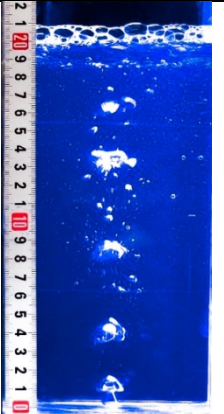
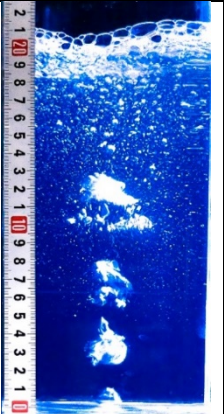
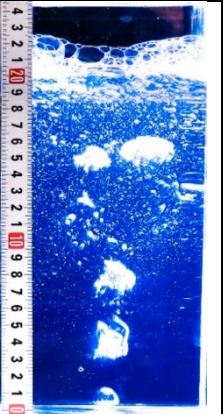
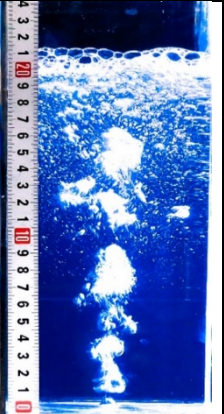
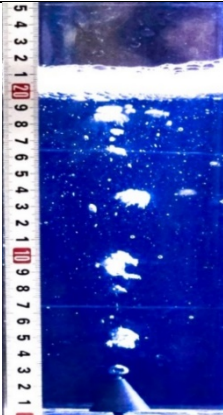
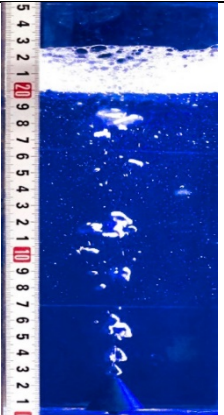
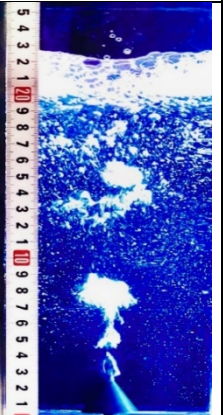
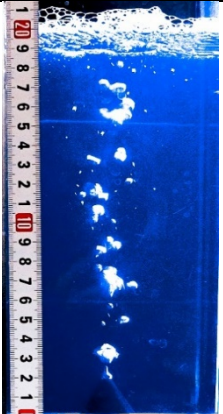
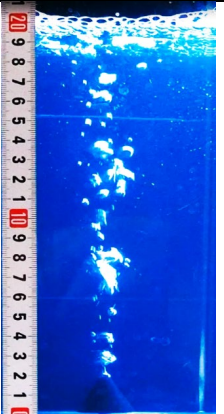
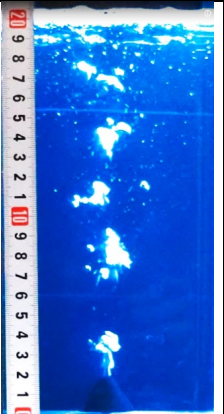
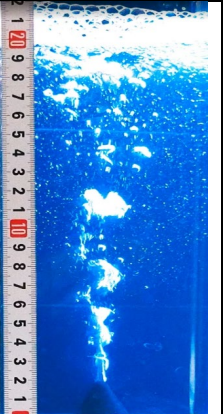
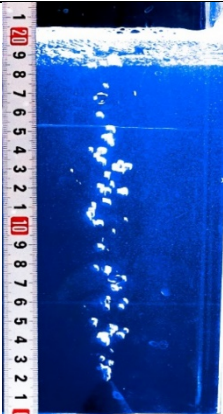
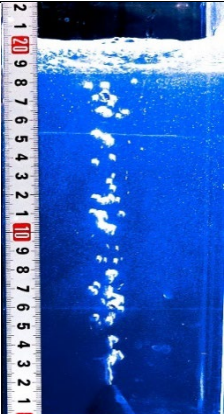
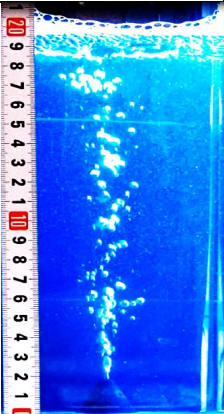
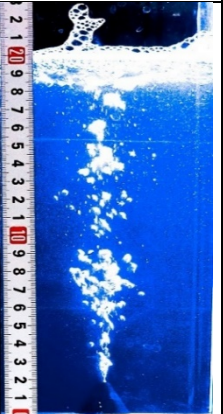
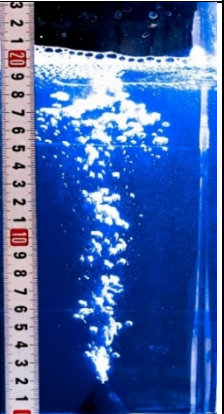


Рисунок 1. – Общий вид сменного насадка (сопла) с различными диаметрами выходного отверстия

Таблица 1. – Генерирование пузырьков на затопленном отверстии

$d_{отв},$ мм	Расход воздуха, подаваемого компрессором, $Q, \text{м}^3/\text{ч}$				
	0,030	0,039	0,059	0,149	0,188
4,0					
2,0					
1,0					
0,5					

Как правило, при отклонении концентрации пенообразователя от рекомендуемой производителем наблюдается существенное ухудшение пенообразования, в том числе кратности пены. По этой причине растворы пенообразователя с иной концентрацией активного компонента не рассматривались. Фотоаппарат устанавливался от емкости строго на фиксированном расстоянии, равном 80 ± 1 см. Показания расходов воздуха снимались по поверенному ротаметру, погрешность которого составляет 2,5 %. Эксперименты проводились при стандартных условиях (температура – $T_r = 293 \pm 0,5$ К, $T_{ж} = 293 \pm 0,1$ К, атмосферное давление – $p_{атм} = 99,8 \pm 0,2$ кПа, относительная влажность воздуха – $RH = 38,2\text{--}46,8$) с каждым отверстием от $d_{отв1} = 4$ до $d_{отв4} = 0,5$ мм во всем диапазоне расходов воздуха от 0,018 до 0,188 м³/ч. После каждого эксперимента раствор пенообразователя сливался, емкость промывалась проточной водой и сушилась. Для нового эксперимента заново заливался рабочий раствор пенообразователя и эксперимент повторялся не менее трех раз для каждого отверстия при всех расходах воздуха. Фотографирование проводилось в течение 10–30 с до образования пенного слоя на поверхности раствора пенообразователя, высота которого доходила до верхней кромки емкости. Фотографии режимов, полученных в ходе экспериментов, подвергались цифровому анализу и обработке.

В качестве определяющего критерия для классификации режимов генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены было выбрано число Рейнольдса (формула (1)) с учетом ряда других чисел (формулы (2)–(4) и (7), (8)).

Результаты расчетов критериев подобия представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Результаты расчетов критериев подобия

$d_{отв}$, мм	Q , м ³ /ч	v_r , м/с	Re	We	Fr	φ_{cp}	$Ca \cdot 10^3$	M
4	0,030	0,66	174,06	0,081	11,10	0,769	0,46	0,002
	0,039	0,86	226,80	0,137	18,85	0,813	0,60	0,003
	0,059	1,30	342,84	0,313	43,07	0,868	0,91	0,004
	0,149	3,27	862,36	1,982	272,50	0,943	2,30	0,010
	0,188	4,13	1089,16	3,161	434,68	0,954	2,90	0,012
2	0,030	2,65	349,43	0,651	357,93	0,950	1,86	0,008
	0,039	3,45	454,92	1,103	606,65	0,961	2,42	0,010
	0,058	5,13	676,44	2,439	1341,33	0,973	3,60	0,015
	0,145	12,83	1691,76	15,253	8389,85	0,989	9,02	0,038
	0,180	15,92	2099,21	23,484	12917,76	0,991	11,19	0,047
1	0,025	9,16	603,92	3,887	8553,07	0,989	6,44	0,027
	0,032	11,73	673,36	6,375	14025,78	0,992	8,24	0,035
	0,051	18,69	1232,23	16,184	35608,17	0,995	13,13	0,055
	0,114	41,78	2754,56	80,872	177937,66	0,998	29,36	0,123
	0,153	56,07	3696,70	145,654	320473,49	0,998	39,40	0,165
0,5	0,018	25,48	839,95	15,039	132360,94	0,997	17,90	0,075
	0,023	32,55	1073,01	24,543	216004,59	0,998	22,87	0,096
	0,031	43,88	1446,50	44,603	392549,32	0,998	30,83	0,129
	0,056	79,26	2612,81	145,526	1280764,04	0,999	55,70	0,233
	0,062	87,76	2893,01	178,413	1570197,27	0,999	61,67	0,258

На основе визуального анализа, с учетом рассчитанных значений характеристических чисел (табл. 2) были выделены три последовательно сменяющие друг друга режима генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены на затопленном отверстии: пузырьковый (рис. 2а), гирляндный (рис. 2б) и струйный (рис. 2в).

Пузырьковый режим характеризуется значениями чисел Рейнольдса ($Re < 1000$), Вебера ($We \leq 15$), низким газосодержанием ($\varphi_{cp}^{min} = 0,769$; $\varphi_{cp}^{max} = 0,997$) и небольшими скоростями ($Ca_{max} = 0,018$; $M_{max} = 0,075$). Для гирляндного режима (так называемый переходный режим) можно отметить следующие особенности: $1000 \leq Re \leq 2000$; $3 \leq We \leq 45$; $\varphi_{cp}^{min} = 0,954$; $\varphi_{cp}^{max} = 0,998$; $Ca_{max} = 0,031$ и $M_{max} = 0,129$. Струйный режим начинается при $Re > 2000$; $We \geq 80$; $\varphi_{cp}^{min} = 0,998$; $Ca_{min} = 0,029$ и $M_{min} = 0,123$.

Таким образом, самым эффективным можно считать струйный режим, который обеспечивает наибольшее газонасыщение раствора пенообразователя с минимальными диаметрами пузырьков. Число Мортон, рассчитанное по формуле (6), равно $Mo = 56,40 \cdot 10^{-11}$. А так

как не выполняется условие $Re \leq 1,1Mo^{-1/5}$ [22, с. 60], все пузырьки имеют эллиптическую форму ($Re_{min} = 174,06$; $1,1Mo^{-1/5} = 77,83$). Дополнительным подтверждением эффекта сжатия пузырьков в растворе с ПАВ является выполнение неравенства $Bo > 1$ для рассчитанного числа Бонда. С использованием методов цифровой обработки изображений для каждого из режимов были определены присущие им геометрические характеристики: для пузырькового режима – эквивалентный диаметр пузырька на отверстии $d_{п(э)}$ и шаг между пузырьками $h_{п}$; для гирляндного – расстояние между гирляндой и пузырьками $h_{г}$ и высота гирлянды $H_{г}$; для струйного – высота $H_{ф}$ и угол раскрытия факела струи $\beta_{ф}$.

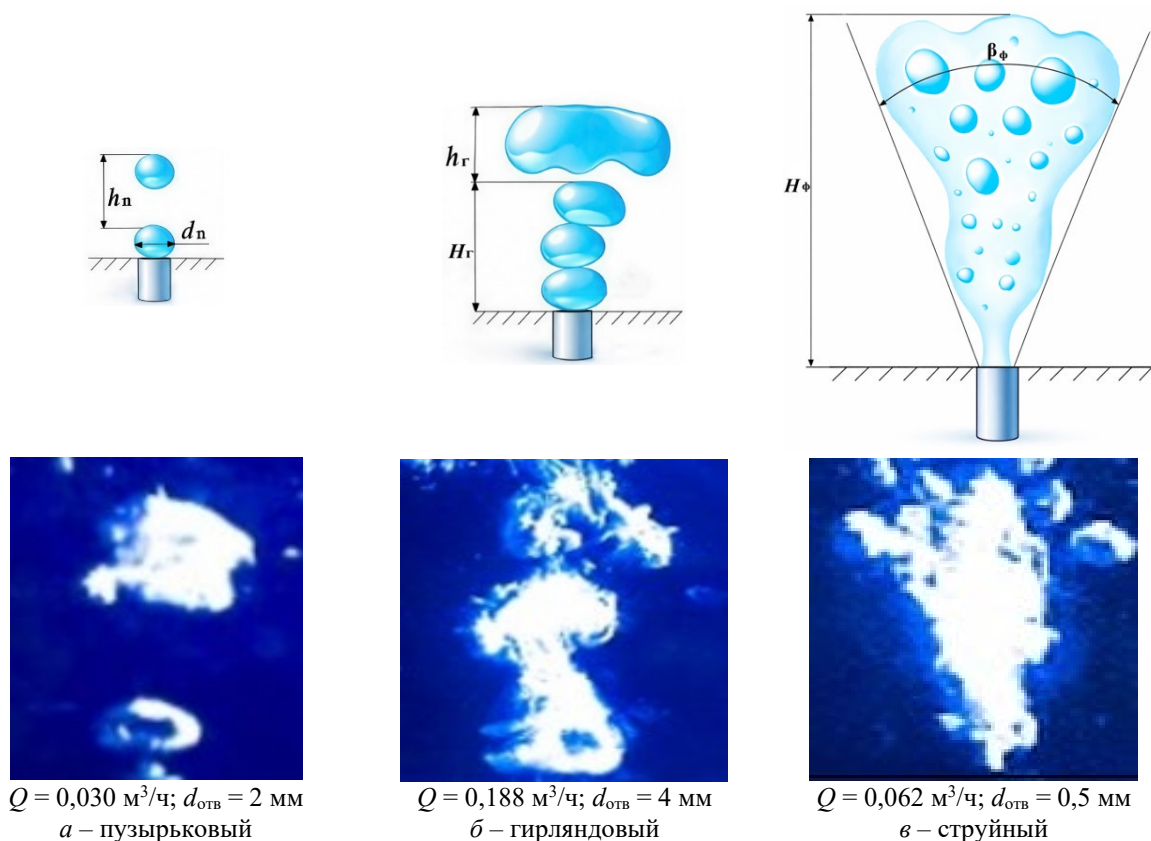


Рисунок 2. – Режимы генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены на затопленном отверстии (первый ряд – схема; второй ряд – увеличенное фото)

Пузырьки воздуха имели эллиптическую форму даже при малых скоростях воздуха в отверстии ($v_r^{min} = 0,66 \text{ м/с}$). По этой причине оцениваются эквивалентные диаметры пузырьков.

Расчет эквивалентного диаметра пузырька на затопленном отверстии проводился исходя из условия:

$$\left| (S_{элл} - S_{окр}) / S_{элл} \right| \cdot 100 \% \leq 10 \%, \quad (10)$$

где $S_{элл}$ и $S_{окр}$ – площади эллипса и окружности, м^2 .

Таким образом,

$$2\sqrt{0,9r_a r_b} \leq d_{п(э)} \leq 2\sqrt{1,1r_a r_b}, \quad (11)$$

где r_a и r_b – большой и малый радиусы эллипса, м.

Данные неравенства обеспечивают приемлемую степень приближения формы пузырька к осесимметричной. Стоит отметить, что определение реальных размеров пузырьков (r_a и r_b) выполнялось с учетом масштабного коэффициента, который рассчитывался как отношение показаний эталонной линейки, установленной непосредственно на затопленном отверстии, к показаниям линейки, закрепленной на внешней стенке емкости.

Численные значения параметров, соответствующих режимам генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены, представлены в таблицах 3, 4 и 5 соответственно.

Таблица 3. – Характеристики пузырькового режима

v_r , м/с	Re	$d_{отв}$, мм	$d_{п(э)}$, мм	Bo	$h_{п}$, мм	$d_{п(р)}$, мм
0,66	174,06	4,0	4,0	6,1	19,9	4,60
0,86	226,80	4,0	4,2	6,7	18,5	4,61
1,30	342,84	4,0	4,4	7,4	14,4	4,62
2,65	349,43	2,0	3,4	4,4	17,0	3,68
3,27	862,36	4,0	4,4	7,4	10,2	4,70
3,45	454,92	2,0	3,3	4,2	12,7	3,70
5,13	676,44	2,0	3,3	4,2	4,6	3,73
9,16	603,92	1,0	2,9	3,2	5,5	2,97
11,73	673,36	1,0	3,4	4,4	5,6	3,00
25,48	839,95	0,5	2,9	3,2	4,1	2,41

Примечание: $d_{п(э)}$ и $d_{п(р)}$ – эквивалентный и расчетный диаметры пузырька, мм.

Таблица 4. – Характеристики гирляндового режима

v_r , м/с	Re	$d_{отв}$, мм	H_r , мм	h_r , мм
4,13	1089,16	4,0	67,1	10,1
12,83	1691,76	2,0	55,4	8,2
15,92	2099,21	2,0	70,1	6,9
18,69	1232,23	1,0	18,6	7,1
32,55	1073,01	0,5	13,9	5,4
43,88	1446,50	0,5	16,2	2,4

Таблица 5. – Характеристики струйного режима

v_r , м/с	Re	$d_{отв}$, мм	$H_{ф}$, мм	$\beta_{ф}$, градусы
41,78	2754,56	1,0	17,1	88,2
56,07	3696,70	1,0	18,2	78,9
79,26	2612,81	0,5	18,0	83,7
87,76	2893,01	0,5	17,1	75,6

Заключение

В работе проведены исследования режимов генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены и их геометрических характеристик на затопленном отверстии. Установлены три режима: пузырьковый ($Re < 1000$; $We \leq 15$; $\varphi_{ср}^{min} = 0,769$; $\varphi_{ср}^{max} = 0,997$; $Ca_{max} = 0,018$; $M_{max} = 0,075$); гирляндовый ($1000 \leq Re \leq 2000$; $3 \leq We \leq 45$; $\varphi_{ср}^{min} = 0,954$; $\varphi_{ср}^{max} = 0,998$; $Ca_{max} = 0,031$; $M_{max} = 0,129$); струйный ($Re > 2000$; $We \geq 80$; $\varphi_{ср}^{min} = 0,998$; $Ca_{min} = 0,029$; $M_{min} = 0,123$). Отмечено, что даже в пузырьковом режиме с небольшими скоростями воздушного потока ($v_r^{min} = 0,66$ м/с) на затопленном отверстии в растворе с ПАВ генерируются деформированные пузырьки: $Bo > 1$; $Re > 1,1 Mo^{-1/5}$.

С целью углубленного изучения струйного режима, который оказался наиболее эффективным для генерирования компрессионной пены, следует провести экспериментальные исследования с большими скоростями воздушного потока ($v > 100$ м/с) и изучить влияние природы пенообразователя на характеристики пузырьков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Камлюк, А.Н. Ствол пожарный ручной универсальный комбинированный с возможностью изменения расхода огнетушащего средства: от моделирования до огневых испытаний: монография / А.Н. Камлюк, А.А. Морозов, В.В. Пармон. – Мн.: УГЗ, 2024. – 189 с.
2. Камлюк, А.Н. Пенные оросители для автоматических установок пожаротушения: монография / А.Н. Камлюк, А. О. Лихоманов, А.В. Грачулин. – Мн.: УГЗ, 2023. – 244 с.
3. Камлюк, А.Н. Компрессионная пена для нужд пожарных подразделений: монография / А.Н. Камлюк, А.В. Грачулин. – Мн.: УГЗ, 2019. – 224 с.

4. Алешков, М.В. Применение компрессионной пены при тушении пожаров в зданиях повышенной этажности / М.В. Алешков, В.М. Ройтман, С.С. Воевода [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2019. – № 3. – С. 59–62. – DOI: 10.25257/FE.2019.3.59-62. – EDN: RLEBRV.
5. Архипов, В.А. Анализ механизма потери устойчивости одиночного пузырька при малых значениях числа Рейнольдса / В.А. Архипов, И.М. Васенин, А.С. Усанина // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52, № 3 (307). – С. 51–60. – EDN: OHLFSJ.
6. Воробьев, М.А. Формирование мелкодисперсной газовой фазы в восходящем и опускном потоке жидкости / М.А. Воробьев, О.Н. Кашинский, П.Д. Лобанов, А.В. Чинак // Известия российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2012. – № 4. – С. 75–81. – EDN: PFDBCX.
7. Воробьев, М.А. Режимы генерации пузырей в потоке вязкой жидкости / М.А. Воробьев, О.Н. Кашинский, П.Д. Лобанов, А.В. Чинак // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. – 2015. – Т. 10, № 3. – С. 70–75. – DOI: 10.54362/1818-7919-2015-10-3-70-75. – EDN: VHILKR.
8. Лисицын, А.Н. Гидрогазодинамика всплытия пузырей перегретого водяного пара в подсолнечном масле в процессе барботажа / А.Н. Лисицын, А.А. Федоров, С.М. Волков [и др.] // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. – 2022. – № 4 (54). – С. 11–24. – DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-4-11-24. – EDN: YACUXW.
9. Хентов, В.Я. Барботаж. Барботажный аэрозоль. Проблемы и решения: монография / В.Я. Хентов, Е.Г. Семин, Ю.В. Власов, В.М. Гасанов. – Изд. 2-е, стер. – СПб.: Химиздат, 2024. – 193 с.
10. Чанцев, В.Ю. Анализ вертикального движения воздушно-пузырьковой завесы в воде / В.Ю. Чанцев // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2017. – № 46. – С. 64–70. – EDN: YNFMMD.
11. Волков, П.К. Динамика жидкости с пузырьками газа / П.К. Волков // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 1996. – № 3. – С. 75–88.
12. Кутателадзе, С.С. Гидродинамика газожидкостных систем / С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
13. Козелков, А.С. Численное моделирование свободного всплытия пузырька воздуха / А.С. Козелков, А.А. Куркин, В.В. Курулин [и др.] // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2016. – № 6. – С. 3–14. – DOI: 10.7868/S0568528116060074. – EDN: YSXLCL.
14. Лабунцов, Д.А. Механика двухфазных систем: учеб. пособие для вузов / Д.А. Лабунцов, В.В. Ягов. – М.: Издательский дом НЭИ, 2016. – 383 с. – ISBN 978-5-383-00964-2.
15. Шакирзянов, Ф.Н. Что век грядущий нам готовит? / Ф.Н. Шакирзянов, П.А. Бутырин, С.А. Абдулкеримов, Д.В. Михеев // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2022. – Т. 86, № 9. – С. 1226–1229. – DOI: 10.31857/S0367676522090265. – EDN: AMRNOC.
16. Камлюк, А. Н. Количественное описание механизмов образования воздушно-механической пены низкой кратности для нужд пожаротушения / А.Н. Камлюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2024. – Т. 8, № 3. – С. 276–288. – DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-3.276. – EDN: EJOWFD.
17. Кобызев, С.В. Методика расчета коэффициентов массоотдачи при осушке углеводородного ракетного топлива / С.В. Кобызев // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – № 11. – С. 49–59. – EDN: OKIHLLT.
18. Акимов, В.В. Определение газосодержания на барботажных тарелках / В.В. Акимов, А.М. Трушин, Е.А. Дмитриев // Успехи в химии и химической технологии. – 2008. – Т. 22, № 2 (82). – С. 38–42. – EDN: QZVMDH.
19. Сафронова, Е.В. Массообмен в струйном аппарате / Е.В. Сафронова, Г.Н. Абаев // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78, № 6. – С. 84–88. – EDN: PGLDEF.
20. Камлюк, А.Н. Подходы к расчету кратности, дисперсности и устойчивости воздушно-механических пен низкой кратности / А.Н. Камлюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2025. – Т. 9, № 1. – С. 54–65. – DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-1.54. – EDN: EXXZPA.
21. Анохина, Е.В. Исследование аналогии процессов испарения и кипения жидкостей / Е.В. Анохина // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2008. – № 4 (146). – С. 43–45. – EDN: JUPYLF.
22. Носырев, М. А. Определение скоростей и концентраций дисперсных частиц при стесненном движении на основе минимума интенсивности диссипации энергии: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Носырев Михаил Андреевич; Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева. – М., 2016. – 112 с. – EDN: JICNVD.

**О режимах генерирования пузырьков в растворе с ПАВ
для получения компрессионной пены**

On bubble generation regimes in a surfactant solution for producing compression foam

Камлюк Андрей Николаевич

кандидат физико-математических наук,
доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», ученый секретарь

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: kan@ucp.by

SPIN-код: 8858-0296

Andrey N. Kamlyuk

PhD in Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Scientific Secretary

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: kan@ucp.by

ORCID: 0000-0002-9347-0778

ScopusID: 57218325403

Гусаров Игорь Сергеевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет подготовки
научных кадров, начальник лаборатории

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: igor.gusarov.2000@mail.ru

Igor' S. Gusarov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Faculty of Postgraduate Scientific Education,
Head of Laboratory

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: igor.gusarov.2000@mail.ru

ORCID: 0000-0002-0665-8212

Масюк Станислав Артемович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет подготовки
научных кадров, инженер

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: stas.masyuk18@gmail.com

Stanislav A. Masyuk

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Faculty of Postgraduate Scientific Education,
Engineer

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: stas.masyuk18@gmail.com

ORCID: 0009-0002-4289-1676

ON BUBBLE GENERATION REGIMES IN A SURFACTANT SOLUTION FOR PRODUCING COMPRESSION FOAM

Kamlyuk A.N., Gusarov I.S., Masyuk S.A.

Purpose. To investigate the regimes of bubble generation in a surfactant solution for producing compression foam and their geometric characteristics at a submerged orifice. Based on the obtained experimental data, to identify and describe the principal regimes of bubble generation in a surfactant solution for producing compression foam. To determine the characteristic Reynolds, Weber, Froude, Mach, capillarity, Bond and Morton numbers that can be used to assess the bubble generation regimes in a surfactant solution for producing compression foam and their geometric characteristics at a submerged orifice.

Methods. The general methodology of the work involved the use of theoretical (analysis, synthesis, comparison) and experimental research methods. The methods of visualization and photography, digital image processing, and a computational method were applied.

Findings. Three successively alternating modes of bubble generation in a surfactant solution at a submerged orifice were experimentally established: bubble, garland (transitional), and jet. The criteria for these modes were determined: for bubble: Reynolds number – $Re < 1000$, Weber – $We \leq 15$, capillarity – $Ca_{\max} = 0.018$, Mach – $M_{\max} = 0.075$, and the average gas content – $\varphi_{\text{av}}^{\min} = 0.769$, $\varphi_{\text{av}}^{\max} = 0.997$; for garland: $1000 \leq Re \leq 2000$, $3 \leq We \leq 45$, $Ca_{\max} = 0.031$, $M_{\max} = 0.129$, $\varphi_{\text{av}}^{\min} = 0.954$, $\varphi_{\text{av}}^{\max} = 0.998$; for jet: $Re > 2000$, $We \geq 80$, $Ca_{\min} = 0.029$, $M_{\min} = 0.123$, $\varphi_{\text{av}}^{\min} = 0.998$. It is shown that even at low air velocities, deformed (elliptical) bubbles are generated in a solution with surfactants as confirmed by the Bond number values $Bo > 1$ and $Re > 1,1 Mo^{-1/5}$. Geometric characteristics are defined for each mode: for the bubble mode, the equivalent bubble diameter and the interbubble pitch; for the garland mode, the distance between the garland and the bubbles and the garland height; and for the jet mode, the torch height and its opening angle. The jet mode is considered the most effective in terms of gas saturation and bubble dispersion.

Application field of research. Research of the modes of bubble generation in a surfactant solution for obtaining compression foam and their geometric characteristics at a submerged orifice can be used to optimize barbotage processes for fire extinguishing, flotation, food production, and the production of porous materials.

Keywords: surfactant, compression foam, bubbles, barbotage, Reynolds number, Weber number, Froude number, Mach number, capillarity number, Bond number, Morton number.

(The date of submitting: March 12, 2026)

REFERENCES

1. Kamlyuk A.N., Morozov A.A., Parmon V.V. *Stvol pozharnyy ruchnoy universal'nyy kombinirovannyi s vozmozhnost'yu izmeneniya raskhoda ognetushashchego sredstva: ot modelirovaniya do ognevyykh ispytaniy* [Universal combined hand fire nozzle with the ability to change the flow rate of extinguishing agent: from modeling to fire tests]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2024. 189 p. (rus)
2. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Grachulin A.V. *Pennye orositeli dlya avtomaticheskikh ustanovok pozharotusheniya* [Foam sprinklers for automatic fire extinguishing systems]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2023. 244 p. (rus)
3. Kamlyuk A.N., Grachulin A.V. *Kompressiomaya pena dlya nuzhd pozharnykh podrazdeleniy* [Compression foam for fire departments]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2019. 224 p. (rus)
4. Aleshkov M.V., Roitman V.M., Voevoda S.S., Molchanov V.P., Sharipkhanov S.D., Fedyaev V.D. Prime-nenie kompressionnoy peny pri tushenii pozharov v zdaniyakh povyshennoy etazhnosti [The use of compression foam in extinguishing fires in high-rise buildings]. *Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2019. Pp. 59–62. (rus). DOI: 10.25257/FE.2019.3.59-62. EDN: RLEBRV.
5. Arkhipov V.A., Vasenin I.M., Usanina A.S. Analiz mekhanizma poteri ustoychivosti odinochnogo puzyr'ka pri mal'kikh znacheniyakh chisla Reynol'dsa [Analysis of the stability loss mechanism of a single bubble at low Reynolds numbers]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2011. Vol. 52, No. 3 (307). Pp. 51–60. (rus). EDN: OHLFSJ.
6. Vorob'ev M.A., Kashinskiy O.N., Lobanov P.D., Chinak A.V. Formirovanie melkodispersnoy gazovoy fazy v voskhodyashchem i opusknom potoke zhidkosti [Formation of fine gas phase in ascending and descending liquid flow]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2012. No. 4. Pp. 75–81. (rus). EDN: PFDBCX.

7. Vorob'ev M.A., Kashinskiy O.N., Lobanov P.D., Chinak A.V. Rezhimy generatsii puzyrey v potoke vyazkoy zhidkosti [Regimes of bubble generation in the flow of viscous liquid]. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015. Vol. 10, No. 3. Pp. 70–75. (rus). DOI: 10.54362/1818-7919-2015-10-3-70-75. EDN: VHLIKR.
8. Lisitsyn A.N., Fedorov A.A., Volkov S.M., Fedorov A.V., Romanov N.N. Gidrogazodinamika vsplytiya puzyrey peregretoego vodyanogo para v podsolnichnom masle v protsesse barbotazha [Hydro-gas dynamics of bubbles of superheated water vapor in sunflower oil during bubbling]. *Processes and Food Production Equipment*, 2022. No. 4. Pp. 11–24. (rus). DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-4-11-24. EDN: YACUXW.
9. Khentov V.Ya., Semin E.G., Vlasov Yu.V., Gasanov V.M. *Barbotazh. Barbotazhnyy aerol'. Problemy i resheniya* [Barbotage. Barbotage aerosol. Problems and solutions]: monograph. 2nd ed. Saint Petersburg: Khimizdat, 2024. 193 p. (rus)
10. Chantsev V.Yu. Analiz vertikal'nogo dvizheniya vozdušno-puzyr'kovoy zavesy v vode [The vertical motion of air-bubble curtain analysis]. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2017. No. 46. Pp. 64–70. (rus). EDN: YNFMMD.
11. Volkov P.K. Dinamika zhidkosti s puzyr'kami gaza [Dynamics of liquid with gas bubbles]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 1996. No. 3. Pp. 75–88. (rus)
12. Kutateladze S.S., Styrkovich M.A. *Gidrodinamika gazozhidkostnykh sistem* [Hydrodynamics of gas-liquid systems]. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Energiya, 1976. 296 p. (rus)
13. Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Kurulin V.V., Lashkin S.V., Tarasova N.V., Tyatyushkina E.S. Numerical modeling of the free rise of an air bubble. *Fluid Dynamics*, 2016. Vol. 51, No. 6. P. 709–721. DOI: 10.1134/S0015462816060016. EDN: YUVOYB.
14. Labuntsov D.A., Yagov V.V. *Mekhanika dvukhfaznykh sistem* [Mechanics of two-phase systems]: tutorial for universities. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2016. 383 p. (rus). ISBN 978-5-383-00964-2.
15. Shakirzyanov F.N., Butyrin P.A., Abdulkherimov S.A., Mikheev D.V. What does the next century have in store for us? *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2022. Vol. 86, No. 9. Pp. 1015–1018. DOI: 10.3103/s106287382209026x. EDN: KDGfVA.
16. Kamlyuk A.N. Kolichestvennoe opisanie mekhanizmov obrazovaniya vozdušno-mekhanicheskoy peny nizkoy kratnosti dlya nuzhd pozharotusheniya [Quantitative description of the mechanisms of formation of low multiplicity air-mechanical foam for firefighting needs]. *Journal of Civil Protection*, 2024. Vol. 8, No. 3. Pp. 276–288. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-3.276. EDN: EJOWFD.
17. Kobzyev S.V. Metodika rascheta koeffitsientov massootdachi pri osushke uglevodorodnogo raketnogo topliva [Method of calculating mass transfer coefficients during drying of hydrocarbon rocket fuel]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman*, 2011. No. 11. Pp. 49–59. (rus). EDN: OKIHLT.
18. Akimov V.V., Trushin A.M., Dmitriev E.A. Opreделение gazosoderzhaniya na barbotazhnykh tarelkakh [Determination of gas content on barbotage trays]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2008. Vol. 22, No. 2 (82). Pp. 38–42. (rus). EDN: QZVMDH.
19. Safronova E.V., Abaev G.N. Mass transfer in a jet device. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2005. Vol. 78, No. 6. Pp. 1133–1137. DOI: 10.1007/s10891-006-0044-y. EDN: XKBHMB.
20. Kamlyuk A.N. Podkhody k raschetu kratnosti, dispersnosti i ustoychivosti vozdušno-mekhanicheskikh pen nizkoy kratnosti [Approaches to calculating the expansion, dispersion and stability of low expansion air-mechanical foams] *Journal of Civil Protection*, 2025. Vol. 9, No. 1. Pp. 54–65. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-1.54. EDN: EXXZPA.
21. Anokhina E.V. Issledovanie analogii protsessov ispareniya i kipeniya zhidkostey [Comparison of evaporation with pool boiling of the liquids]. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences*, 2008. No. 4 (146). Pp. 43–45. (rus). EDN: JUPYLF.
22. Nosyrev M.A. *Opreделение skorostey i kontsentratsiy dispersnykh chastits pri stesnenom dvizhenii na osnove minimuma intensivnosti dissipatsii energii* [Determination of velocities and concentrations of dispersed particles under hindered motion based on the minimum of energy dissipation intensity]: PhD tech. sci. diss. 05.17.08. D.I. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia. Moscow, 2016. 112 p. (rus). EDN: JICNVD.

Copyright © 2026 Kamlyuk A.N., Gusarov I.S., Masyuk S.A.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ SLAM В БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСАХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОБСТАНОВКИ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Шамсудинов Г.Ю., Яровой В.Ю., Михайлова А.К.

Цель. Концептуальное обоснование и анализ применения систем SLAM в беспилотных авиационных средствах для точного 3D- и 4D-картирования объектов и местности в условиях чрезвычайных ситуаций (ЧС) с целью предоставления оперативной и точной информации руководителю ликвидации чрезвычайной ситуации (РЛЧС).

Методы. Обзор существующих архитектур SLAM, анализ методов слияния данных¹ от нескольких сенсоров, сравнение алгоритмов (LOAM, LeGO-LOAM, LIO-SAM и др.) на основе литературных источников, концептуальная оценка результатов с использованием метрик точности картирования, разрешения моделей и устойчивости к помехам.

Результаты. Проанализированы мультисенсорные SLAM-системы, демонстрирующие потенциал для создания высокоточных 3D-моделей объектов и местности в экстремальных условиях. Установлено, что применение SLAM для оперативного картирования в ЧС позволяет повысить точность информации для РЛЧС, сократить время принятия управленческих решений и минимизировать риски при ликвидации ЧС.

Область применения исследований. Полученные концептуальные выводы могут быть использованы для разработки стратегий внедрения SLAM-систем в беспилотные авиационные средства для мониторинга и моделирования зон чрезвычайной ситуации, информационные системы для руководителя ликвидации чрезвычайной ситуации, а также для решения других задач в области безопасности жизнедеятельности.

Ключевые слова: искусственный интеллект, SLAM-метод, беспилотные авиационные средства, ликвидация ЧС, инновационные технологии.

(Поступила в редакцию 27 января 2026 г.)

Введение

Чрезвычайные ситуации представляют серьезную угрозу для жизни людей, объектов инфраструктуры и окружающей среды. В этих условиях эффективность принятия решений руководителем ликвидации чрезвычайной ситуации во многом определяется полнотой, точностью и оперативностью информации о зоне бедствия. Недостаточность или запаздывание таких данных затрудняет оценку обстановки, увеличивает время реагирования, повышает риск для личного состава и снижает эффективность применения сил и средств. В связи с этим одной из важных задач является получение достоверной пространственной информации, позволяющей быстро оценивать состояние объектов, характер разрушений и возможные опасные зоны.

В системе МЧС России беспилотные авиационные средства (БАС) активно используются для получения пространственной информации в ЧС. БАС позволяют проводить разведку в труднодоступных районах, минимизируя риски для спасателей, и уже интегрированы в практику оперативного реагирования [1]. Вместе с тем большинство существующих БАС оснащены полезной нагрузкой в виде широкоугольных камер или тепловизоров, которые обеспечивают получение визуальной и тепловой информации. Несмотря на их эффективность для первичного обзора и выявления источников тепла, такие средства не всегда позволяют сформировать целостное пространственное представление об обстановке, поскольку не обеспечивают точного определения пространственной информации о помещениях, структуре объектов и изменениях среды во времени.

Для повышения информативности воздушной разведки в условиях ЧС необходимы технологии, способные не только фиксировать отдельные визуальные признаки, но и формировать пространственную модель окружающей среды с одновременным определением положения

¹ Слияние данных (от англ. Data fusion) – данные от нескольких сенсоров, например, LIDAR (англ. Light Detection and Ranging – обнаружение и определение дальности с помощью света) для расстояний, IMU (англ. Inertial Measurement Unit – инерциальный измерительный блок) для движения, камеры для текстур, которые смешиваются, чтобы робот или дрон лучше ориентировался в сложных условиях.

беспилотной платформы. Одним из наиболее перспективных подходов к решению данной задачи являются методы одновременной локализации и картирования – SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Эти методы позволяют строить карту местности или объекта в реальном времени без заранее подготовленной модели среды, одновременно оценивая текущее положение носителя сенсоров.

Среди существующих решений особый интерес представляют системы SLAM на основе 3D LIDAR, поскольку они позволяют формировать точные облака точек и трехмерные модели объектов и местности [2]. Однако в условиях густого дыма, пыли и других аэрозольных помех применение таких систем осложняется из-за рассеяния лазерных импульсов на взвешенных частицах, что приводит к потере точек, росту шума и ухудшению качества карты. В связи с этим для сценариев, связанных с пожарами, обрушениями и ограниченной видимостью, требуется анализ сенсорных решений, способных обеспечить более устойчивое картирование в неблагоприятной обстановке.

Основная часть

Анализ предметной области. Учитывая высокую распространенность и разнообразие ЧС природного и техногенного характера, связанных с пожарами, наводнениями, землетрясениями, химическими авариями и иными факторами, сопровождающимися сложными условиями видимости, динамическими изменениями местности и наличием препятствий, авторами были выделены две ключевые категории сценариев ЧС, наиболее часто требующие точной информации РЛЧС для эффективной ликвидации последствий:

– пожары, обрушения зданий и техногенные аварии на промышленных объектах, связанные с их последствиями: ситуации с высокой температурой, частичным или полным разрушением конструкций, ограниченной видимостью, наличием опасных веществ и деформированных элементов инфраструктуры, где требуется детальное моделирование очагов возгорания, зон распространения огня, сохранившихся структур, а также точек разрушения [3]. Системы SLAM особенно перспективны в таких условиях, поскольку могут использовать не только лидарное сканирование, но и радарное зондирование, позволяющее получать плотные облака точек даже сквозь дым и пыль, выявляя скрытые повреждения, неустойчивые элементы и потенциально опасные зоны [4]. Кроме того, анализ облаков точек в реальном времени, особенно в мультисенсорной конфигурации с тепловизорами или широкоугольными камерами, дает возможность обнаруживать наличие людей и их примерное местоположение через идентификацию тепловых признаков, движущихся объектов или антропоморфных форм в заваленных или частично задымленных помещениях. На рисунке 1 представлен пример визуализации помещений;

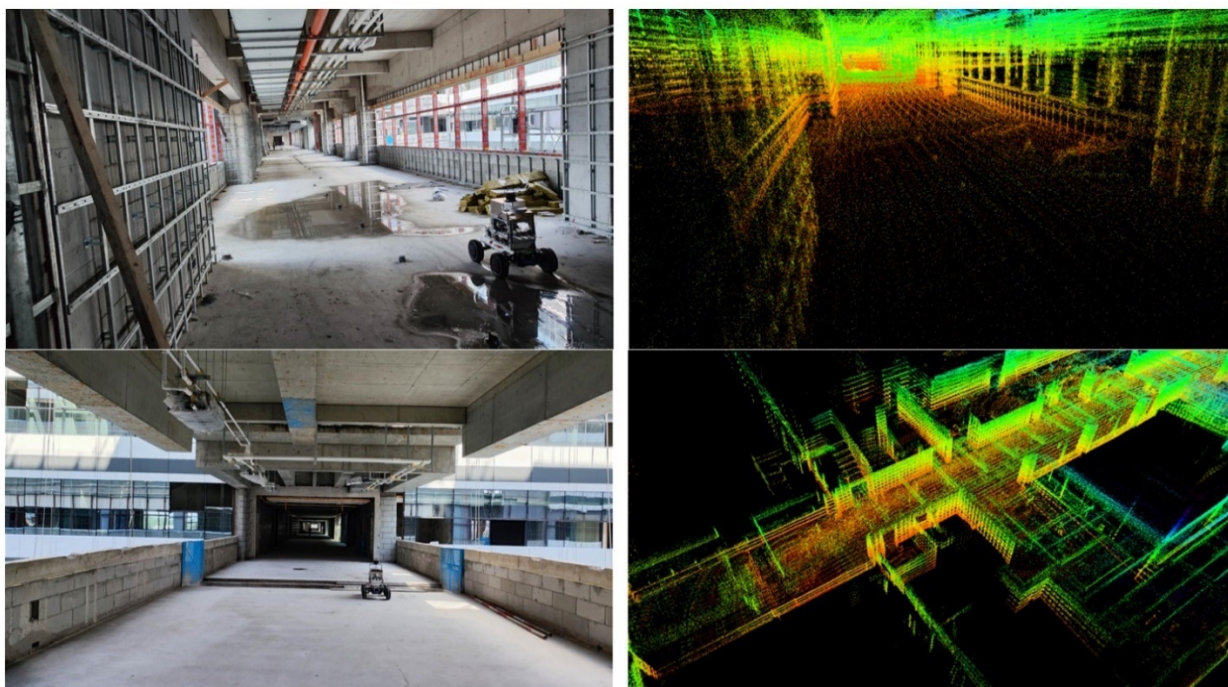


Рисунок 1. – Пример построения трехмерной модели внутреннего пространства с помощью LIDAR-SLAM

– природные катастрофы гидрологического и геологического характера (наводнения, землетрясения, оползни и обвалы): зоны с затоплением, разрушенными зданиями и неустойчивым рельефом, где необходимо быстрое построение 3D-моделей для оценки повреждений инфраструктуры, поиска пострадавших и определения безопасных маршрутов спасательных формирований.

Данный выбор категорий обусловлен следующими критериями:

- высокая частота встречаемости в ЧС природного и техногенного характера на территории Российской Федерации и в мире, включая риски, связанные с нарушениями промышленной, пожарной и экологической безопасности;
- необходимость оперативности и точности получения пространственной информации для принятия решений в условиях ограниченного времени, массового характера последствий и дефицита ресурсов.

С учетом указанных требований возникает необходимость сравнительного анализа современных алгоритмов и сенсорных конфигураций SLAM с точки зрения их применимости к задачам ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Сравнительный анализ современных алгоритмов SLAM. В настоящее время наиболее распространенными и актуальными решениями для SLAM в автономных системах, включая БАС, являются системы на основе 3D LIDAR с мультисенсорным слиянием. Как показано в обзоре X. Xu (2022) [2], ключевые алгоритмы включают LOAM, LeGO-LOAM, LIO-SAM и их вариации. Эти системы эффективны для высокоточного 3D-картирования в структурированных и частично динамичных средах, но имеют ограничения в условиях плотного дыма, типичных для пожаров: лазерные импульсы LIDAR рассеиваются на частицах дыма и пыли, что приводит к потере точек, шуму в облаках точек и деградации регистрации [4].

Для преодоления этих ограничений развиваются альтернативные подходы на базе ультразвуковых сенсоров, которые лучше проникают сквозь дым [4]. В таблице 1 представлено сравнение ключевых решений высокоточного 3D-картирования.

Таблица 1. – Сравнение существующих SLAM-решений с учетом применимости для пожарной охраны

Алгоритм	Основные сенсоры	Преимущества	Недостатки	Применимость для пожарной охраны
LOAM [5]	Лидар	Средняя позиционная ошибка 0,88 % на KITTI; в экспериментах авторов относительная ошибка дрейфа 0,9–2,8 %	Работа в задымленной среде не исследована; зависит от качества лидарных данных	Подходит для картирования при достаточной видимости; для плотного дыма применимость не подтверждена
LeGO-LOAM [6]	Трехмерный лидар	Для базовой версии: средняя абсолютная ошибка траектории 5,37 м, средняя относительная ошибка траектории 0,061	Испытания проведены не для пожаров и не для задымленной среды	Может использоваться в сложной геометрической обстановке, но прямых подтверждений нет
LIO-SAM [7]	Лидар + данные изображения	Предложено улучшение за счет использования информации изображения, семантических признаков и скоростных признаков	По доступному источнику не подтверждены численные показатели дрейфа и ошибки траектории	Перспективен для динамической среды, но для пожарной охраны требует дополнительного обоснования
SuMa [8]	3-мерный лидар	Плотное лидарное картирование и глобально согласованная карта	Работа в условиях пожара и дыма не анализировалась	Пригоден для точного картирования при хорошей видимости
FirebotSLAM [9]	Тепловизионная камера	Построение трехмерной карты и оценка движения только по тепловизионным изображениям; ориентирован на задымленную среду	Сложность выделения устойчивых признаков на тепловизионных изображениях; хуже видны холодные объекты	Один из наиболее релевантных методов для пожаров в помещениях и ограниченной видимости
4DRT-SLAM [10]	4-мерный радар + тепловизионная камера	Оценка по абсолютной и относительной ошибке; метод специально разработан для среды с дымом	Ошибка возрастает на поворотах; в неструктурированной среде результаты хуже	Один из наиболее перспективных методов для пожарной охраны, но требует дальнейшей проверки на БАС

Продолжение таблицы 1

Алгоритм	Основные сенсоры	Преимущества	Недостатки	Применимость для пожарной охраны
Range-SLAM [11]	Сверхширокополосная система позиционирования	Может использоваться для локализации в неблагоприятных условиях	Требует уточнения условий развертывания; не заменяет полноценное трехмерное картирование	Возможен для локализации в помещениях
Ultrasonic-based SLAM [12]	Ультразвуковые датчики	Низкая стоимость и работоспособность при ограниченной видимости	Ограниченная дальность и меньшая детализация карты	Подходит для локальных задач в небольших помещениях; для БАС возможности ограничены

Из представленного сравнения следует, что для задач пожарной охраны наибольший интерес представляют методы, ориентированные на работу в условиях задымления и ограниченной видимости. К числу таких решений относятся FirebotSLAM и 4DRT-SLAM, поскольку в их основе лежит использование сенсоров, менее чувствительных к факторам среды, которые затрудняют применение классических лидарных и визуальных систем.

FirebotSLAM [9] представляет собой подход к одновременной локализации и картированию, основанный на использовании тепловизионных изображений. Его особенностью является построение трехмерной карты и оценка перемещения по данным тепловизионной камеры, что позволяет применять метод в условиях задымления, когда обычные оптические средства наблюдения теряют информативность. Такой подход может быть полезен при обследовании внутренних помещений, поиске очагов горения и выявлении участков с повышенной температурой. Вместе с тем возможности метода ограничены особенностями тепловизионных данных: холодные объекты и элементы сцены с низким температурным контрастом могут отображаться менее отчетливо, чем при использовании лидарных систем или обычных камер. Отображение препятствий в алгоритме FirebotSLAM представлено на рисунке 2.

4DRT-SLAM [10] основан на совместном использовании четырехмерного радара и тепловизионной камеры. В отличие от методов, построенных только на лидарных или оптических данных, данный подход ориентирован на работу в среде с дымом и ограниченной видимостью. Радиолокационные данные позволяют получать информацию о структуре сцены в условиях, при которых лазерное сканирование и обычная видеосъемка становятся менее надежными, а тепловизионная камера дополняет эту информацию сведениями о температурных особенностях объектов. В результате метод может рассматриваться как перспективный для картирования задымленных помещений, выявления препятствий и повышения полноты информации о текущей обстановке. При этом авторы отмечают, что точность работы системы зависит от характера сцены: в неструктурированной среде и при маневрах с поворотами ошибка возрастает, поэтому данный инструмент предпочтительно использовать в больших помещениях или на открытых территориях. Работа радара и тепловизора 4DRT-SLAM представлена на рисунке 3.

Рассмотренные особенности 4DRT-SLAM, а также ранее проанализированного FirebotSLAM, показывают, что для повышения качества разведки в условиях чрезвычайных ситуаций наибольший интерес представляют мультисенсорные SLAM-системы, обеспечивающие построение пространственной модели обстановки в реальном времени. Их применение позволяет повысить точность 3D-моделирования, устойчивость к помехам и полноту

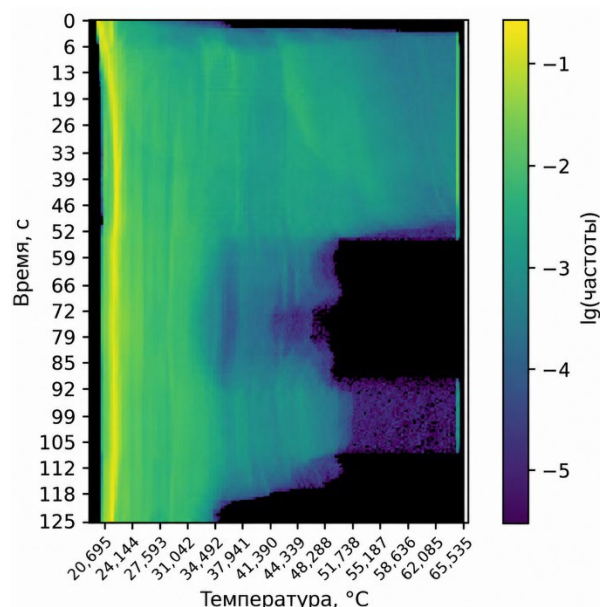


Рисунок 2. – Карта распределения температурных данных в алгоритме FirebotSLAM: зависимость логарифма частоты встречаемости температурных значений от температуры и времени наблюдения [10]

данных, используемых при принятии управленческих решений. Это важно в условиях ограниченной видимости, когда своевременное картирование пространства способствует снижению ошибок позиционирования, уточнению структуры опасной зоны и более обоснованной оценке рисков, включая вероятность повторных обрушений. Подобный подход соответствует современным зарубежным тенденциям в области аварийно-спасательных технологий, связанным с использованием интеллектуального слияния сенсорных данных для повышения эффективности действий в сложной обстановке [11].

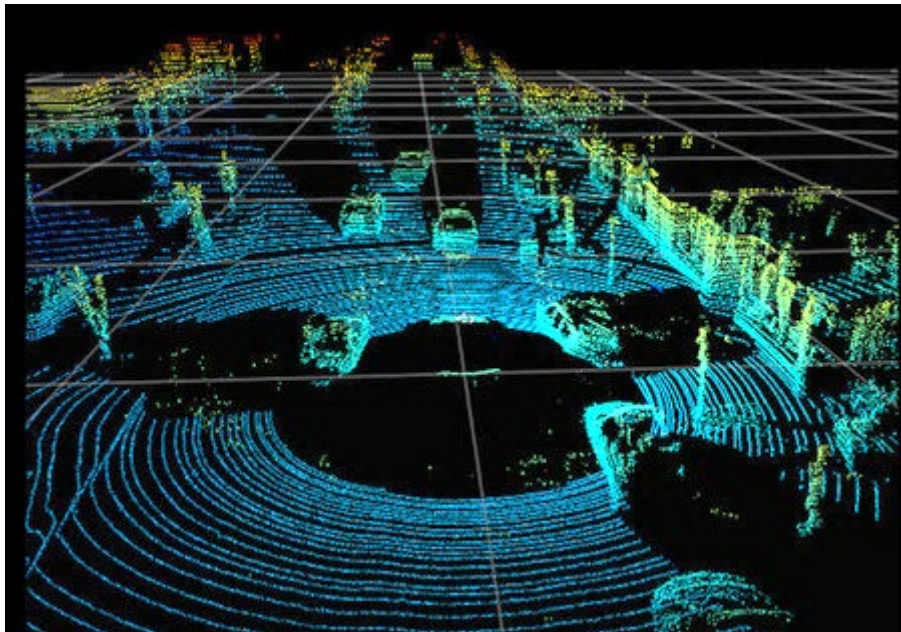


Рисунок 3. – Пример работы метода 4DRT-SLAM

С учетом указанных преимуществ представляется целесообразным рассматривать интеграцию систем FirebotSLAM и 4DRT-SLAM с беспилотными авиационными средствами. Такая концепция основана на использовании дронов в качестве мобильных платформ для оперативного сбора данных в реальном времени, их последующей обработки и передачи трехмерных моделей РЛЧС. Оснащение БАС соответствующей полезной нагрузкой – тепловизионными камерами для FirebotSLAM и 4D-радарами в сочетании с тепловизорами для 4DRT-SLAM – позволяет частично преодолеть ограничения традиционных LIDAR-систем в условиях густого дыма, пыли и плохой видимости [13]. В результате создаются предпосылки для автономного или полуавтономного применения дронов в интересах разведки, повышения безопасности спасателей и сокращения времени принятия решений.

Точность построения пространственной модели определяется совокупным влиянием ошибок инерциальных измерений, шумов сенсоров и качества замыкания траектории. В условиях дыма и пыли качество лидарных данных может снижаться, что приводит к росту ошибки локализации и ухудшению построенной карты. По этой причине в подобных сценариях представляют интерес сенсорные решения, менее чувствительные к аэрозольным помехам.

В дыму LIDAR увеличивает шум сенсора, делая модель бесполезной, в то время как радары в 4DRT-SLAM минимизируют его, обеспечивая предиктивное картирование рисков, например вероятность обрушения как функцию деформаций. При анализе трехмерной модели объекта информация о деформациях, смещениях и нарушении геометрии конструкций может использоваться для оценки риска повторного обрушения.

Применительно к беспилотным авиационным средствам такой подход может использоваться для выявления участков с повышенной температурой, уточнения конфигурации проходов и препятствий, а также для дополнительной оценки обстановки в помещениях с ограниченной видимостью.

С учетом указанных особенностей и преимуществ рассмотренных мультисенсорных решений представляется целесообразным их интеграция с беспилотными авиационными средствами. Общие принципы такой интеграции включают несколько этапов. На этапе подготовки и запуска беспилотная платформа оснащается необходимыми сенсорами и вычислительными модулями, после чего выполняет взлет в автоматическом или полуавтоматическом

режиме с переходом от GPS-навигации (только при случае работы вне здания) к SLAM-позиционированию в условиях ограниченного доступа. На этапе сбора и обработки данных системы FirebotSLAM и 4DRT-SLAM в реальном времени формируют пространственную модель обстановки: первая – на основе тепловых признаков, вторая – на основе радиолокационного и тепловизионного анализа. На этапе передачи информации полученные трехмерные модели с указанием разрушений, тепловых зон и потенциальных местоположений пострадавших направляются РЛЧС по защищенным каналам связи для предиктивной модели поддержки принятия управленческих решений (по данной информации возможно сделать вывод о будущем ухудшении ситуации ликвидации ЧС).

Выбор сенсорной конфигурации БАС в зависимости от типа пожара. Выбор конкретной сенсорной конфигурации беспилотного авиационного средства определяется не только техническими возможностями платформы, но и типом пожара, характером объекта и условиями разведки. Для пожаров в зданиях и сценариев, сопровождающихся задымлением, разрушением конструкций и ограниченной видимостью, наибольший интерес представляют тепловизионные и радиолокационно-тепловизионные решения, в таких условиях приоритет имеют методы, способные сохранять информативность при наличии дыма и сложной внутренней структуры объекта. С этой точки зрения наиболее перспективным является FirebotSLAM, поскольку ориентирован на использование тепловизионных данных.

Для ландшафтных пожаров и обследования открытых пространств более востребованным может быть 4DRT-SLAM при условии, что задымление не приводит к существенному ухудшению качества данных.

Для техногенных пожаров на промышленных объектах приоритет получает устойчивость системы к дыму, сложной геометрии сцены, наличию технологических препятствий и потенциально опасных зон. В таких условиях наиболее целесообразно применение комбинированных сенсорных решений, обеспечивающих более полное представление об обстановке и повышающих безопасность разведки.

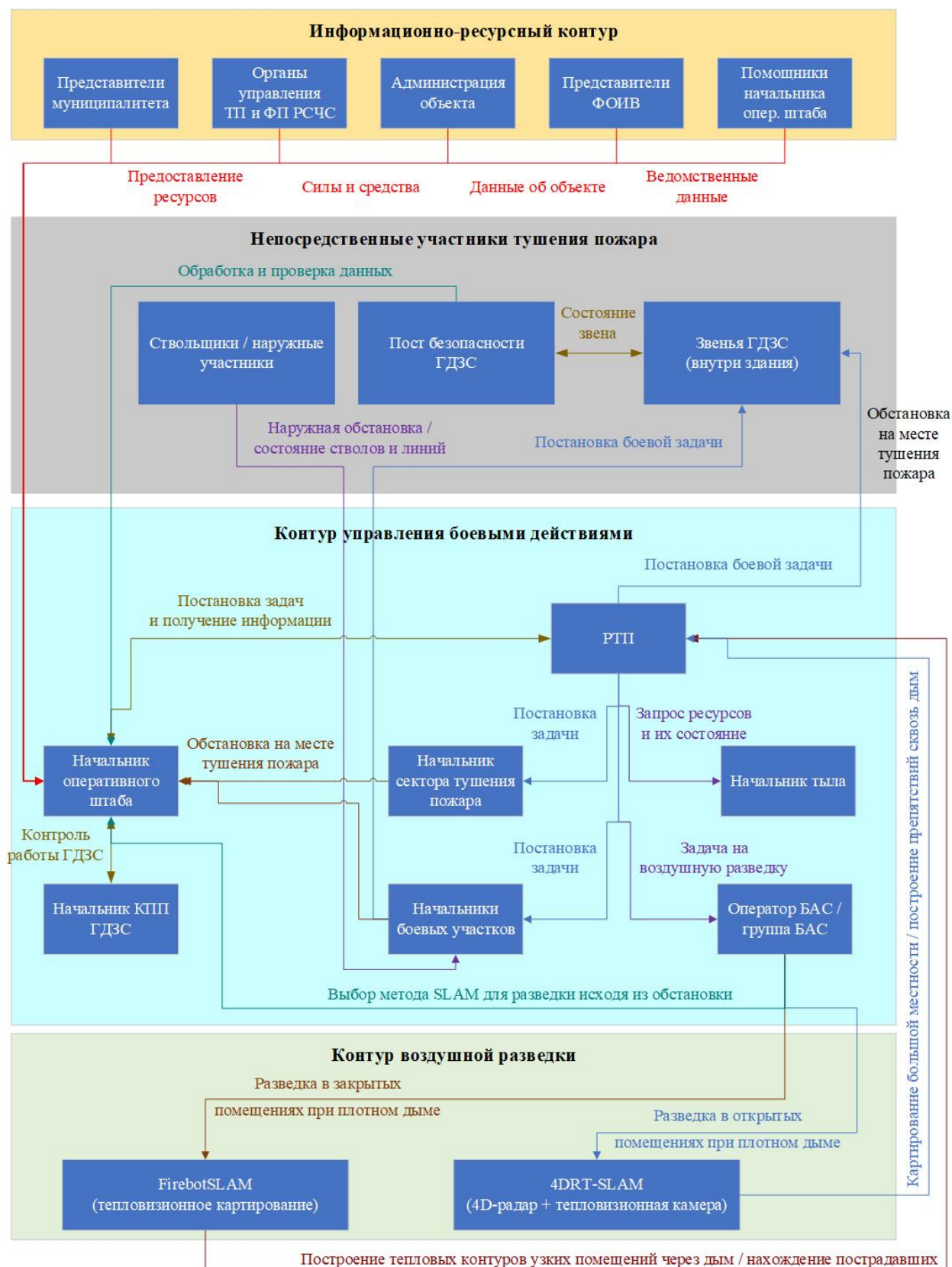
Проведенный анализ показал, что применение FirebotSLAM и 4DRT-SLAM в составе БАС следует рассматривать не только с позиции выбора сенсорной конфигурации, но и как компонент информационно-аналитического обеспечения тушения пожара. Интеграция данных технологий в систему воздушной разведки позволяет расширить объем сведений о текущей обстановке, повысить полноту пространственного представления о зоне пожара и создать основу для последующей предиктивной аналитики. С учетом этого на рисунке 4 представлена структурная схема информационного взаимодействия контуров управления, воздушной разведки и оперативного применения результатов картирования при тушении пожара.

Заключение

В статье рассмотрены современные подходы к применению систем SLAM в беспилотных авиационных средствах для пространственного картирования зоны чрезвычайной ситуации. Проведенный анализ показал, что методы на основе 3D LIDAR обеспечивают высокую точность построения облаков точек и трехмерных моделей в стандартных условиях, однако их применение существенно ограничивается в среде с дымом, пылью и ухудшенной видимостью.

В связи с этим наибольший интерес для задач пожарной охраны представляют решения, ориентированные на использование сенсоров, менее чувствительных к аэрозольным помехам. К таким решениям относятся FirebotSLAM, основанный на применении тепловизионной камеры, и 4DRT-SLAM, использующий совместную обработку данных четырехмерного радара и тепловизионной камеры. Эти методы могут рассматриваться как перспективные для картирования задымленных помещений и повышения полноты информации, поступающей руководителю ликвидации чрезвычайной ситуации.

Практическая значимость проведенного анализа состоит в том, что он позволяет уточнить направления выбора сенсорных и алгоритмических решений для БАС, применяемых при разведке в условиях ограниченной видимости. Вместе с тем для окончательной оценки применимости рассмотренных методов в задачах МЧС России необходимы дальнейшие экспериментальные исследования, включая проверку их работы на беспилотных платформах в условиях, приближенных к реальной обстановке чрезвычайной ситуации.



ТП – территориальные подсистемы; ФП – функциональные подсистемы;
 РСЧС – Единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций;
 ФОИВ – федеральные органы исполнительной власти; ГДЗС – газодымозащитная служба;
 РТП – руководитель тушения пожара; БАС – беспилотные авиационные средства

Рисунок 4. – Структурная схема интеграции технологий FirebotSLAM и 4DRT-SLAM в систему воздушной разведки и информационного сопровождения принятия решений при тушении пожара

ЛИТЕРАТУРА

1. Широков, Г.С. Применение фото- и видеосъемки с использованием БАС в целях решения задач МЧС России / Г.С. Широков, И.В. Сацук // Молодые ученые в решении актуальных проблем безопасности: материалы VI Всеросс. науч.-практ. конф., Железногорск, 24 мая 2024 г. – Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2024. – С. 293–297. – EDN: LLSMVR.
2. Xu, X. A review of multi-sensor fusion slam systems based on 3D Lidar / X. Xu, L. Zhang, J. Yang, [et al.] // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14, No. 12. – Article 2835. – DOI: 10.3390/rs14122835.
3. Кравченко, С.А. Пожар как наиболее вероятная чрезвычайная ситуация в городской среде / С.А. Кравченко // Безопасность городской среды: материалы Межвузовской студенческой научной конференции, Омск, 29 ноября 2013 г. / Омский государственный институт сервиса. – Омск, 2013. – С. 17–19. – EDN: TJRYCN.
4. Яровой, В.Ю. Об особенностях программного обеспечения для средств восстановления видимости звена газодымозащитной службы в задымленной среде / В.Ю. Яровой, Г.Ю. Шамсудинов, В.В. Морозов // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 8 (128). – С. 848–858. – EDN: SCSEPM.
5. Zhang, J. LOAM: Lidar odometry and mapping in real-time / J. Zhang, S. Singh // Robotics: Science and Systems: proc. of X Intern. scientific conf., Berkeley, USA, July 12–16, 2014. – USA, Berkeley, University of California, 2014. – 9 p. – DOI: 10.15607/RSS.2014.X.007.
6. Xue, G. Research on underground coal mine map construction method based on LeGO-LOAM improved algorithm / G. Xue, R. Li, Sh. Liu, J. Wei // Energies. – 2022. – Vol. 15, No. 17. – Article 6256, 17 p. – DOI: 10.3390/en15176256. – EDN: PXAKZC.
7. Meng, X. An improved LIO-SAM algorithm by integrating image information for dynamic and unstructured environments / X. Meng, X. Chen, Sh. Chen [et al.] // Measurement Science and Technology. – 2024. – Vol. 35, No. 9. – Article 096313. – DOI: 10.1088/1361-6501/ad56b1. – EDN: QEEYD.
8. Qin, X. SUMA: A partial materialization-based scalable query answering in OWL 2 DL / X. Qin, X. Zhang, M.Q. Yasin [et al.] // Data Science and Engineering. – 2021. – Vol. 6, No. 2. – P. 229–245. – DOI: 10.1007/s41019-020-00150-0. – EDN: HERMAO.
9. van Manen B.R., Sluiter V., Mersha A.Y. FirebotSLAM: Thermal SLAM to increase situational awareness in smoke-filled environments / van Manen B.R., Sluiter V., Mersha A.Y. // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 17. – Article 7611, 25 p. – DOI: 10.3390/s23177611.
10. Zhang, J. 4DRT-SLAM: Robust SLAM in smoke environments using 4D radar and thermal camera based on dense deep learnt features / J. Zhang, R. Xiao, H. Li [et al.] // Proc. of «2023 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM)», Penang, Malaysia, June 9–12, 2023. – IEEE, 2023. – P. 19–24. – DOI: 10.1109/CIS-RAM55796.2023.10370026.
11. Dai, Y. Grey Wolf resampling-based Rao-Blackwellized particle filter for mobile robot simultaneous localization and mapping / Y. Dai, M. Zhao // Journal of Robotics. – 2021. – Vol. 2021. – Article 4978984, 9 p. – DOI: 10.1155/2021/4978984. – EDN: EMSUBA.
12. Khan, A. Vision guided robotic inspection for parts in manufacturing and remanufacturing industry / A. Khan, C. Mineo, G. Dobie [et al.] // Journal of Remanufacturing. – 2021. – Vol. 11, No. 1. – P. 49–70. – DOI: 10.1007/s13243-020-00091-x. – EDN: VLCMYB.
13. Cai, X. TrinitySLAM: On-board real-time event-image fusion SLAM system for drones / X. Cai, J. Xu, K. Deng [et al.] // ACM Transactions on Sensor Networks. – 2024. – Vol. 20, No. 6. – Article 121, 22 p. – DOI: 10.1145/3696420. – EDN: TWVDCE.

**Применение систем SLAM в беспилотных авиационных комплексах
для оценки обстановки при чрезвычайных ситуациях**
Using SLAM systems in unmanned aircraft complexes to assess situation in emergencies

Шамсудинов Глеб Юрьевич

Сибирская пожарно-спасательная академия
ГПС МЧС России (Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирская пожарно-
спасательная академия Государственной
противопожарной службы Министерства
Российской Федерации по делам гражданской
обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации
последствий стихийных бедствий»), факультет
инженеров пожарной безопасности, курсант

Адрес: ул. Северная, 1,
662972, Железногорск,
Красноярский край, Россия
Email: gleb.shamsudinov@mail.ru
SPIN-код: 9108-2708

Gleb Yu. Shamsudinov

Siberian Fire and Rescue Academy
of EMERCOM of Russia (Federal State Budget
Educational Establishment of Higher Vocational
Training «The Siberian Fire and Rescue Academy
of State Firefighting Service of the Ministry
of Russian Federation for Civil Defense,
Emergencies and Elimination of Consequences
of Natural Disasters»), Faculty of Fire Safety
Engineers, cadet

Address: Severnaya str., 1,
662972, Zheleznogorsk,
Krasnoyarsk Krai, Russia
Email: gleb.shamsudinov@mail.ru
ORCID: 0009-0005-5736-0327

Яровой Вячеслав Юрьевич

Сибирская пожарно-спасательная академия
ГПС МЧС России, кафедра пожарной тактики
и аварийно-спасательных работ, преподаватель

Адрес: ул. Северная, 1,
662972, Железногорск,
Красноярский край, Россия
Email: yarovoiviacheslav@yandex.ru
SPIN-код: 8454-3940

Vyacheslav Yu. Yarovoy

Siberian Fire and Rescue Academy
of EMERCOM of Russia, Chair of Fire Tactics
and Emergency Rescue Operations, Lecturer

Address: Severnaya str., 1,
662972, Zheleznogorsk,
Krasnoyarsk Krai, Russia
Email: yarovoiviacheslav@yandex.ru
ORCID: 0009-0008-9078-107X

Михайлова Анна Константиновна

кандидат медицинских наук

Сибирская пожарно-спасательная академия
ГПС МЧС России, кафедра пожарной тактики
и аварийно-спасательных работ, доцент

Адрес: ул. Северная, 1,
662972, Железногорск,
Красноярский край, Россия
Email: it@sibpsau.ru
SPIN-код: 1569-4127

Anna K. Mikhaylova

PhD in Medical Sciences

Siberian Fire and Rescue Academy
of EMERCOM of Russia, Chair of Fire Tactics
and Emergency Rescue Operations,
Associate Professor

Address: Severnaya str., 1,
662972, Zheleznogorsk,
Krasnoyarsk Krai, Russia
Email: it@sibpsau.ru
ORCID: 0000-0003-3332-3087

USING SLAM SYSTEMS IN UNMANNED AIRCRAFT COMPLEXES TO ASSESS SITUATION IN EMERGENCIES

Shamsudinov G.Yu., Yarovoy V.Yu., Mikhaylova A.K.

Purpose. To conceptually substantiate and analyze the application of SLAM systems in unmanned aerial vehicles for precise 3D and 4D mapping of objects and terrain in emergency situations to provide timely and accurate information to emergency response managers (ERM).

Methods. A review of existing SLAM architectures, analysis of multi-sensor data fusion methods, comparison of algorithms (LOAM, LeGO-LOAM, LIO-SAM, etc.) based on literature sources and a conceptual evaluation of the results using metrics of mapping accuracy, model resolution, and sustainability to interference.

Findings. Multisensor SLAM systems demonstrating the potential for creating highly accurate 3D models of objects and terrain in extreme conditions were analyzed. It has been established that the use of SLAM for operational mapping in emergency situations allows for increasing the accuracy of information for ERM, reducing the time for making management decisions and minimizing risks during emergency response.

Application field of research. The conceptual conclusions obtained can be used to develop strategies for implementing SLAM systems in unmanned aerial vehicles for monitoring and modeling emergency zones, emergency response radar information systems, and for solving other life safety problems.

Keywords: artificial intelligence, SLAM method, unmanned aerial vehicles, emergency response, innovative technologies.

(The date of submitting: January 27, 2026)

REFERENCES

1. Shirokov G.S., Satsuk I.V. Primeneniye foto i video s"yemki s ispol'zovaniyem BAS v tselyakh resheniya zadach MCHS Rossii [Application of photo and video shooting using UAS to solve the problems of the EMERCOM of Russia]. *Proc. of VI All-Russian scientific-practical conf. «Molodye uchenye v reshenii aktual'nykh problem bezopasnosti»*, Zheleznogorsk, May 24, 2024. Zheleznogorsk: Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia, 2024. Pp. 293–297. (rus). EDN: LLSMVR.
2. Xu X., Zhang L., Yang J., Cao C., Wang W., Ran Y., Tan Z., Luo M. A review of multi-sensor fusion slam systems based on 3D LIDAR. *Remote Sensing*, 2022. Vol. 14, No. 12. Article 2835. DOI: 10.3390/rs14122835.
3. Kravchenko S.A. Pozhar kak naibolee veroyatnaya chrezvychaynaya situatsiya v gorodskoy srede [Fire as the most likely emergency situation in urban environment]. *Proc. of Interuniversity student scientific conf. «Bezopasnost' gorodskoy sredy»*, Omsk, November 29, 2013. Omsk State Institute of Service. Omsk, 2013. Pp. 17–19. EDN: TJRYCN.
4. Yarovoy V.Yu., Shamsudinov G.Yu., Morozov V.V. Ob osobennostyakh programmnoy obespecheniya dlya sredstv vosstanovleniya vidimosti zvena gazodymozashchitnoy sluzhby v zadymlennoy srede [On the peculiarities of software for means of restoring the visibility of the gas smoke protection service link in a smoke-filled environment]. *Engineering Journal of Don*, 2025. No. 8 (128). Pp. 848–858. EDN: SCSEPM.
5. Zhang J., Singh S. LOAM: Lidar odometry and mapping in real-time. *Proc. of X Intern. scientific conf. «Robotics: Science and systems»*, Berkeley, USA, July 12–16, 2014. USA, Berkeley, University of California, 2014. 9 p. DOI: 10.15607/RSS.2014.X.007.
6. Xue G., Li R., Liu Sh., Wei J. Research on underground coal mine map construction method based on LeGO-LOAM improved algorithm. *Energies*, 2022. Vol. 15, No. 17. Article 6256, 17 p. DOI: 10.3390/en15176256. EDN: PXAKZC.
7. Meng X., Chen X., Chen Sh., Fang Y., Fan H., Luo J., Wu Yu., Sun B. An improved LIO-SAM algorithm by integrating image information for dynamic and unstructured environments. *Measurement Science and Technology*, 2024. Vol. 35, No. 9. Article 096313. DOI: 10.1088/1361-6501/ad56b1. EDN: QEEYD.
8. Qin X., Zhang X., Yasin M.Q., Wang Sh., Feng Zh., Xiao G. SUMA: A partial materialization-based scalable query answering in OWL 2 DL. *Data Science and Engineering*, 2021. Vol. 6, No. 2. Pp. 229–245. DOI: 10.1007/s41019-020-00150-0. EDN: HERMAO.

9. van Manen B.R., Sluiter V., Mersha A.Y. FirebotSLAM: Thermal SLAM to increase situational awareness in smoke-filled environments. *Sensors*, 2023. Vol. 23, No. 17. Article 7611, 25 p. DOI: 10.3390/s23177611.
10. Zhang J., Xiao R., Li H., Liu Y., Suo X., Hong C., Lin Z., Wang D. 4DRT-SLAM: Robust SLAM in smoke environments using 4D radar and thermal camera based on dense deep learnt features. *Proc. of «2023 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM)»*, Penang, Malaysia, June 9–12, 2023. IEEE, 2023. Pp. 19–24. DOI: 10.1109/CIS-RAM55796.2023.10370026.
11. Dai Y., Zhao M. Grey Wolf resampling-based Rao-Blackwellized particle filter for mobile robot simultaneous localization and mapping. *Journal of Robotics*, 2021. Vol. 2021. Article 4978984, 9 p. DOI: 10.1155/2021/4978984. EDN: EMSUBA.
12. Khan A., Mineo C., Dobie G., Macleod Ch., Pierce G. Vision guided robotic inspection for parts in manufacturing and remanufacturing industry. *Journal of Remanufacturing*, 2021. Vol. 11, No. 1. P. 49–70. DOI: 10.1007/s13243-020-00091-x. EDN: VLCMYB.
13. Cai X., Xu J., Deng K., Lan H., Wu Yu., ZhuGe X., Yang Zh. TrinitySLAM: On-board real-time event-image fusion SLAM system for drones. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2024. Vol. 20, No. 6. Article 121, 22 p. DOI: 10.1145/3696420. EDN: TWVDCE.

Copyright © 2026 Shamsudinov G.Yu., Yarovoy V.Yu., Mikhaylova A.K.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ НАРУЖНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-РЕКЛАМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ ANSYS

Мартыненко Т.М., Смиловенко О.О., Пронкевич С.А.,
Мартыненко И.М., Лосик С.А.

Цель. Повышение надежности наружных рекламных и информационных конструкций (билбордов) посредством численного моделирования на основе современного программного комплекса (ANSYS) для выявления концентрации напряжений и оценки риска разрушения от метеонагрузок на основе анализа прочности и устойчивости.

Методы. Для создания цифровой модели конструкции был применен комплексный подход, объединяющий этапы геометрического построения и инженерного расчета. Исходная геометрия была создана в системе автоматизированного проектирования Autodesk Inventor Professional. Для прочностных и динамических расчетов использовался модуль ANSYS.

Результаты. Комплексное моделирование в среде ANSYS позволило получить результаты, характеризующие поведение конструкции билборда под расчетными нагрузками. Установлено, что при скорости набегающего потока 23 м/с среднее интегральное аэродинамическое давление на плоскость щита стандартного размером 3×6 м составляет 340 Па. Визуализация полей давления и скорости подтвердила формирование классической картины обтекания плоской преграды: зона высокого давления на наветренной стороне и зона турбулентного разрежения с вихреобразованием на подветренной стороне и по бокам конструкции. Определена результирующая ветровая нагрузка, которая для данной площади составляет 6,1 кН.

Область применения исследований. Построенная модель может служить основой для обоснованного технического обслуживания, прогнозируя остаточный ресурс конструкций. На основе моделирования возможно разработать программу точечного инструментального контроля конкретных критических узлов.

Ключевые слова: наружные рекламные конструкции, безопасность городской среды, ANSYS, конечно-элементный анализ, цифровое моделирование, ветровые нагрузки, усталостное разрушение, предиктивная диагностика.

(Поступила в редакцию 4 февраля 2026 г.)

Введение

Наружные рекламные и информационные конструкции (НИК) представляют собой неотъемлемый, но часто недооцененный по уровню опасности элемент современной городской инфраструктуры. Выполняя важные экономические и коммуникативные функции, они, по своей сути являются источником стационарной опасности. Будучи интегрированными в городской ландшафт, НИК являются источником риска. Их повсеместное расположение в зонах высокой пешеходной и транспортной активности в сочетании с наблюдаемым усилением экстремальных погодных явлений создает комплексную проблему безопасности. Поскольку НИК используются повсеместно, а их разрушение грозит серьезными последствиями – от травм среди населения до сбоев в работе транспорта и инфраструктуры, возникает потребность в создании действенных механизмов предупреждения рисков. Широкое применение НИК в сочетании с потенциальной тяжестью последствий их разрушения обуславливает насущную необходимость в разработке эффективных методов предотвращения опасностей.

Согласно заявлению Мингорисполкома в 2021 г. такие инциденты имели место вследствие износа и погодных условий. Масштаб проблемы иллюстрируют цифры: за 2020 г. выявлено 1937 нарушений содержания конструкций, выдано 237 предписаний балансодержателям, критическая ситуация сложилась с 68 конструкциями на путепроводах, 29 из которых требовали немедленного вмешательства¹.

¹ Рекламные конструкции в Минске к 1 апреля должны быть в надлежащем состоянии – Дорохович // Главный Бухгалтер: GB.BY. – 2021. – 12 марта. – URL: <https://www.gb.by/novosti/reklamnye-konstruktsii-v-minske-k-1-apre> (дата обращения 26.01.2025).

Решение этой задачи является важнейшим условием обеспечения общественной безопасности и устойчивого развития городской среды. Однако традиционный подход, основанный на расчетах по упрощенным методикам и эпизодических визуальных проверках, не соответствует уровню современных требований по обеспечению безопасности. Необходим переход к инжинирингу, основанному на данных и прогнозах. В этом новом контексте передовые программные комплексы для инженерного анализа, такие как ANSYS, перестают быть лишь инструментом в арсенале проектировщика. Они становятся краеугольным камнем системы мониторинга и раннего предупреждения об авариях для всей отрасли. Способность к комплексному многофизическому моделированию позволяет перейти от реагирования на инциденты к их предупреждению, создавая основу для интеллектуального управления жизненным циклом НИК и минимизации рисков для городской среды.

Цель работы заключается в повышении надежности НИК путем численного моделирования в среде ANSYS на основе анализа прочности и устойчивости для выявления областей концентрации напряжений и оценки риска разрушения конструкции при метеорологических воздействиях.

Основная часть

Актуальность проблемы обеспечения безопасности НИК определяется совокупностью социально-экономических и климатических факторов. Массовое расположение объектов в зонах повышенной пешеходной и транспортной активности (центральные магистрали, остановочные комплексы, пешеходные зоны) многократно увеличивает потенциальные последствия их аварийного разрушения, переводя технические риски в категорию угроз общественной безопасности. Дополнительной угрозой стало изменение климатических параметров, приводящее к росту повторяемости экстремальных метеорологических явлений [1; 2]. Многие из находящихся в эксплуатации конструкций, рассчитанных на основе действующих подходов, не имеют достаточного запаса прочности для противодействия увеличившимся динамическим нагрузкам.

Эксплуатация НИК в условиях открытой урбанизированной среды характеризуется одновременным воздействием следующих взаимосвязанных факторов.

Аэродинамические нагрузки. Ветровое воздействие, имеющее турбулентный пульсирующий характер, является доминирующим фактором риска для щитовых конструкций. Оно создает значительный опрокидывающий момент и инициирует циклические колебания, приводящие к накоплению усталостных повреждений материала.

Статические и квазистатические нагрузки. Собственный вес конструкции, снеговые отложения и гололедные образования формируют постоянную составляющую нагружения. Критическим аспектом является не только увеличение массы, но и существенное изменение аэродинамических свойств конструкции, ведущее к росту ее парусности.

Динамические и циклические воздействия. Вибрации, передаваемые от интенсивного транспортного потока через грунтовое основание, в сочетании с ветровой пульсацией приводят к многократному циклическому нагружению элементов. Это является основной причиной ослабления соединений и развития усталостных трещин.

Коррозионно-механическая деградация. Агрессивные компоненты городской атмосферы (противогололедные реагенты, промышленные выбросы, повышенная влажность) интенсифицируют процессы коррозии металлоконструкций. Это приводит к уменьшению рабочего сечения элементов, развитию трещинной сетки и катастрофическому снижению несущей способности.

Наибольшую опасность представляет синергетический эффект, при котором сочетание ослабляющих факторов (например, развитая коррозия опоры) с пиковым внешним воздействием (шквалистый ветер) приводит к внезапному хрупкому разрушению, не обнаруживаемому при плановых визуальных проверках [3].

Современная практика обеспечения безопасности НИК базируется на комбинации взаимодополняющих методов. *Расчетно-теоретические методы.* Применение систем конечно-элементного анализа, таких как SCAD и ANSYS, позволяет выполнять детальные статические и динамические расчеты, оценивая прочность, устойчивость и динамический отклик конструкции на комплекс расчетных нагрузок. *Экспериментальные методы.* Лабораторные испытания образцов материалов и натурные испытания полноразмерных конструкций служат для валидации расчетных моделей и получения данных о реальном поведении объекта под нагрузкой. *Методы эксплуатационного контроля,* которые включают

регулярный визуальный осмотр для выявления явных дефектов (коррозия, деформации) и инструментальный контроль с применением ультразвуковой дефектоскопии, толщинометрии, геодезических измерений и обследования фундаментов. Для особо ответственных объектов применяется система постоянного мониторинга с установкой датчиков (тензометров, акселерометров) и ведением цифрового паспорта технического состояния.

Программный комплекс ANSYS представляет собой интегрированную среду для сквозного моделирования всех этапов жизненного цикла конструкции, обеспечивая переход от реактивного к предиктивному управлению безопасностью. ANSYS Mechanical позволяет проводить нелинейный статический и динамический анализ с учетом реальных факторов работы: геометрической нелинейности, контактного взаимодействия в узлах, податливости оснований [4]. Это обеспечивает точную оценку концентрации напряжений в критических зонах (узел «каркас-стойка»), поведения соединений и общей устойчивости системы. ANSYS Fluent (CFD-модуль) дает возможность выполнять детальное моделирование турбулентного обтекания конструкции и получать точные пространственные распределения аэродинамического давления вместо усредненных нормативных коэффициентов. Результаты такого анализа (визуализация потока, силы, моменты, оценка вихревого резонанса) служат основой для формирования корректных нагрузок в прочностном расчете [5].

Интеграция модулей позволяет моделировать синергетические эффекты, прогнозировать накопление усталостных повреждений от миллионов циклов нагружения с поправкой на влияние коррозии, определять критические элементы и в итоге оценивать остаточный ресурс конструкции.

Проведено исследование процессов пластической деформации в несущих узлах конструкции билборда. Трехмерная параметрическая модель исследуемого объекта (рис. 1) была разработана в среде Autodesk Inventor Professional [6; 7]. Выбор данного CAD-пакета обусловлен его возможностями по созданию ассоциативных сборок, где геометрические элементы связаны параметрическими зависимостями. Это обеспечивает гибкость при проектировании, позволяя оперативно изменять ключевые размеры в ходе вычислительного эксперимента – например, сечение опорной стойки, конфигурацию силового каркаса или параметры фундамента. Для последующего конечно-элементного анализа созданная модель была импортирована в программный комплекс ANSYS.

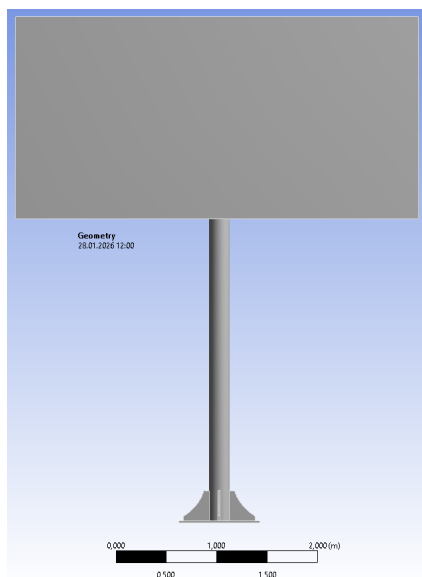


Рисунок 1. – Цифровой двойник наружной рекламной конструкции

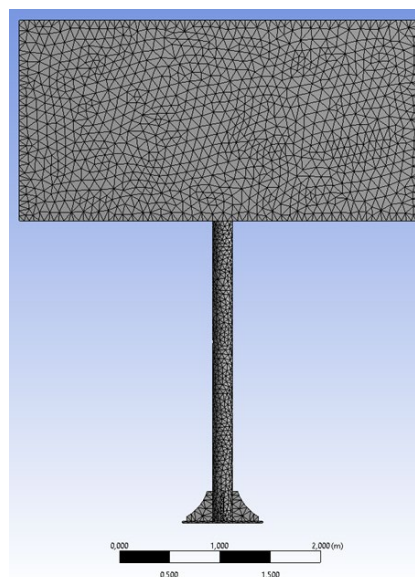


Рисунок 2. – Вид конечно-элементной модели наружной рекламной конструкции

На следующем этапе геометрическая CAD-модель была преобразована в конечно-элементную расчетную сетку. Для этого потребовалось определить характерный размер, форму и метод дискретизации для каждого компонента конструкции. Для критически важных зон, где прогнозируется высокая концентрация напряжений (в первую очередь в узле сопряжения силового каркаса рекламного поля с опорной стойкой, а также в зонах сварных швов и крепежных узлов), был задан размер конечного элемента, равный 10 мм. Для менее напряженных элементов конструкции, таких как ребра жесткости каркаса и раскосы, использовалась

адаптивная градация размера ячейки сетки в диапазоне от 20 до 30 мм (рис. 2). Оба типа элементов поддерживают решение как линейных, так и нелинейных задач, включая моделирование пластичности, ползучести, больших деформаций и контактного взаимодействия [8]. В результате построения с учетом выбранных параметров дискретизации общая расчетная модель билборда состояла из 14 000 конечных элементов. Для ключевых узлов и зон с ожидаемой концентрацией напряжений использовалось 756 элементов SOLID 186 (призматической формы). Основной объем модели, включая каркас щита и опорную конструкцию, был представлен 14 756 элементами SOLID 187 тетраэдральной формы, что обеспечило баланс между точностью расчета и вычислительной эффективностью (табл. 1).

Таблица 1. – Сводная таблица исходных данных

Модель	Объем, м ³	Масса, кг	Количество элементов	Моменты инерции относительно координатных осей			Узловые точки
				OX , кг·м ²	OY , кг·м ²	OZ , кг·м ²	
НИК	1,7087	13 414	14 756	10 699	16 802	274 04	28 129
Воздух	17 998	0	0	0	0	0	0

Примечание. Начало координат помещено в точку закрепления опорной стойки к фундаменту. Ориентация осей связана с геометрией билборда: ось OY направлена вертикально вверх (вдоль опорной стойки); ось OX ориентирована горизонтально вдоль плоскости щита (по ширине рекламного поля); ось OZ направлена перпендикулярно плоскости щита (в сторону наблюдателя).

В таблице 1 приведены основные инерционные и конечно-элементные характеристики двух моделей: НИК (несущая конструкция билборда) и воздух (окружающая среда). Моменты инерции характеризуют распределение массы всей конструкции относительно точки защемления стойки, что непосредственно используется в расчетах на устойчивость и при оценке опрокидывающих нагрузок. Модель «воздух» имеет нулевые значения по всем параметрам, т.к. она не обладает массой и не дискретизируется – ее введение связано с учетом аэродинамических граничных условий.

Для выполнения вычислительного эксперимента по аэродинамическому обтеканию билборда в ANSYS Fluent была создана трехмерная гибридная расчетная сетка, учитывающая как внешний поток, так и внутренний объем конструкции. Расчетная область представляет собой объем, существенно превышающий габариты самой конструкции для корректного задания граничных условий набегающего потока и исключения влияния искусственных границ на результат. Область была разбита на несколько подобластей.

Внешняя область (External Domain) охватывает пространство вокруг билборда. Для минимизации влияния границ области на результат ее размеры были выбраны таким образом, чтобы расстояние от конструкции до входной, выходной и боковых границ составляло не менее 5–10 характерных размеров щита (высоты или ширины).

Внутренняя область (Internal Domain) выделена для моделирования внутреннего объема конструкции, пространства внутри силового каркаса, образуемого стойками, ригелями и раскосами. Для точного моделирования геометрии потока был применен метод вложенных областей с построением пристеночного пограничного слоя. Пограничный слой (Boundary Layer) на всех поверхностях конструкции (внешних и внутренних) был сгенерирован как структурированный пристеночный слой из призматических элементов. Вне пограничного слоя использовалась неструктурированная сетка из тетраэдральных элементов, что обеспечило гибкость и автоматизацию дискретизации сложной внешней области. Зоны с ожидаемыми сильными градиентами параметров потока (перед щитом, в следе за ним) были локально сгущены. Итоговая расчетная сетка, учитывающая внутренний объем конструкции, содержит 2,1 млн элементов (рис. 3).

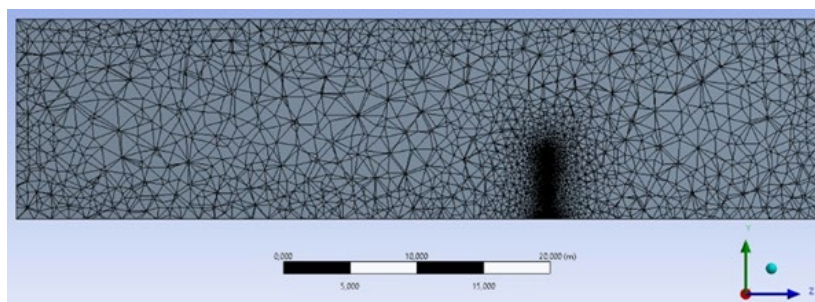


Рисунок 3. – Вид конечно-элементной модели, учитывающей аэродинамическое обтекание наружной рекламной конструкции

Для оценки эксплуатационных нагрузок было проведено CFD-моделирование в ANSYS Fluent. В качестве расчетного сценария был выбран ветровой режим со скоростью набегающего потока 23 м/с [9]. В результате численного расчета получено пространственное распределение статического и динамического давления на все поверхности билборда – лицевую, тыльную и боковые стороны, а также на элементы силового каркаса. Анализ полей давления показал, что пиковые нагрузки возникают в центральной части рекламного поля, где поток тормозится, создавая зону повышенного давления.

Среднее интегрированное значение аэродинамической нагрузки, действующей нормально на плоскость щита, составило 340 Па. Эта величина представляет собой результирующую силу давления, приложенную к конструкции. Для перевода ее в сосредоточенную силу², действующую на опоры, необходимо умножить данное давление на площадь парусности щита. Важно отметить, что полученное значение 340 Па является средним интегральным (рис. 4). Локальные давления в зонах кромок и концентрации потока могут существенно превышать эту величину, что подтверждает необходимость локального усиления конструкции в этих областях. Данный результат использован в качестве входной нагрузки для последующего прочностного нелинейного анализа в ANSYS Mechanical для оценки напряженно-деформированного состояния всей конструкции.

Результат статического расчета в ANSYS Mechanical, выполненного при действии расчетной ветровой нагрузки, позволил количественно оценить жесткость несущей системы билборда. Максимальный прогиб опорной стойки – составил 5,8 мм. Данное значение представляет собой отклонение верхней точки стойки от ее вертикальной оси под действием результирующей аэродинамической силы (рис. 5).

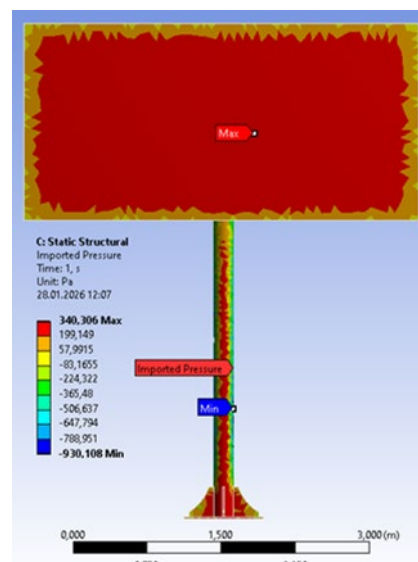


Рисунок 4. – Распределение аэродинамической нагрузки по поверхности билборда

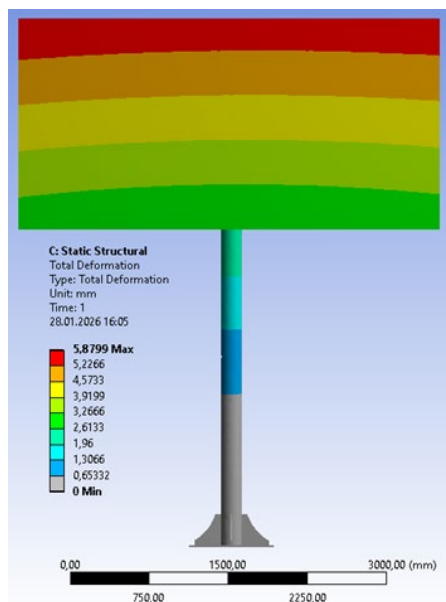


Рисунок 5. – Пространственная картина распределения суммарных деформаций

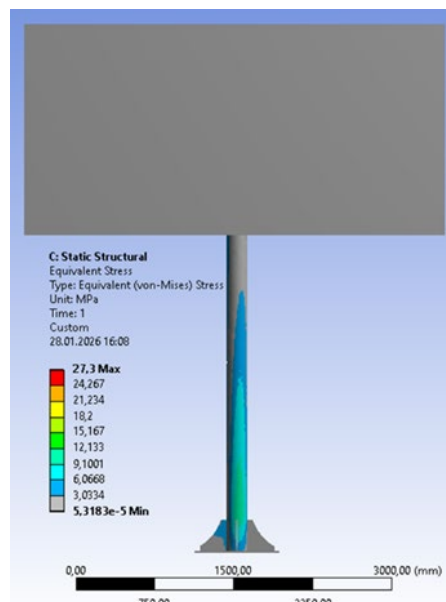


Рисунок 6. – Пространственная картина распределения эквивалентных напряжений

Прогиб 5,8 мм для свободностоящей конструкции высотой несколько метров свидетельствует о высокой общей жесткости спроектированной опоры и эффективном сопротивлении ветровой нагрузке. Для инженерной оценки часто используется относительный прогиб, равный отношению абсолютного отклонения к высоте конструкции. В данном случае

² Пример для стандартного билборда 3×6 м. Сила = Давление × Площадь = 340 Па × 18 м² = 6120 Н (624 кгс).

это отношение будет находиться в пределах $1/1000$ – $1/1500$, что существенно меньше типичных нормативных ограничений (обычно $1/200$ – $1/300$), регламентирующих допустимые перемещения для обеспечения визуальной и эксплуатационной надежности [10]. Полученное значение 5,8 мм подтверждает, что под действием экстремальной нагрузки – 23 м/с конструкция работает в упругой области, без возникновения остаточных деформаций. Деформации носят обратимый характер, что является обязательным условием для многократного циклического нагружения конструкции в течение всего срока службы.

Результаты детального конечно-элементного расчета позволили выявить и количественно оценить зону максимального силового воздействия в конструкции билборда. Установлено, что пиковое напряженно-деформированное состояние возникает в зоне сопряжения опорной стойки с фундаментным основанием. Именно этот узел является ключевым с точки зрения передачи всех эксплуатационных нагрузок (ветровых, снеговых, собственного веса) от надземной конструкции в грунт. Значение максимальных приведенных (эквивалентных по Мизесу) напряжений в этой области составило 27 МПа. Концентрация напряжений в прифундаментной зоне является типичной и ожидаемой для консольных конструкций. Она обусловлена действием максимального изгибающего момента, который линейно возрастает от верха стойки к ее заделке (рис. 6).

Для наиболее распространенных марок конструкционной стали (например, Ст. 3) предел текучести составляет 235–255 МПа [11]. Таким образом, полученное значение 27 МПа составляет лишь 10–11 % от предела текучести материала. Это указывает на значительный запас прочности в наиболее опасном сечении даже при экстремальной нагрузке. Напряжение в 27 МПа свидетельствует о том, что материал конструкции работает в упругой области. Это исключает риск возникновения остаточных деформаций или хрупкого разрушения в базовом узле крепления при штатных внешних воздействиях.

Заключение

Проведенное исследование, объединяющее методологию конечно-элементного моделирования в ANSYS Mechanical и вычислительной гидродинамики в ANSYS Fluent, позволило осуществить детальный инженерный анализ напряженно-деформированного состояния наружной рекламной конструкции (билборда) под действием расчетных эксплуатационных нагрузок. Разработана и апробирована процедура перехода от параметрической CAD-модели к детализированной расчетной сетке, адекватно учитывающей геометрическую сложность конструкции.

Установлено, что при скорости ветра 23 м/с средняя интегральная аэродинамическая нагрузка на плоскость щита составляет 340 Па, что создает опрокидывающий момент. Определено, что максимальное отклонение (прогиб) верхней точки опорной стойки при данной нагрузке не превышает 5,8 мм, что свидетельствует о высокой общей жесткости конструкции и ее соответствии критериям эксплуатационной пригодности. Выявлено, что зоной максимальной концентрации напряжений является узел сопряжения стойки с фундаментом. Пиковое значение эквивалентных напряжений в этой зоне достигает 27 МПа, что составляет лишь 10–11 % от предела текучести стандартной конструкционной стали, подтверждая существенный запас прочности в наиболее опасном сечении.

Расчеты подтвердили, что при действии экстремальных нагрузок в рамках рассмотренных сценариев вся конструкция работает в упругой области. Однако для гарантированной безопасности в условиях возрастания климатических рисков и при выявлении локальных дефектов в процессе эксплуатации рекомендованы следующие мероприятия по усилению:

- усиление критического узла «стойка – фундамент», установка дополнительных ребер жесткости (косынок) или монтаж накладного усиливающего бандажа в зоне максимального изгибающего момента;
- снижение парусности, обязательное применение перфорированных рекламных полотен для снижения динамической составляющей ветровой нагрузки на 25–30 %;
- повышение коррозионной стойкости, использование сталей с повышенной атмосферостойкостью (например, 09Г2С) или нанесение комбинированных лакокрасочных покрытий с контролируемой толщиной сухого слоя не менее 120 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бардин, М.Ю. Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга / М.Ю. Бардин, Э.Я. Ранькова, Т.В. Платова [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2020. – № 5. – С. 29–45. – EDN: QAAIAR.
2. Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). – Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2023. – 3056 p. – DOI: 10.1017/9781009325844.
3. Мартыненко, Т.М. Исследование механического гистерезиса при циклическом нагружении в болтовом соединении опорно-поворотного устройства крана / Т.М. Мартыненко, О.О. Смиловенко, С.А. Пронкевич, С.А. Лосик, И.М. Мартыненко // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2025. – Т. 9. № 3. – С. 335–343. – DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-3.335. – EDN: PJDRXZ.
4. Ким, Д.А. Анализ ветрового воздействия на здания и сооружения / Д.А. Ким // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 12 (72) – С. 431–441. – EDN: VUVTFF.
5. Белостоцкий, А.М. Численное моделирование задач строительной аэродинамики. Разработка методик расчета ветровых воздействий и исследование реальных объектов / А.М. Белостоцкий, С.И. Дубинский, И.Н. Афанасьева // Вестник МГСУ. – 2010. – № 4–5. – С. 182–185. – EDN: RTUJSB.
6. Чернов, С.А. Моделирование устойчивости подкрепленной тонкостенными стержнями пластины / С.А. Чернов // Программные продукты и системы. – 2014. – № 4. – С. 183–187. – EDN: TPOWNB.
7. Басов, К.А. ANSYS в примерах и задачах / К.А. Басов; под ред. Д.Г. Красковского. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 223 с.
8. Клованич, С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики / С.Ф. Клованич. – Запорожье: ИПО «Запорожье», 2009. – 400 с. – ISBN 978-966-7732-72-2.
9. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*: СП 20.13330.2016. – Введ. 04.06.2017. – М.: Стандартинформ, 2016. – IV, 74 с.
10. Смиловенко, О.О. Техническая механика: учебник / О.О. Смиловенко, Т.М. Мартыненко, С.А. Лосик. – Мн.: РИВШ, 2021. – 520 с. – ISBN: 9789855865132.
11. Солнцев, Ю.П. Материаловедение: учебник для студентов вузов / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин; под ред. Ю.П. Солнцева. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2020. – 784 с. – ISBN 078-5-93808-345-6.

Оценка прочности и устойчивости наружных информационно-рекламных конструкций на основе моделирования в среде ANSYS

Assessment of strength and stability of external information and advertising structures based on modeling in ANSYS environment

Мартыненко Тарас Михайлович

кандидат физико-математических наук,
доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
промышленной безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: taras2480@gmail.com

SPIN-код: 4999-4213

Taras M. Martynenko

PhD in Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Industrial Safety, Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: taras2480@gmail.com

ORCID: 0009-0000-6609-2030

Смиловенко Ольга Олеговна

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
промышленной безопасности, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: olgasmilovenko@gmail.com

Olga O. Smilovenko

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Industrial Safety, Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: olgasmilovenko@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1612-9573

Пронкевич Сергей Александрович

кандидат физико-математических наук,
доцент

Закрытое акционерное общество
«Струнные технологии», бюро расчета
машиностроительных конструкций,
начальник бюро

Адрес: ул. Железнодорожная, 33,
220089, г. Минск, Беларусь

Email: ps_minsk@mail.ru

Sergey A. Pronkevich

PhD in Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor

Closed Joint-Stock Company «String
Technologies», Bureau of Machine-Building
Structures Calculation, Head of the Bureau

Address: Zheleznodorozhnaya str., 33,
220089, Minsk, Belarus

Email: ps_minsk@mail.ru

ORCID: 0009-0008-4708-8325

Мартыненко Игнат Михайлович

кандидат физико-математических наук,
доцент

Белорусский государственный университет,
факультет прикладной математики
и информатики, кафедра фундаментальной
математики и интеллектуальных систем,
доцент

Адрес: пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь

Email: im_martynenko@mail.ru

Ignat M. Martynenko

PhD in Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor

Belarusian State University,
Faculty of Applied Mathematics
and Computer Science, Chair of Fundamental
Mathematics and Intelligent Systems,
Associate Professor

Address: Nezavisimosti avenue, 25,
220030, Minsk, Belarus

Email: im_martynenko@mail.ru

ORCID: 0009-0009-4420-7875

Лосик Сергей Анатольевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
промышленной безопасности,
старший преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: losikserg@mail.ru

SPIN-код: 3355-0668

Sergey A. Losik

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Industrial Safety,
Senior Lecturer

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: losikserg@mail.ru

ORCID: 0009-0002-2501-9026

ASSESSMENT OF STRENGTH AND STABILITY OF EXTERNAL INFORMATION AND ADVERTISING STRUCTURES BASED ON MODELING IN ANSYS ENVIRONMENT

Martynenko T.M., Smilovenko O.O., Pronkevich S.A., Martynenko I.M., Losik S.A.

Purpose. The purpose of this study is to increase the strength, stability and safe operation of outdoor advertising structures (billboards) based on the modern ANSYS engineering modeling software package.

Methods. To create a digital model of the design, an integrated approach was applied, combining the stages of geometric construction and engineering calculation. The original geometry was created in Autodesk Inventor Professional CAD system. ANSYS module was used for strength and dynamic calculations.

Findings. Complex modeling in the ANSYS environment made it possible to obtain results characterizing the behavior of the billboard design under design loads. It was found that at an incoming flow speed of 23 m/s, the average integral aerodynamic pressure on the plane of a standard size board of 3x6 m is 340 Pa. Visualization of the pressure and velocity fields confirmed the formation of a classic picture of the flow around a flat obstacle, a high pressure zone on the windward side and a turbulent rarefaction zone with vortex formation on the leeward side and on the sides of the structure. The resulting wind load is determined, which for this area is 6.1 kN.

Application field of research. The model is the basis for the development of reasonable smooth repair and maintenance, predicting the residual life of structures. On the basis of modeling, it is possible to develop a program for point instrumental control of specific critical nodes.

Keywords: outdoor advertising structures, urban environment safety, ANSYS, finite element analysis, digital modeling, wind loads, fatigue destruction, predictive diagnostics.

(The date of submitting: February 4, 2026)

REFERENCES

1. Bardin M.Y., Ran'kova E.Y., Platova T.V., Samokhina O.F., Korneva I.A. Modern surface climate change as inferred from routine climate monitoring data. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020. Vol. 45. No. 5. C. 317–329. DOI: 10.3103/S1068373920050027. EDN: QSXZZX.
2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2023. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844.
3. Martynenko T.M., Smilovenko O.O., Pronkevich S.A., Losik S.A., Martynenko I.M. [Issledovanie mekhanicheskogo gisterezisa pri tsiklicheskom nagruzhении v boltovom soedinenii oporno-povorotnogo ustroystva kрана] Investigation of mechanical hysteresis under cyclic loading in bolted connection of crane slewing-bolt device. *Journal of Civil Protection*, 2025. Vol. 9, No. 3. Pp. 335–343. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-3.335. EDN: PJDRXZ
4. Kim D.A. [Analiz vetrovogo vozdeystviya na zdaniya i sooruzheniya] Analysis of wind impact on buildings and structures. *Engineering Bulletin of Don*, 2020. No. 12 (72). Pp. 431–441. (rus). EDN: VUVTF.
5. Belostotskiy A.M., Dubinskiy S.I., Afanas'eva I.N. Chislennoe modelirovanie zadach stroitel'noy aerodinamiki. Razrabotka metodik rascheta vetrovykh vozdeystviy i issledovanie real'nykh ob"ektov [Numerical simulation in civil aerodynamics. Development of methodology of calculation of wind effects and study of real object]. *Vestnik MGSU*, 2010. No. 4-5. Pp. 182–185. (rus). EDN: RTUJSB.
6. Chernov S.A. Modelirovanie ustoychivosti podkreplennoy tonkostennymi sterzhnyami plastiny [Modeling the stability of a plate reinforced with thin-walled rods]. *Software & Systems*, 2014. No. 4. Pp. 183–187. (rus). EDN: TPOWNB.
7. Basov K.A. *ANSYS v primerakh i zadachakh* [ANSYS in examples and tasks]. Moscow: ComputerPress, 2002. 223 p. (rus)
8. Klovanih S.F. *Metod konechnykh elementov v nelineynykh zadachakh inzhenernoy mekhaniki* [Method of finite elements in nonlinear problems of engineering mechanics]. Zaporozhye: Publishing and Printing Association «Zaporozhye», 2009. 400 p. ISBN 978-966-7732-72-2.
9. *Nagruzki i vozdeystviya: SP 20.13330.2016* [Loads and impacts: Set of Rules 20.13330.2016]. Introduced June 4, 2017. Moscow: Standartinform, 2016. IV, 74 p.
10. Smilovenko O.O., Martynenko T.M., Losik S.A. *Tekhnicheskaya mekhanika* [Technical mechanics]: textbook. Minsk: National Institute for Higher Education, 2021. 520 p. (rus)

11. Solntsev Yu.P., Pryakhin E.I. *Materialovedenie* [Materials science]: textbook for university students. St. Petersburg: KHIMIZDAT, 2020. 784 p. (rus). ISBN 078-5-93808-345-6.

Copyright © 2026 Martynenko T.M., Smilovenko O.O.,
Pronkevich S.A., Martynenko I.M., Losik S.A.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ НУТРИЦИОЛОГИЧЕСКОЙ РАЗРАБОТКИ
КАК ЭЛЕМЕНТА СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ****Шакирова А.И., Антонова И.И., Шагиахметова А.Р., Гумеров Т.Ю.**

Цель. Разработать научно обоснованный специализированный пищевой продукт нутрициологической направленности и экспериментально подтвердить его эффективность как элемента системы защиты в чрезвычайных ситуациях (ЧС).

Методы. Аналитический – сравнительный анализ рационов питания личного состава пожарно-спасательных формирований ряда регионов Российской Федерации, государств – участников СНГ и стран Прибалтики. Технологический – разработка состава нутрициологической поддержки повышенной пищевой ценности с соблюдением критериев функциональности ингредиентов, включающих сорбционную способность, антиоксидантную активность и содержание эссенциальных минеральных веществ. Экспериментальный – оценка безопасности методом биотестирования и определение антиоксидантной активности феррицианидным методом с обработкой данных методами статистического анализа и применением программного пакета Statistica 10.0.

Результаты. Представлены результаты сравнительного анализа рассмотренных рационов питания, где выявлен дефицит эссенциальных пищевых веществ, критичных для защиты в ЧС: пищевые волокна (дефицит 53,0 %), сухофрукты (69,2–78 %), витамин С (57 %), витамин Е (67 %), омега-3 полиненасыщенные жирные кислоты (72 %), калий и магний (по 33 %). Разработан продукт нутрициологической поддержки, обеспечивающий компенсацию выявленного дефицита пищевых волокон (8,5 г/100 г, 34 % суточной нормы), магния (131 мг/100 г, 33 %), витамина А (279,8 мкг/100 г, 31 %), калия (346 мг/100 г, 14 %). Биотестирование подтвердило безопасность продукта (выживаемость *Paramecium caudatum* 97,2±1,3 % против 98,5±1,1 % в контроле, $p > 0,05$). Антиоксидантная активность экстракта составила 74,5±0,3 % и сохранялась в течение 60 суток хранения (снижение не более 1,5 %, $p > 0,05$).

Область применения исследований. Результаты исследования могут быть рекомендованы для включения в состав индивидуальных рационов питания личного состава пожарно-спасательных формирований, привлекаемого к ликвидации последствий ЧС, как элемент системы защиты от интоксикации, оксидативного стресса и электролитного дисбаланса.

Ключевые слова: профессиональные риски, пожарно-спасательные формирования, защита в ЧС, нутрициологическая разработка, профилактическое питание, безопасность и качество, антиоксидантная активность, биотестирование.

(Поступила в редакцию 9 марта 2026 г.)

Введение

Актуальность исследования. Обеспечение техносферной безопасности и защиты населения в ЧС является приоритетной задачей государства [1]. Ключевым элементом этой системы выступает личный состав пожарно-спасательных формирований, который первым принимает на себя воздействие опасных факторов ЧС. Профессиональная деятельность сотрудников МЧС относится к категории работ с экстремальными условиями труда, характеризующимися комплексным воздействием физических, химических и психоэмоциональных факторов. Согласно статистическим данным, за последние пять лет 29 % смертей сотрудников МЧС при исполнении служебных обязанностей обусловлены сердечно-сосудистыми заболеваниями, формирующимися под влиянием комплекса профессиональных вредностей: теплового и химического воздействия, гипоксии, хронического стресса и нарушений режима питания [2; 3]. Аналогичные тенденции наблюдаются в Беларуси, Казахстане и других странах. В системе обеспечения безопасности при ЧС особое место занимает защита личного состава, включающая не только использование средств индивидуальной защиты, но и поддержание гомеостаза организма в условиях экстремальных нагрузок [4–6].

Эффективность работы спасателей может быть ухудшена из-за воздействия и накопления в организме токсических продуктов аварии и метаболических нарушений, что неизбежно повлияет на снижение эффективности аварийно-спасательных работ и увеличение времени ликвидации последствий ЧС.

Одним из способов ускорения процессов восстановления спасателей после воздействия особо опасных факторов и увеличения времени их устойчивой работы в очаге опасности можно рекомендовать современную нутрициологическую поддержку. Интерес ученых из Российской Федерации, Республики Беларусь и Республики Казахстан в вопросах исследования влияния питания на состояние эффективной работоспособности сотрудников пожарно-спасательных формирований и других лиц экстремальных профессий в настоящее время приобретает наиболее масштабный характер. Установлено, что ухудшение условий питания и дефицит незаменимых компонентов пищи может привести к сердечно-сосудистой патологии, связанной с воздействием профессиональных рисков [4–6].

Исследования белорусских специалистов [4; 5] дополняют картину региональными особенностями профессиональных рисков и подходами к организации продовольственного обеспечения в системе МЧС Республики Беларусь. В работах казахстанских авторов рассматриваются вопросы оценки пищевого статуса и разработки подходов к коррекции рационов питания сотрудников противопожарной службы [6]. Однако нет научных работ по сравнительному анализу утвержденных рационов питания в различных регионах и странах по выявлению общих дефицитов и разработке унифицированных подходов к нутритивной коррекции как элементу биологической защиты в ЧС.

Международный опыт демонстрирует реализацию программ нутритивной поддержки пожарных, включая обогащение рационов антиоксидантами, полиненасыщенными жирными кислотами (ПНЖК) и пищевыми волокнами. Национальная ассоциация пожарных IAFF рассматривает питание как элемент системы профилактики профессиональных заболеваний, а в Финляндии функционирует государственная программа «Здоровый пожарный», интегрированная в систему охраны труда спасателей.

Методологическую основу для сравнительного анализа (табл. 1) составили нормативные правовые акты, регламентирующие продовольственное обеспечение. Полные тексты таких актов в открытом доступе обнаружены для Российской Федерации, Республики Беларусь, Республики Казахстан и Кыргызской Республики. Для остальных государств официальные нормы отсутствуют, поэтому рационы смоделированы на основе общих принципов питания военнослужащих и национальных традиций (больше риса, сухофруктов, лепешек). Это позволило провести сопоставимый анализ, разделяя утвержденные и смоделированные данные.

Таблица 1. – Нормативно-правовая база продовольственного обеспечения пожарных и спасателей

Страна / Регион	Нормативный документ	Базовый повседневный рацион (региональная детализация)	Специализированные пайки (особые условия)
Российская Федерация (федеральный уровень)	Приказ МЧС России от 29.04.2013 № 290 ¹	Унифицированный состав для всех регионов (пак № 1) [7]: хлеб (пшеничный и ржаной) – 700 г, крупы – 120 г, макаронные изделия – 30 г, мука – 50 г, мясо – 250 г, рыба – 150 г, овощи – 500 г, фрукты – 200 г, молоко – 150 мл, сухофрукты – 10 г, масло растительное и животное, яйца, сахар, чай, кофе, соки	7 видов пайков для особых условий: 1. Индивидуальный суточный паек (№ 3) 2. Промежуточный паек (№ 4) 3. Бортовой (аварийный) паек 4. Арктический рацион (№ 7) 5. Арктический промежуточный (№ 8) 6. Бортовой для экипажей судов 7. Горный рацион (см. таблицу 1а)
Центральный ФО (Москва)	Приказ ГУ МЧС по г. Москве от 15.02.2020 № 45	Хлеб – 650 г, крупы – 120 г, мясо – 220 г, рыба – 120 г, овощи – 450 г, фрукты – 180 г, сухофрукты – 10 г	Применение федеральных норм для специализированных пайков без изменений [7]
Северо-Западный ФО (Санкт-Петербург)	Приказ ГУ МЧС по г. Санкт-Петербургу от 10.03.2020 № 78		

¹ В редакции приказа МЧС России от 23 декабря 2019 г. № 768 «О внесении изменений в приложения № 1, 2 и 3 к приказу МЧС России от 29.04.2013 № 290». – URL: <https://pravo.ppt.ru/prikaz/mchs/n-768-229347> (дата обращения 10.02.2025).

Продолжение таблицы 1

Страна / Регион	Нормативный документ	Базовый повседневный рацион (региональная детализация)	Специализированные пайки (особые условия)
Северо-Западный ФО (Калининградская область)	Приказ ГУ МЧС по Калининградской обл. от 05.04.2020 № 112	Хлеб – 650 г, крупы – 120 г, мясо – 220 г, рыба – 200 г, овощи – 450 г, фрукты – 180 г, сухофрукты – 15 г	Повышенное потребление рыбы (приморский регион); применение федеральных норм для специализированных пайков [7]
Южный ФО (Краснодарский край)	Приказ ГУ МЧС по Краснодарскому краю от 18.03.2020 № 67	Хлеб – 600 г, крупы – 100 г, мясо – 200 г, рыба – 100 г, овощи – 600 г, фрукты – 250 г, сухофрукты – 20 г	Повышенное потребление овощей, фруктов и сухофруктов (южный регион); при работе в жарком климате (выше 35 °С) предусмотрены дополнительные нормы жидкости и электролитов [7]
Сибирский ФО (Красноярский край)	Приказ ГУ МЧС по Красноярскому краю от 12.04.2020 № 83	Хлеб – 720 г, крупы – 140 г, мясо – 260 г, рыба – 160 г, овощи – 380 г, фрукты – 140 г, сухофрукты – 10 г	Повышенное потребление хлеба, круп, мяса (северный регион); применяется арктический рацион (№ 7) для задач в Крайнем Севере [1; 3; 7]
Дальневосточный ФО (Республика Саха-Якутия)	Приказ ГУ МЧС по Республике Саха от 18.03.2020 № 51	Хлеб – 750 г, крупы – 150 г, мясо – 280 г, рыба – 220 г, овощи – 350 г, фрукты – 130 г, сухофрукты – 10 г	Максимальное потребление хлеба, мяса, рыбы (арктический регион); применяется арктический рацион (№ 7) и арктический промежуточный (№ 8)
Республика Беларусь	Приказ МЧС Республики Беларусь от 31.12.2021 № 356	Норма 1. Набор продуктов по общему пайку: хлеб (пшеничный и ржаной) – 630 г, мука – 10 г, крупы – 130 г, макаронные изделия – 40 г, мясо – 180 г, рыба – 100 г, молоко – 100 г, овощи – 880 г, сухофрукты – 20 г, масло растительное и животное, яйца, сахар, чай, соки	5 видов пайков для особых условий [8]: Норма 2. Набор продуктов по летному пайку Норма 3. Набор продуктов по инженерно-техническому пайку Норма 4. Набор продуктов по курсантскому пайку Норма 5. Общий сухой паек (3 варианта) Норма 6. Сухой паек для летного состава
Республика Казахстан	Приказ МЧС Республики Казахстан от 01.08.2025 № 304	Общий паек: хлеб – 500 г, крупы – 120 г, мясо – 220 г, рыба – 120 г, овощи – 500 г, фрукты – 200 г, сухофрукты – 20 г	Индивидуальный суточный паек на срок до 3 суток содержит сублимированные продукты, хлебцы, консервы мясные и мясорастительные, сухофрукты, шоколад, чай, сахар, соль, спички, одноразовые приборы. Состав детализирован в приложении к приказу [9]
Республика Армения	Приказ МЧС Республики Армения от 05.06.2018 № 42-Н	Хлеб – 550 г, крупы – 130 г, мясо – 200 г, рыба – 80 г, овощи – 450 г, фрукты – 180 г, сухофрукты – 15 г	Отдельные нормы для горных условий (высокогорные спасательные работы). Состав горного пайка близок к российскому аналогу [10]
Кыргызская Республика	Постановление Правительства Кыргызской Республики от 16.02.2021 № 44	Общевойсковой паек (норма № 1): Хлеб – 400 (350) г, крупы – 80 г, рис – 30 г, макаронные изделия – 90 г, мясо + рыба – 200 + 120 г, яйцо куриное (целое) – 2 шт, сыр – 15 г, масло коровье/растительное – 30/50 г, сахар-песок – 65 г, овощи – 915 г, фрукты сушеные – 30 г, молоко сгущенное – 30 г, соки (фрукты свежие) – 100 г	Применяются специализированные нормы: – лечебный паек – увеличенное содержание белков, витаминов и заменителей; – ночной паек – выдается дополнительно за несение службы в ночное время (повышенная калорийность) [11]

Продолжение таблицы 1

Страна / Регион	Нормативный документ	Базовый повседневный рацион (региональная детализация)	Специализированные пайки (особые условия)
Латвийская Республика	Приказ VUGD ² № 458 от 21.06.2011 и № 147 от 23.02.2010	Хлеб – 550 г, крупы – 110 г, мясо – 200 г, рыба – 150 г, овощи – 450 г, фрукты – 180 г, сухофрукты – 15 г	Повышенное потребление рыбы (балтийский регион); состав специализированных пайков соответствует требованиям ЕС [12]
Литовская Республика	Приказ PAGD ³ № 1-148 от 19.03.2025	Хлеб – 560 г, крупы – 115 г, мясо – 210 г, рыба – 140 г, овощи – 460 г, фрукты – 185 г, сухофрукты – 15 г	
Эстонская Республика	Приказ Päästeamet ⁴ № 1.1-1/23 от 23.01.2023	Хлеб – 540 г, крупы – 110 г, мясо – 200 г, рыба – 130 г, овощи – 450 г, фрукты – 180 г, сухофрукты – 15 г	

Примечания. Базовый повседневный рацион (пак № 1) является базовым для стационарных условий, а также унифицирован для всех регионов России и стран постсоветского пространства с незначительными количественными вариациями, обусловленными географическими, климатическими и национальными особенностями.

Специализированные пайки составляют основное различие в системах продовольственного обеспечения. Наиболее развитая система специализированных пайков представлена в Российской Федерации (8 видов), что связано с разнообразием природно-климатических условий (Арктика, высокогорье, жаркий климат) и необходимостью обеспечения личного состава при выполнении задач в особых условиях [7; 13].

Для стран Балтии характерно повышенное потребление рыбы, что обусловлено географическим положением и соответствует рекомендациям ЕС по потреблению омега-3 ПНЖК.

Для южных регионов и стран с жарким климатом особенности национальной кухни предполагают высокое потребление овощей, фруктов и сухофруктов. Работа в условиях высоких температур (выше 35 °С) требует также дополнительной компенсации жидкости и электролитов, что должно быть учтено при формировании специализированных рационов питания спасателей.

Детальный анализ нормативной базы позволяет выделить 8 видов пайков (рационов питания), утвержденных для различных условий выполнения задач личным составом МЧС России. Их характеристика представлена в таблице 1а.

Таблица 1а. – Виды пайков (рационов питания) МЧС России [13]

№	Наименование пайка	Назначение	Основной состав (ключевые компоненты)
1	Индивидуальный суточный паек (норма № 3)	Для условий, когда невозможно приготовление горячей пищи вне пунктов постоянной дислокации или в пути следования продолжительностью одни сутки и более	Хлебцы (галеты) пшеничные – 300 г, консервы мясные – 250 г, консервы мясоовощные – 250 г, консервы мясорастительные – 250 г, консервы овощные – 100 г, молоко сгущенное – 45 г, сахар – 60 г, фрукты сушеные – 25 г (или фруктовая палочка – 50 г), шоколад тугоплавкий – 30 г, концентрат тонизирующего напитка – 60 г, чай – 4 г, кофе – 4 г, соль – 10 г, жевательная резинка – 10 г, портативный разогреватель, спички, вскрыватель консервов, одноразовые приборы
2	Промежуточный паек (норма № 4)	Для кратковременного обеспечения (до 12 часов) в условиях, не позволяющих организовать полноценное питание	Каша быстрого приготовления – 70 г (или макаронные изделия быстрого приготовления – 60 г, или картофельное пюре сухое – 60 г), консервы мясные – 100 г, сухофрукты, шоколад, сахар, чай
3	Бортовой (аварийный) паек	Для экипажей воздушных, морских и речных судов при аварийных ситуациях и вынужденной автономии	Галеты, консервы мясные, консервы мясоовощные, фруктовая палочка, шоколад тугоплавкий, сахар, соль, поливитамины, средства для обеззараживания воды

² Valsts ugunsdzēsības un glābšanas dienests (латышский) – Государственная пожарно-спасательная служба.

³ Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamentas (литовский) – Пожарно-спасательная служба.

⁴ Päästeamet (эстонский) – Спасательная служба.

Продолжение таблицы 1а

№	Наименование пайка	Назначение	Основной состав (ключевые компоненты)
4	Арктический рацион (норма № 7)	Для выполнения задач в условиях Крайнего Севера и Арктической зоны РФ с повышенной энергетической ценностью (до 4500–5000 ккал/сут) и адаптацией к холоду	Хлебцы (2 вида), хлебный ржаной батончик, консервы мясные, консервы с готовыми кашами с мясом, сухое мясо (вяленое), плавленый сыр, протеиновые батончики (3 вида: с молоком, энергетический, с мясом и печенью), фруктовая палочка, шоколад, кисель «Согревающий», кисель «Общеукрепляющий», напиток молочный сухой, сливки, БАД «Согревающий сбор», поливитамины, жевательная резинка, беспламенные разогреватели (3 шт.)
5	Арктический промежуточный (норма № 8)	Для кратковременного обеспечения в арктических условиях (21 наименование продуктов)	Хлебцы (1 вид), каши мгновенного приготовления, сушеное мясо – 50 г, сливочное масло – 20 г, протеиновый батончик (1 вид), кисель, шоколад, фруктовая палочка
6	Бортовой для экипажей морских, речных и воздушных судов	Для обеспечения питанием экипажей при длительных перелетах и плаваниях	Галеты, консервы мясные и мясорастительные, молоко сгущенное, фруктовая палочка, шоколад, сахар, чай, поливитамины, средства для обеззараживания воды
7	Горный рацион	Для выполнения задач в высокогорной местности (высота до 3000 м и более) с учетом гипоксии и повышенных энергозатрат	Шоколад – 100 г, печенье – 50 г, фрукты сушеные – 50 г, повидло (джем) – 25 г, макаронные изделия или крупа быстрого приготовления – 60 г, карамель леденцовая – 20 г, сахар – 60 г, чай – 6 г, колбаса сырокопченая – 30 г, сыр – 30 г

Примечание. Индивидуальный суточный паек (норма № 3) комплектуется в герметичную упаковку и включает также средства для разогрева пищи. Арктический рацион (норма № 7) характеризуется повышенной энергетической ценностью за счет увеличенного содержания жиров. Горный рацион дифференцируется по высоте: на высоте от 1500 до 3000 м выдается один набор продуктов, на высоте 3000 м и выше – расширенный состав [13].

Проблемная ситуация. Несмотря на различия в нормах продовольственного обеспечения, анализ существующих рационов выявляет общие недостатки, снижающие защитный потенциал организма спасателей:

- недостаточное содержание пищевых волокон, необходимых для связывания и выведения ксенобиотиков;
- дефицит антиоксидантов, критичных для нейтрализации свободных радикалов при оксидативном стрессе;
- недостаток сухофруктов как источников калия и пищевых волокон;
- отсутствие специализированных продуктов, которые могут быть использованы непосредственно в очаге ЧС как элемент биологической защиты.

Научная гипотеза. Разработка специализированного пищевого продукта нутрициологической направленности, обогащенного пищевыми волокнами и природными антиоксидантами, позволит повысить устойчивость организма спасателей к воздействию опасных факторов ЧС за счет компенсации выявленных нутриентных дефицитов и усиления антиоксидантной защиты.

Цель исследования. На основе сравнительного анализа профессиональных рисков и представленных рационов питания сотрудников пожарно-спасательных формирований научно обосновать и экспериментально подтвердить эффективность специализированного пищевого продукта нутрициологической направленности как элемента системы защиты в ЧС.

Задачи:

- провести сравнительный анализ рационов питания пожарных и спасателей в различных регионах России, странах СНГ и государствах Балтии;
- выявить структурный дефицит эссенциальных пищевых веществ, снижающий защитный потенциал организма в условиях ЧС;
- разработать рецептуру продукта с обоснованием критериев функциональности ингредиентов;

- экспериментально подтвердить показатели качества и безопасности разработанного продукта;
- обосновать применение нутрициологической разработки (продукта) как элемента системы защиты в ЧС.

Научная новизна. Впервые проведен сравнительный анализ утвержденных рационов питания пожарных и спасателей в 14 регионах Российской Федерации, 7 государствах – участниках СНГ, а также, для расширения сравнительной базы, в государствах Балтии (Латвия, Литва, Эстония). Выявлены общие структурные дефициты эссенциальных пищевых веществ, характерные для всех анализируемых рационов независимо от геополитических условий. На этой основе разработан продукт, целенаправленно воздействующий на ключевые звенья патогенеза профессионально обусловленных заболеваний и повышающий защитный потенциал организма в условиях ЧС. Новизна технического решения подтверждена патентами РФ № 2824197 и № 2859982 [14; 15].

Практическая значимость в контексте защиты в ЧС. Разработанный продукт может быть включен в состав индивидуальных рационов питания для личного состава пожарно-спасательных формирований, привлекаемого к ликвидации ЧС. Его применение в качестве превентивной меры защиты позволит снизить профессиональные риски, минимизировать последствия интоксикации и поддержать функциональную готовность спасателей на всех этапах выполнения АСР. Продукт может быть интегрирован в существующую систему обеспечения безопасности в ЧС как элемент дополнительной биологической защиты.

Основная часть

Материалы и методы. Исследование выполнено в период с сентября 2024 г. по декабрь 2025 г. на базе научно-исследовательской лаборатории кафедры технологии пищевых производств ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет». Программа исследований включала четыре последовательных блока:

1. **Аналитический.** Проведен сравнительный анализ нормативных правовых актов, регламентирующих продовольственное обеспечение личного состава пожарно-спасательных формирований, действующих на территории 14 субъектов Российской Федерации (Москва, Санкт-Петербург, Калининградская область, Республика Татарстан, Республика Башкортостан, Краснодарский край, Ростовская область, Ставропольский край, Свердловская область, Челябинская область, Новосибирская область, Красноярский край, Приморский край, Республика Саха-Якутия), 7 государств – участников Содружества Независимых Государств (Республика Беларусь, Республика Казахстан, Республика Армения, Азербайджанская Республика, Кыргызская Республика, Республика Молдова, Республика Таджикистан), а также, для расширения сравнительной базы, государств Балтии (Латвийская Республика, Литовская Республика, Эстонская Республика), что позволило проанализировать особенности продовольственного обеспечения в различных геополитических условиях. Выполнена количественная оценка фактического содержания в суточных рационах пищевых волокон, витаминов (С, Е, А, группы В), минеральных веществ (К, Mg, P, Na), ПНЖК и сопоставление полученных значений с физиологическими нормами для условий интенсивных физических нагрузок и воздействия опасных факторов ЧС. На основе анализа профессиональных рисков (термические воздействия, ингаляционное поступление продуктов горения, психоэмоциональный стресс, дефицит времени для организованного питания) проведена оценка недостаточности поступления эссенциальных пищевых веществ в организм личного состава.

2. **Технологический.** Выполнена разработка рецептуры специализированного пищевого продукта повышенной пищевой ценности с обоснованием критериев функциональности ингредиентов. Критерии функциональности включали: способность к сорбции ксенобиотиков (содержание пищевых волокон не менее 5 г/100 г готового продукта), наличие природных антиоксидантов (флавоноиды, токоферолы, каротиноиды) с доказанной способностью к нейтрализации активных форм кислорода, содержание эссенциальных минеральных веществ (К, Mg, P) в количестве не менее 15 % от суточной физиологической нормы на 100 г продукта, технологическую совместимость компонентов, отсутствие синтетических пищевых добавок и ГМО. Расчет пищевой и энергетической ценности выполнен аналитическим методом с использованием таблиц химического состава пищевых продуктов.

3. **Экспериментальный.** Оценку острой летальной токсичности проводили согласно ГОСТ Р 57166-2016 «Вода. Определение токсичности по выживаемости пресноводных ин-

фузорий *Paramecium caudatum* Ehrenberg» [16]. Водную вытяжку продукта готовили при гидромодуле 1:5, экспозиция составляла 60 мин при pH 6,8–7,2 и температуре 22 ± 2 °C. Учет выживших особей выполняли с использованием микроскопа МБС-10 (увеличение $\times 56$). Эксперимент проведен в трехкратной повторности. Контролем служила дехлорированная водопроводная вода.

Антиоксидантную активность определяли методом восстановления железа (FRAP) [17] с адаптацией для твердых пищевых продуктов. Экстракцию проводили 70 % этиловым спиртом при соотношении сырья к экстрагенту 1:10. Измерение оптической плотности выполняли на спектрофотометре ПЭ-5400УФ при длине волны 700 нм. Антиоксидантную активность выражали в процентах к контролю. Исследование стабильности показателя осуществляли при хранении образцов в герметичной полиэтиленовой упаковке при температуре 20 ± 2 °C и относительной влажности 70 ± 5 % в течение 30 и 60 суток.

4. *Аналитико-статистический.* Обработку экспериментальных данных проводили с использованием программного пакета Statistica 10.0, рассчитывали среднее арифметическое (M) и стандартное отклонение (SD). Достоверность различий между выборками оценивали с применением *t*-критерия Стьюдента при уровне значимости $p < 0,05$. Для аналитического обобщения результатов сравнительного анализа рационов использовали методы дескриптивной статистики с расчетом средневзвешенных значений по группам территорий.

Результаты и их обсуждение. Для выявления общих закономерностей и региональных особенностей продовольственного обеспечения пожарно-спасательных формирований проведена систематизация норм питания по основным группам продуктов (хлеб, крупы, мясо, рыба, овощи, фрукты, сухофрукты). Расчет содержания пищевых волокон выполнен с использованием справочных данных о химическом составе [18; 19] с учетом региональных особенностей потребления. Сравнительный анализ представленных рационов питания пожарных и спасателей представлен детальной проработкой в таблице 2.

Таблица 2. – Сравнительный анализ рационов питания пожарных и спасателей (суточный набор, г/сутки)

Регион/Страна	Хлеб	Крупы	Мясо	Рыба	Овощи	Фрукты	Сухо-фрукты	Пищевые волокна, г
Российская Федерация								
г. Москва	650	120	220	120	450	180	10	12,4
г. Санкт-Петербург	650	120	220	120	450	180	10	12,4
Калининградская обл.	650	120	220	200	450	180	15	13,0
Республика Татарстан	700	130	250	150	500	200	15	14,2
Республика Башкортостан	680	125	240	140	480	190	15	13,8
Краснодарский край	600	100	200	100	600	250	20	16,8
Ростовская обл.	620	110	210	110	550	220	15	15,2
Ставропольский край	630	115	220	100	500	200	15	14,0
Свердловская обл.	700	130	250	150	400	150	10	11,5
Челябинская обл.	680	125	240	140	420	160	10	11,8
Новосибирская обл.	700	130	250	150	400	150	10	11,5
Красноярский край	720	140	260	160	380	140	10	11,2
Приморский край	650	120	250	200	450	180	15	13,0
Республика Саха-Якутия	750	150	280	220	350	130	10	10,8
Государства – участники СНГ								
Республика Беларусь	630	130	180	100	880	150	20	13,5
Республика Казахстан	500	120	220	120	500	200	20	16,2
Республика Армения	550	130	200	80	450	180	15	14,0
Азербайджанская Республика	560	120	210	90	470	190	20	14,5
Кыргызская Республика	400	80	200	120	915	100	30	14,5
Республика Молдова	580	110	200	90	450	170	15	13,6
Республика Таджикистан*	500	150	185	115	455	340	20–25	20–30
Государства Балтии (для расширения сравнительной базы)								
Латвийская Республика	550	110	200	150	450	180	15	13,4
Литовская Республика	560	115	210	140	460	185	15	13,7
Эстонская Республика	540	110	200	130	450	180	15	13,3

Продолжение таблицы 2

Регион/Страна	Хлеб	Крупы	Мясо	Рыба	Овощи	Фрукты	Сухо-фрукты	Пищевые волокна, г
Среднее значение	614,6	121,3	221,5	133,1	494,2	182,7	15,4	14,1
Физиологическая норма (для условий ЧС)	700–800	120–150	250–300	150–200	600–800	300–400	50–70	30
Структурный дефицит, %	12,2–23,2	–	11,4–26,2	11–33,5	17–38	39–54,3	69,2–78	53,0

Примечания.

Содержание пищевых волокон рассчитано на основе среднего содержания в продуктах с учетом региональных особенностей.

* Нормы питания спасателей и личного состава Комитета по чрезвычайным ситуациям и гражданской обороне Республики Таджикистан базируются на физиологических нормах, утвержденных Постановлением Правительства Республики Таджикистан «Об утверждении рекомендуемых физиологических норм потребления основных продуктов питания на душу населения Республики Таджикистан» от 31.18.2018 № 451, и специальных ведомственных пайках для силовых структур. Конкретные нормы пайков для силовых структур и спасательных служб устанавливаются с учетом коэффициентов для лиц, выполняющих тяжелую физическую работу или находящихся в зоне чрезвычайных ситуаций.

Анализ таблицы 2 показал, что базовые нормы питания во всех регионах и странах практически одинаковы. Основные отличия касаются количества потребляемой рыбы (больше в приморских регионах), овощей и фруктов (больше на юге), а также сухофруктов (наиболее высокое содержание в Кыргызстане – 30 г/сутки). При этом среднее потребление пищевых волокон составляет всего 13,4 г/сутки, что почти в два раза ниже нормы (30 г/сутки), необходимой для защиты организма в условиях ЧС. Потребление сухофруктов также не достигает рекомендуемых значений (50–70 г/сутки).

Анализ выявленного структурного дефицита с позиций защиты в ЧС. В основу анализа положены методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21⁵, разработанные коллективом авторов под руководством академика Российской академии наук В.А. Тутельяна в федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи» (ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»). Данный документ устанавливает физиологические потребности в энергии и пищевых веществах для лиц, занятых тяжелым физическим трудом и работающих в экстремальных условиях [20].

Согласно МР 2.3.1.0253-21, профессиональная деятельность сотрудников пожарно-спасательных формирований относится к IV группе физической активности (работники, занятые тяжелым физическим трудом, с коэффициентом физической активности 2,2–2,5), что определяет повышенные нормы потребления энергии и основных пищевых веществ. При этом подчеркивается, что физиологические потребности зависят также от климатических условий: для лиц, проживающих и работающих в районах Крайнего Севера и приравненных к ним местностях, нормы потребления энергии и пищевых веществ должны быть увеличены на 10–15 %.

Оценка фактического содержания нутриентов в рассмотренных рационах питания выполнена расчетным (аналитическим) методом на основе данных о химическом составе пищевых продуктов, представленных в фундаментальных справочных изданиях под редакцией академика В.А. Тутельяна и профессора И.М. Скурихина. Данные издания, разработанные коллективом ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», содержат систематизированные таблицы нутриентов, а также энергетической ценности для всех основных групп пищевых продуктов, включая хлебобулочные, крупяные, мясные, рыбные, овощные и фруктовые изделия [18–21].

Выбор расчетного метода обусловлен невозможностью проведения прямого химического анализа суточных рационов для 24 территорий в рамках данного исследования. Применяемый подход (расчет нутриентного состава на основе нормативных данных) является общепринятым в гигиене питания и нутрициологии при проведении сравнительных исследований пищевых рационов различных групп населения. Расчет содержания пищевых веществ в суточном рационе проводился по формуле:

⁵ Методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации»: (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 22 июля 2021 г.) // Информационно-правовой портал ГАРАНТ.РУ. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402716140/> (дата обращения: 04.02.2026).

$$C_{\text{рац}} = \sum_{i=1}^n (M_i C_{100i}) / 100, \quad (1)$$

где $C_{\text{рац}}$ – содержание нутриента в суточном рационе, г;
 M_i – масса i -го продукта в суточном наборе, г;
 C_{100i} – содержание нутриента в 100 г i -го продукта по справочным данным [18–21];
 n – количество продуктов в суточном наборе.

Для каждого анализируемого рациона было рассчитано содержание пищевых волокон (с учетом хлебобулочных, крупяных, овощных, фруктовых продуктов); витаминов С, Е, А, группы В; минеральных веществ (К, Mg, Р, Na); ПНЖК (по составу рыбной продукции и растительных масел).

Нормы физиологических потребностей для условий ЧС приняты с учетом отнесения профессиональной деятельности пожарно-спасательных формирований к IV группе физической активности (коэффициент 2,2–2,5); климатических корректировок для северных и арктических регионов (увеличение норм на 10–15 %), а также повышенных потребностей при работе в условиях воздействия опасных факторов ЧС (интоксикация, оксидативный стресс, потери электролитов) [21; 22].

Структурный дефицит нутриента Δ (%) рассчитывался по формуле:

$$\Delta = \frac{H_{\min} - \Phi_{\text{ср}}}{H_{\min}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где $H_{\min}$ – нижняя граница физиологической нормы для условий ЧС, г (мг);
 $\Phi_{\text{ср}}$ – среднее фактическое содержание нутриента в анализируемых рационах, г (мг).

Для нутриентов, где фактическое содержание превышает норму (хлеб, крупы, мясо в отдельных регионах), дефицит не рассчитывался либо указывался диапазон вариативности.

На основе анализа рассмотренных рационов питания и сопоставления с нормами, установленными МР 2.3.1.0253-21, а также с учетом рекомендаций ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», выявлен структурный дефицит эссенциальных пищевых веществ, критичных для защиты в ЧС:

1. Пищевые волокна – дефицит 53,0 %. Согласно МР 2.3.1.0253-21, физиологическая потребность в пищевых волокнах для взрослого человека составляет 20–30 г/сутки. В условиях интенсивных физических нагрузок и воздействия опасных факторов ЧС потребность возрастает до 30 г/сутки в связи с необходимостью усиления детоксикационной функции кишечника и связывания ксенобиотиков. По данным справочника И.М. Скурихина и В.А. Тутельяна, основными источниками пищевых волокон в анализируемых рационах являются хлебобулочные изделия (содержание 5–8 г/100 г), крупы (3–10 г/100 г), овощи (2–5 г/100 г) и фрукты (1–3 г/100 г). Во всех анализируемых рационах суммарное содержание пищевых волокон составляет 10,8–16,8 г/сутки, что значительно ниже физиологической нормы. Наиболее низкое содержание отмечено в северных регионах (Красноярский край – 11,2 г, Республика Саха-Якутия – 10,8 г), наиболее высокое – в южных регионах (Краснодарский край – 16,8 г, Казахстан – 16,2 г) [22–24].

Согласно МР 2.3.1.0253-21 (раздел 4.2.1.3), пищевые волокна выполняют функцию энтеросорбентов, связывая и выводя из организма тяжелые металлы, радионуклиды и другие ксенобиотики. В условиях ЧС, когда организм спасателя подвергается интоксикации продуктами горения, дефицит пищевых волокон снижает эффективность естественной детоксикации и увеличивает токсическую нагрузку на печень.

2. Сухофрукты – дефицит 69,2–78 %. Норма сухофруктов варьируется от 10 г (Москва, Санкт-Петербург, Северные регионы) до 30 г (Кыргызстан). Согласно рекомендациям ФИЦ питания и биотехнологии, сухофрукты являются важным источником калия, железа, магния и пищевых волокон. По данным справочника [18–20], содержание калия в кураге составляет 1717 мг/100 г, в черносливе – 864 мг/100 г, в изюме – 830 мг/100 г. При рекомендуемой норме потребления сухофруктов 50–70 г/сутки (как источника калия и пищевых волокон) во всех рационах отмечается критический их дефицит. В условиях интенсивного тушения пожаров (потери до 350 мл пота за 30 мин работы) дефицит калия создает риск нарушений сердечного ритма.

3. Антиоксиданты – дефицит 57–67 %. Расчетное содержание витамина С составляет 50–80 мг/сутки, витамина Е – 8–12 мг/сутки. По справочным данным [18–20], основными источниками витамина С в рационах являются овощи и фрукты (содержание 20–200 мг/100 г

в зависимости от вида), витамина Е – растительные масла (15–60 мг/100 г) и зерновые продукты (1–3 мг/100 г). Физиологическая потребность для взрослого трудоспособного населения составляет: витамина С – 100–120 мг/сутки (при повышенных физических нагрузках – до 150 мг/сутки), витамина Е – 15 мг/сутки (при работе в условиях загрязнения окружающей среды – до 30 мг/сутки).

Согласно МР 2.3.1.0253-21 (раздел 5.3), витамины С и Е являются ключевыми компонентами антиоксидантной системы организма, защищающими клеточные мембраны от повреждения свободными радикалами. При работе в задымленной зоне, когда организм спасателя подвергается оксидативному стрессу, потребность в антиоксидантах возрастает в 1,5–2 раза. Дефицит этих витаминов делает клетки организма уязвимыми для окислительного повреждения.

4. Омега-3 ПНЖК – дефицит 72 %. Потребление рыбы варьируется от 80–90 г/сутки (Армения, Азербайджан) до 220 г/сутки (Республика Саха-Якутия). В среднем по выборке – 126 г/сутки. Содержание омега-3 ПНЖК в рыбе составляет 0,5–2,0 г/100 г в зависимости от вида (максимальное в жирных сортах: скумбрия, сельдь, лососевые). Физиологическая потребность в омега-3 ПНЖК составляет 0,8–1,6 г/сутки для здорового взрослого человека. Однако для лиц, подвергающихся воздействию высоких физических нагрузок и факторов профессионального стресса, потребность возрастает до 2,5–3,0 г/сутки в связи с противовоспалительным и мембраностабилизирующим действием этих жирных кислот.

5. Калий и магний – дефицит 33 %. Потребление овощей и фруктов как основных источников калия и магния, варьируется от 350–400 г (северные регионы) до 600–850 г (южные регионы). В среднем 452 г овощей и 181 г фруктов. По справочным данным, содержание калия в овощах составляет 150–400 мг/100 г, во фруктах – 150–350 мг/100 г; а содержание магния – 10–50 мг/100 г.

Согласно таблице 5.1 МР 2.3.1.0253-21, физиологическая потребность в калии составляет 3500–4500 мг/сутки, в магнии – 400–450 мг/сутки. При работе в теплоотражающих костюмах и условиях высоких температур потери калия и магния с потом могут достигать 30–40 % от суточной потребности, что создает риск нарушений сердечного ритма и мышечных судорог.

Для наглядного сопоставления выявленных отклонений с физиологическими нормами и рекомендациями ФИЦ питания и биотехнологии проведено сравнение средних фактических значений содержания критически значимых нутриентов для условий интенсивных физических нагрузок и воздействия опасных факторов ЧС. Результаты сравнительного анализа представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Сравнение фактического содержания нутриентов с физиологическими нормами

Нутриенты	Фактическое содержание (среднее)	Норма для условий ЧС	Структурный дефицит, %	Влияние на защиту в ЧС
Пищевые волокна, г	13,4	30	53,0	Снижение детоксикации
Сухофрукты, г	14,6	50–70	69,2–78	Дефицит калия, пищевых волокон
Витамин С, мг	65	150	56,7	Ослабление антиоксидантной защиты
Витамин Е, мг	10	30	66,7	Повышение уязвимости мембран
Омега-3 ПНЖК, г	0,7	2,5	72,0	Риск воспалительных реакций
Калий, мг	3000	4500	33,3	Риск аритмий при нагрузке
Магний, мг	300	450	33,3	Риск судорог и слабости

Сравнение фактического потребления с нормами показало, что во всех анализируемых рационах наблюдается устойчивый дефицит ключевых нутриентов. Наиболее критическая ситуация сложилась с омега-3 жирными кислотами (дефицит 72 %), сухофруктами (69,2–78 %), витаминами Е (67 %) и С (57 %), пищевыми волокнами (53,0 %). Такой дефицит снижает способность организма спасателя противостоять интоксикации и оксидативному стрессу, что требует разработки специализированного продукта для коррекции питания в условиях ЧС.

Характеристика нутрициологической разработки как элемента защиты в ЧС. Авторами предложена следующая рецептура пищевого продукта (на 100 кг готовой смеси): мука цельнозерновая – 40,0 кг; клетчатка тыквенная – 13,5 кг; клетчатка морковная – 15,6 кг; курага измельченная – 3,9 кг; розмарин сушеный – 2,2 кг; соль поваренная – 0,9 кг; масло оливковое – 9,5 кг; вода питьевая – 14,6 кг.

Определена пищевая ценность (на 100 г): белки – 7,2 г; жиры – 15,6 г; углеводы – 36,8 г; пищевые волокна – 8,5 г (34 % от суточной нормы). Энергетическая ценность – 321 ккал.

Установлен минеральный и витаминный составы: магний – 131 мг (33 % нормы), фосфор – 266 мг (33 %), калий – 346 мг (14 %), цинк – 1,5 мг (13 %), натрий – 315 мг (24 %), витамин А – 279,8 мкг (31 % нормы), витамин Е – 1,75 мг (12 %), витамин РР – 2,6 мг (14 %), витамин В1 – 0,17 мг (11 %).

Разработанный продукт соответствует единым требованиям безопасности к пищевой продукции [25; 26] обладает рядом свойств, определяющих его инновационность и практическую ценность как элемента системы защиты в ЧС. Систематизированная характеристика представлена на рисунке 1.

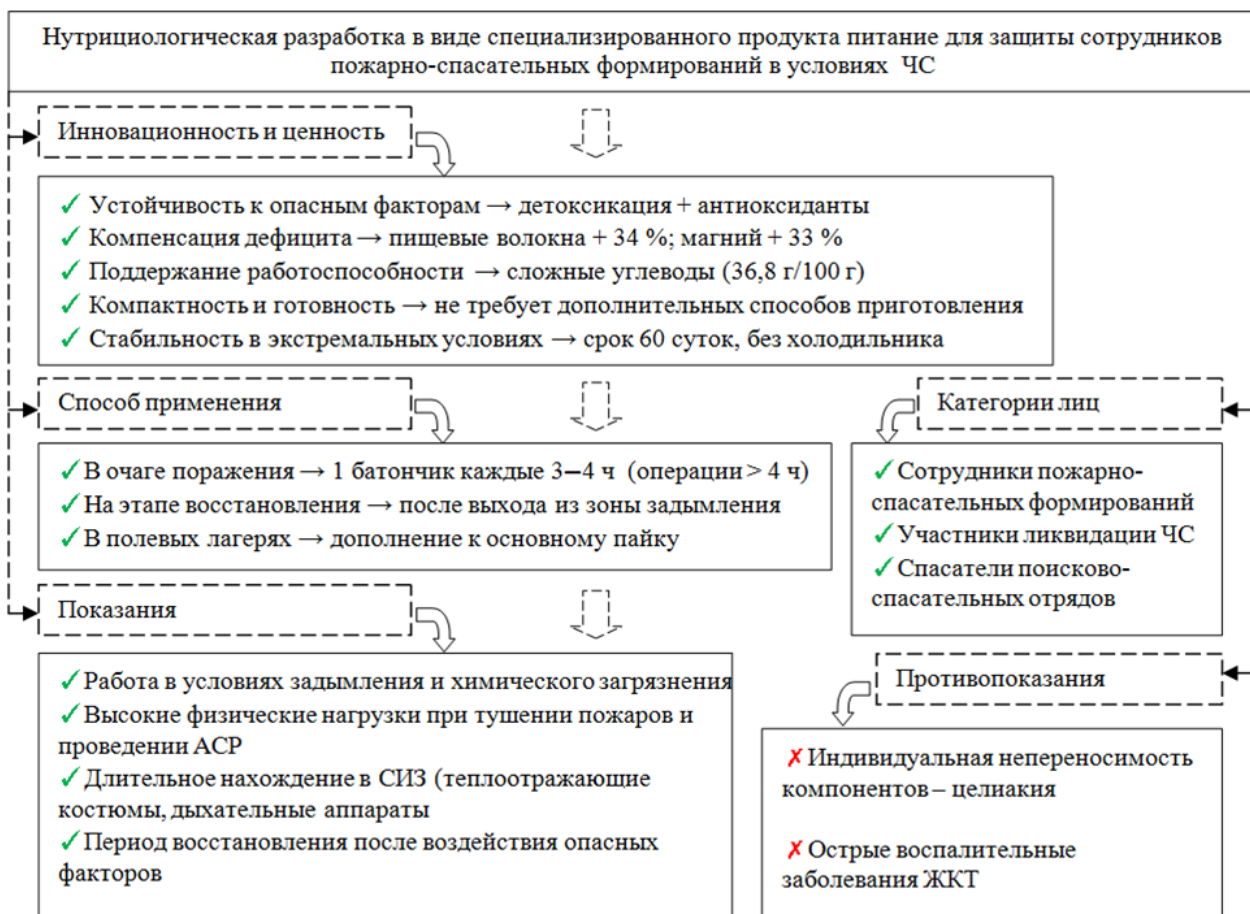


Рисунок 1. – Схема комплексной защиты личного состава в ЧС

Представленный в данной статье пищевой продукт в виде нутрициологической разработки можно рассматривать как элемент защиты при ЧС.

Таким образом, представленная нутрициологическая поддержка личного состава в условиях ЧС сочетает как функциональную эффективность, так и практическую значимость в особо опасных и экстремальных условиях [27; 28].

В экспериментальной части работы проведен ряд исследований по определению показателей качества и безопасности пищевого продукта. Безопасность подтверждена внесением живой культуры *Paramecium caudatum* в экстракт пищевого продукта и отсутствием острой летальной токсичности. Выживаемость тест-объекта составила $97,2 \pm 1,3$ % (контроль $98,5 \pm 1,1$ %, $p > 0,05$). Установлено, что пищевой продукт относится к первому классу безопасности, является нетоксичным и может применяться в рационах питания спасателей при любых условиях работ и воздействиях ЧС.

Антиоксидантная активность экстракта образца составила $74,5 \pm 0,3$ %, что обусловлено синергетическим действием флавоноидов розмарина, токоферолов оливкового масла, каротиноидов кураги и авенантрамидов цельнозерновой муки. Высокое значение антиоксидантной активности означает, что продукт способен нейтрализовать свободные радикалы, образующиеся в больших количествах при вдыхании продуктов горения.

Стабильность при хранении. Эксперимент подтвердил, что через 30 суток хранения антиоксидантная активность составила $73,8 \pm 1,5$ % (снижение 0,9 %, $p > 0,05$), а через 60 суток – $73,0 \pm 1,4$ % (снижение 1,5 %, $p > 0,05$). Рекомендованный срок годности – 60 суток.

Разработанное нутрициологическое решение в виде пищевого продукта следует рассматривать не только как элемент продовольственного обеспечения, но и как фактор повышения техносферной безопасности. В условиях ЧС, когда организм спасателя работает на пределе компенсаторных возможностей, оперативное восполнение дефицита ключевых нутриентов является такой же мерой защиты, как и применение изолирующих дыхательных аппаратов. Повышая антитоксическую и антиоксидантную резистентность, продукт увеличивает «запас прочности» организма спасателя, позволяя ему дольше сохранять оперативность в особых условиях, например при задымлении и высоких температурах. Это прямое влияние на эффективность и безопасность проведения аварийно-спасательных работ [29; 30].

Установленный структурный дефицит эссенциальных пищевых веществ (табл. 2 и 3) создает предпосылки для разработки специализированного продукта нутрициологической направленности, компоненты которого должны целенаправленно воздействовать на ключевые звенья патогенеза профессионально обусловленных заболеваний [31]. Взаимосвязь между выявленными дефицитами, функциональными свойствами разработанного продукта и задачами защиты в ЧС систематизирована в таблице 4.

Таблица 4. – Взаимосвязь ценности нутрициологической разработки с профессиональными угрозами и задачами защиты в ЧС

Профессиональная угроза / фактор ЧС	Выявленный структурный дефицит	Компоненты продукта	Механизм защитного действия	Влияние на безопасность АСР
Инттоксикация продуктами горения	Пищевые волокна (дефицит 53,0 %)	Тыквенная и морковная клетчатка (8,5 г/100 г)	Адсорбция токсинов в кишечнике, снижение энтерогепатической циркуляции	Снижение токсической нагрузки на печень, профилактика отравлений
Оксидативный стресс	Витамины С, Е, А (дефицит 57–67 %)	Флавоноиды розмарина, токоферолы оливкового масла, каротиноиды кураги	Нейтрализация свободных радикалов, защита клеточных мембран	Сохранение работоспособности, профилактика «дымовой интоксикации»
Потери электролитов	Калий, магний (дефицит 33 %)	Курага (калий), цельнозерновая мука (магний)	Поддержание электролитного баланса, профилактика аритмий и судорог	Сохранение физической выносливости
Энергодефицит	Сложные углеводы	Цельнозерновая мука (36,8 г/100 г)	Длительное поступление глюкозы, поддержание стабильного уровня сахара	Предотвращение гипогликемии и упадка сил
Нарушение терморегуляции	Натрий (потери с потом)	Соль (315 мг/100 г)	Поддержание осмотического давления, профилактика теплового шока	Снижение риска тепловых поражений

Заключение

Проведенное исследование, выполненное на стыке техносферной безопасности и нутрициологии, позволило получить следующие результаты, имеющие значение для системы защиты в ЧС:

1. Проведен детальный сравнительный анализ рассмотренных рационов питания пожарных и спасателей в 14 регионах Российской Федерации, 7 государствах – участниках СНГ, а также, для расширения сравнительной базы, в государствах Балтии. В работе определено, что существующие рационы питания характеризуются дефицитом эссенциальных пищевых веществ и в условиях ЧС это способно привести к снижению сопротивляемости организма спасателей к интоксикации и оксидативному стрессу в очагах поражения.

2. На основе представленной нутрициологической разработки дано обоснование выбора ингредиентов функциональной значимости, а именно определена их сорбционная способность, антиоксидантная активность и содержание эссенциальных минеральных веществ. Доказано, что при регулярном употреблении пищевого продукта возможно повышение защитного потенциала организма. Компенсация суточного дефицита по пищевым волокнам,

магний и витамину А достигает в среднем 28–31 %, что подтверждает эффективность нутрициологической поддержки в условиях ЧС.

3. Методами биотестирования подтверждена безопасность готового изделия, его высокая антиоксидантная активность и сохраняемость в течение 60 суток.

4. Даны рекомендации по включению нутрициологической разработки в рационы питания сотрудников пожарно-спасательных формирований для реализации следующих мер защиты:

– повышение устойчивости организма к интоксикации продуктами горения и эффективной работоспособности в очаге поражения;

– ускорение периода восстановления после воздействия опасных факторов, а также снижение последствий профессиональных рисков.

5. Техническое решение защищено патентами РФ №№ 2824197, 2859982 и может быть адаптировано в национальных интересах стран – участниц Союзного государства.

ЛИТЕРАТУРА

1. О безопасности: Федеральный закон от 28.12.2010 № 390-ФЗ // КонсультантПлюс. Россия: справ. правовая система (дата обращения: 04.02.2026).
2. Евдокимов, В.И. Показатели рисков гибели при исполнении профессиональных обязанностей личным составом оперативных подразделений МЧС России / В.И. Евдокимов, Е.В. Бобринев, А.А. Кондашов // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2022. – № 3. – С. 37–57. – DOI: 10.25016/2541-7487-2022-0-3-37-57. – EDN: GJBLOF.
3. Кондашов, А.А. Специфика производственного травматизма личного состава Федеральной противопожарной службы МЧС России по причине «личная неосторожность» / А.А. Кондашов, Е.В. Бобринев, Е.Ю. Удавцова // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2023. – № 2. – С. 89–98. – DOI: 10.25016/2541-7487-2023-0-2-89-98. – EDN: SVFLJX.
4. Лебедева, Е.С. Рационы питания для личного состава, участвующего в ликвидации чрезвычайных ситуаций / Е.С. Лебедева, В.В. Игнатьев, В.И. Дорошевич // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 24–25 мая 2012 г. – Гомель, 2012. – Ч. 1. – С. 186–188.
5. Игнатьев, В.В. Профилактика пищевых отравлений при чрезвычайных ситуациях / В.В. Игнатьев, Е.С. Лебедева, Д.И. Широко // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 24–25 мая 2012 г. – Гомель, 2012. – Ч. 1. – С. 169–171.
6. Аубакиров, С.Г. Совершенствование организационной структуры системы управления подразделениями комитета противопожарной службы МЧС Республики Казахстан: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.10 / Аубакиров Серик Габдуллович; Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России. – Санкт-Петербург, 2007. – 160 л.
7. Об утверждении категорий военнослужащих, проходящих военную службу по контракту в МЧС России, сотрудников федеральной противопожарной службы Государственной противопожарной службы, федеральных государственных гражданских служащих и работников МЧС России, имеющих право на продовольственное обеспечение в период несения дежурства, участия в полевых учениях, проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ, нахождения в служебных командировках на территориях иностранных государств для ликвидации последствий стихийных бедствий и чрезвычайных ситуаций, норм и порядка их продовольственного обеспечения: приказ МЧС России от 29 апр. 2013 г. № 290 // ППТ.РУ: Нормативно-правовые акты. – URL: <https://pravo.ppt.ru/prikaz/mchs/n-290-14328> (дата обращения: 04.02.2026).
8. О продовольственном обеспечении: приказ МЧС Республики Беларусь от 31 дек. 2021 № 356. – Мн.: МЧС Республики Беларусь, 2021. – 47 с.
9. Об утверждении норм обеспечения спасателей продуктами питания при несении дежурства, а также в период проведения аварийно-спасательных и неотложных работ с оплатой расходов за счет средств, выделяемых на содержание профессиональных аварийно-спасательных служб и формирований: приказ Министра по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан от 1 авг. 2025 г. № 304 // Информационно-правовая система «Әділет». – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/G25O0000304/info> (дата обращения: 04.02.2026).
10. Об утверждении норм продовольственного обеспечения в Спасательной службе Армении: постановление Правительства Республики Армения от 27 марта 2003 г. № 405-Н (в ред. 2025 г.) // Информационная система ARLIS: [сайт] (дата обращения: 04.02.2026).

11. О нормах продовольственного пайка военнослужащих Вооруженных Сил Кыргызской Республики, других воинских формирований и государственных органов Кыргызской Республики, в которых законом предусмотрена военная служба, а также воспитанников Кыргызского национального военного лицея имени Героя Советского Союза Асанова Даира Асановича: постановление Правительства Кыргызской Республики от 16 февр. 2021 г. № 44 // Информационная система «Параграф»: prg.kz. – URL: https://prg.kz/document/?doc_id=39978648 (дата обращения: 04.02.2026).
12. Регламент Европейского Парламента и Совета Европейского Союза 1169/2011 от 25 окт. 2011 г. о предоставлении потребителям информации о продуктах питания // Информационно-правовой портал ГАРАНТ.РУ. – URL: <https://base.garant.ru/70256896/> (дата обращения: 04.02.2026).
13. Об утверждении категорий военнослужащих, проходящих военную службу по контракту в МЧС России, сотрудников федеральной противопожарной службы Государственной противопожарной службы, федеральных государственных гражданских служащих МЧС России, работников МЧС России, имеющих право на продовольственное обеспечение, рационов питания, аварийного рациона, бортовых пайков, порядка их продовольственного обеспечения, организации питания в стационарных условиях, в том числе с привлечением предприятий общественного питания, и в полевых условиях, норм замены одних продуктов другими при организации их продовольственного обеспечения: приказ МЧС России от 03 марта 2026 г. № 143. – URL: <https://minjust.consultant.ru/files/58458> (дата обращения: 04.02.2026).
14. Патент RU 2824197 C1, МПК A23L 7/10. Состав зернового продукта для питания сотрудников пожарной охраны: № 2023135071: заявл. 26.12.2023: опубл. 06.08.2024 / Гумеров Т.Ю., Ямашев Т.А., Мингалеева З.Ш.; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ».
15. Патент RU 2859982 C1 Российская Федерация, МПК A23L7/126, A23L33/10. Злаковый батончик для питания сотрудников пожарно-спасательной службы: № 2024129608: заявл. 03.10.2024: опубл. 14.04.2026 / Гумеров Т.Ю., Муравьева Е.В., Клинцева А.К.; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ».
16. Вода. Определение токсичности по выживаемости пресноводных инфузорий *Paramecium caudatum* Ehrenberg: ГОСТ Р 57166-2016. – Введ. 17.10.2016. – М.: Стандартинформ, 2016. – III, 24 с.
17. Яшин, А. Я. Методология определения антиоксидантной активности пищевых продуктов и биологических жидкостей / А. Я. Яшин // Аналитика. – 2021. – Т. 11, № 5. – С. 370-385. – DOI: 10.22184/2227-572X.2021.11.5.370.384. – EDN: HXTAIN.
18. Химический состав российских пищевых продуктов: справочник / под ред. И.М. Скурихина, В.А. Тутельяна. – М.: ДеЛи принт, 2002. – 236 с. – ISBN 5-94343-028-8.
19. Скурихин, И.М. Таблицы химического состава и калорийности российских продуктов питания: справочник / И.М. Скурихин, В.А. Тутельян. – М.: ДеЛи принт, 2007. – 275 с. – ISBN 978-5-94343-122-7.
20. Тутельян, В.А. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации: методические рекомендации / В.А. Тутельян [и др.]. – М.: ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», 2021. – 48 с.
21. МР 2.3.1.0253-21. 2.3.1. Гигиена питания. Рациональное питание. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации : методические рекомендации / утв. Главным государственным санитарным РФ 22.07.2021. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2021. – 72 с.
22. Кучинский, В.Н. Исторический анализ, современность и перспективы обеспечения полноценным питанием сотрудников МЧС России, выполняющих задачи в Арктической зоне Российской Федерации / В.Н. Кучинский, Е.Н. Бардулин, Р.А. Горелик // Русский лед – 2024: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Вытегра, 6–8 февраля 2024 г. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2024. – С. 35–43. – EDN: HACJQU.
23. Яковлева, М.В. Особенности биоэлементного статуса у сотрудников МЧС России, работающих в условиях Арктической зоны / М.В. Яковлева, М.В. Санников, С.С. Алексанин, Н.В. Нестеренко // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2021. – № 4. – С. 94–102. – DOI: 10.25016/2541-7487-2021-0-4-94-102. – EDN: XWJUUK.
24. Васильченко, Е.И. Функциональное питание для спасателей и пожарных / Е.И. Васильченко, Н.В. Васильченко // Пищевая индустрия: инновационные процессы, продукты и технологии: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 20-летию Технологического института, Москва, 16 мая 2024 г. – Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2024. – С. 837–843. – EDN: RJDHSI.
25. ТР ТС 022/2011. Пищевая продукция в части ее маркировки: Технический регламент Таможенного союза: утвержден Решением Комиссии Таможенного союза от 09.12.2011 № 881. – М.: Изд-во стандартов, 2012. – 28 с.

26. ТР ТС 021/2011. О безопасности пищевой продукции: Технический регламент Таможенного союза: утвержден Решением Комиссии Таможенного союза от 09.12.2011 № 880. – М.: Изд-во стандартов, 2012. – 242 с.
27. Шантырь, И.И. Обеспеченность жирорастворимыми витаминами и полиненасыщенными жирными кислотами организма военнослужащих по призыву по завершении периода начальной военной подготовки / И.И. Шантырь, Г.Г. Родионов, А.Л. Сметанин [и др.] // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2023. – № 3. – С. 90–97. – DOI: 10.25016/2541-7487-2023-0-3-90-97. – EDN: CBJQAV.
28. Гумеров, Т.Ю. О питании сотрудников спасательной службы / Т.Ю. Гумеров, А.К. Клинцева, Е.А. Насырова // Безопасность жизнедеятельности. – 2025. – № 5 (293). – С. 6–11. – EDN: XFTFBG.
29. Шагиахметова, А.Р. О некоторых особенностях питания сотрудников спасательной службы / А.Р. Шагиахметова, Т.Ю. Гумеров, З.Ш. Мингалева // Биология в сельском хозяйстве. – 2025. – № 4 (49). – С. 52–56. – EDN: ADMFXH.
30. Патент RU 2823337 C1, МПК A23L 7/10, A23L 33/10, A23L 33/21. Зерновой продукт для питания сотрудников спасательной службы: № 2024101518: заявл. 23.01.2024; опубл. 22.07.2024 / Гумеров Т.Ю., Мингалева З.Ш., Швинк К.Ю., Гомзина Е.Г.; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ».
31. Ефимова, Е.А. Зерновые батончики для питания сотрудников спасательной службы / Е.А. Ефимова, Т.Ю. Гумеров, А.К. Клинцева, З.Ш. Мингалева // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. – 2024. – № 6 (89). – С. 35–41. – DOI: 10.33979/2219-8466-2024-89-6-35-41. – EDN: GAFROB.

**Научное обоснование нутрициологической разработки
как элемента системы защиты в чрезвычайных ситуациях**
**Scientific justification of nutritional development
as an element of the protection system in emergency situations**

Шакирова Алсу Ильнуровна

кандидат технических наук, доцент

Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева –
КАИ, кафедра промышленной и экологической
безопасности, доцент

Адрес: ул. К. Маркса, 10,
420111, г. Казань,
Республика Татарстан, Россия
Email: alsugal93@mail.ru
SPIN-код: 6266-2163

Alsu I. Shakirova

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev – KAI,
Chair of Industrial and Environmental Safety,
Associate Professor

Address: K. Marks str., 10,
420111, Kazan,
Republic of Tatarstan, Russia
Email: alsugal93@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5977-8883

Антонова Эльвира Ильгизовна

Казанский государственный
архитектурно-строительный университет,
кафедра химии и инженерной экологии
в строительстве, старший преподаватель

Адрес: ул. Зеленая, 1,
420043, г. Казань,
Республика Татарстан, Россия
Email: antonova.elvira@yandex.ru
SPIN-код: 4496-7593

Ilvira I. Antonova

Kazan State University of Architecture
and Engineering, Chair of Chemistry
and Engineering Ecology in Construction,
Senior Lecturer

Address: Zelenaya str., 1,
420043, Kazan,
Republic of Tatarstan, Russia
Email: antonova.elvira@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-4079-8574

Шагиахметова Айгуль Раифовна

Казанский национальный исследовательский
технологический университет, кафедра
технологий пищевых производств, аспирант

Адрес: ул. К. Маркса, 68,
420015, г. Казань,
Республика Татарстан, Россия
Email: aliya.shagiakhmetova@knrtu.ru

Aigul R. Shagiakhmetova

Kazan National Research Technological University,
Chair of Food Production Technology,
postgraduate student

Address: K. Marks str., 68,
420015, Kazan,
Republic of Tatarstan, Russia
Email: aliya.shagiakhmetova@knrtu.ru

Гумеров Тимофей Юрьевич

доктор технических наук, доцент

Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева –
КАИ, кафедра промышленной и экологической
безопасности, профессор

Адрес: ул. К. Маркса, 10,
420111, г. Казань,
Республика Татарстан, Россия
Email: tt-timofei@mail.ru
SPIN-код: 3243-8668

Timofey Yu. Gumerov

Grand PhD in Technical Sciences,
Associate Professor

Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev – KAI,
Chair of Industrial and Environmental Safety,
Professor

Address: K. Marks str., 10,
420111, Kazan,
Republic of Tatarstan, Russia
Email: tt-timofei@mail.ru

SCIENTIFIC JUSTIFICATION OF NUTRITIONAL DEVELOPMENT AS AN ELEMENT OF THE PROTECTION SYSTEM IN EMERGENCY SITUATIONS

Shakirova A.I., Antonova I.I., Shagiakhmetova A.R., Gumerov T.Yu.

Purpose. To develop a scientifically based, specialized food product with a nutritional focus and experimentally confirm its effectiveness as an element of a protection system in emergency situations.

Methods. Analytical – comparative analysis of diets approved by regulatory legal acts in several regions of the Russian Federation, the CIS member states, and the Baltic states. Technological – development of a nutritional support composition with increased nutritional value, adhering to ingredient functionality criteria, including sorption capacity, antioxidant activity, and essential mineral content. Experimental – product safety assessment using biotesting and determination of antioxidant activity using the ferricyanide method, with data processing using statistical analysis methods and the *Statistica 10.0* software package.

Findings. The article presents the results of a comparative analysis of 35 approved diets, which revealed a deficiency of essential nutrients critical for protection in emergency situations: dietary fiber (53.0 % deficiency), dried fruits (69.2–78 %), vitamin C (57 %), vitamin E (67 %), omega-3 polyunsaturated fatty acids (72 %), potassium and magnesium (33 % each). A nutritional support product has been developed that compensates for the identified deficiency of dietary fiber (8.5 g/100 g, 34 % of the daily value), magnesium (131 mg/100 g, 33%), vitamin A (279.8 µg/100 g, 31 %), and potassium (346 mg/100 g, 14 %). Biotesting confirmed the product's safety (*Paramecium caudatum* survival rate was 97.2 ± 1.3 % versus 98.5 ± 1.1 % in the control, $p > 0.05$). The extract's antioxidant activity was 74.5 ± 0.3 % and was maintained for 60 days of storage (a decrease of no more than 1.5 %, $p > 0.05$).

Application field of research. The study results can be recommended for inclusion in individual diets for fire and rescue personnel involved in emergency response, as an element of protection against intoxication, oxidative stress, and electrolyte imbalance.

Keywords: occupational risks; fire and rescue teams; emergency protection; nutritional development; preventive nutrition; safety and quality; antioxidant activity; biotesting.

(The date of submitting: March 9, 2026)

REFERENCES

1. *O bezopasnosti [On safety]: Federal Law, December 28, 2010, No. 390-FZ.* Konsul'tant Plyus, Russia: reference legal system (date accessed: February 4, 2026). (rus)
2. Evdokimov V.I., Bobrinev E.V., Kondashov A.A. Pokazateli riskov gibeli pri ispolnenii professional'nykh obyazannostey lichnym sostavom operativnykh podrazdeleniy MChS Rossii [Indicators of the risk of death when performing professional duties in personnel of the operational services of the EMERCOM of Russia]. *Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations*, 2022. No. 3. P. 37–57. (rus). DOI: 10.25016/2541-7487-2022-0-3-37-57. EDN: GJBLOF.
3. Kondashov A.A., Bobrinev E.V., Udavtsova E.Yu. Spetsifika proizvodstvennogo travmatizma lichnogo sostava Federal'noy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii po prichine «lichnaya neostorozhnost» [Specific injury scenarios due to 'victims' own negligence' among Federal Fire Service officers and workers of the EMERCOM of Russia]. *Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations*, 2023. No. 2. Pp. 89–98. (rus). DOI: 10.25016/2541-7487-2023-0-2-89-98. EDN: SVFLJX.
4. Lebedeva E.S., Ignat'ev V.V., Doroshevich V.I. Ratsiony pitaniya dlya lichnogo sostava, uchastvuyushchego v likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy [Food rations for personnel involved in emergency response]. *Proc. of Intern. scientific-practical conf. «Chrezvychaynye situatsii: teoriya, praktika, innovatsii»*, Gomel, May 24–25, 2012. In 2 parts. Gomel, 2012. Part 1. Pp. 186–188. (rus)
5. Ignat'ev V.V., Lebedeva E.S., Shirko D.I. Profilaktika pishchevykh otravleniy pri chrezvychaynykh situatsiyakh [Prevention of food poisoning in emergency situations]. *Proc. of Intern. scientific-practical conf. «Chrezvychaynye situatsii: teoriya, praktika, innovatsii»*, Gomel, May 24–25, 2012. In 2 parts. Gomel, 2012. Part 1. Pp. 169–171. (rus)
6. Aubakirov S.G. *Sovershenstvovanie organizatsionnoy struktury sistemy upravleniya podrazdeleniyami komiteta protivopozharnoy sluzhby MChS Respubliki Kazakhstan* [Improving the organizational structure of the management system of the divisions of the Fire Service Committee of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan]. PhD tech. sci. diss.: 05.13.10. Saint-Petersburg State Fire Service University of EMERCOM of Russia. St. Petersburg, 2007. 160 p. (rus)

7. *Ob utverzhdenii kategoriy voennosluzhashchikh, prokhodyashchikh voennuyu sluzhbu po kontraktu v MChS Rossii, sotrudnikov federal'noy protivopozharnoy sluzhby Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby, federal'nykh gosudarstvennykh grazhdanskikh sluzhashchikh i rabotnikov MChS Rossii, imeyushchikh pravo na prodovol'stvennoe obespechenie v period neseniya dezhurstva, uchastiya v polevykh ucheniyakh, provedeniya avariyno-spasatel'nykh i drugikh neotlozhnykh rabot, nakhozheniya v sluzhebnykh komandirovках na territoriyakh inostrannykh gosudarstv dlya likvidatsii posledstviy stikhiynykh bedstviy i chrezvychaynykh situatsiy, norm i poryadka ikh prodovol'stvennogo obespecheniya* [On approval of the categories of military personnel serving under contract in the EMERCOM of Russia, employees of the federal fire service of the State Fire Service, federal state civil servants and employees of the EMERCOM of Russia who have the right to food supplies during the period of duty, participation in field exercises, emergency rescue and other urgent work, being on business trips in the territories of foreign states to eliminate the consequences of natural disasters and emergency situations, the norms and procedures for their food supplies]: *order of the EMERCOM of Russia, April 29, 2013, No. 290.* (rus). PPT.RU: Regulatory and legal acts. URL: <https://pravo.ppt.ru/prikaz/mchs/n-290-14328> (date accessed: February 4, 2026).
8. *O prodovol'stvennom obespechenii* [On food supplies]: *order of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, December 31, 2021, No. 356.* Minsk. 2021. 47 p.
9. *Ob utverzhdenii norm obespecheniya spasateley produktami pitaniya pri nesenii dezhurstva, a takzhe v period provedeniya avariyno-spasatel'nykh i neotlozhnykh rabot s oplatoy raskhodov za schet sredstv, vydelyaemykh na sodержание professional'nykh avariyno-spasatel'nykh sluzhb i formirovaniy* [On approval of standards for providing rescuers with food while on duty, as well as during emergency rescue and urgent work, with payment of expenses from funds allocated for the maintenance of professional emergency rescue services and formations]: *order of the Minister of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan, August 1, 2025. No. 304.* (rus). Information and legal system «Adilet». URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/G25O0000304/info> (date accessed: February 4, 2026).
10. *Ob utverzhdenii norm prodovol'stvennogo obespecheniya v Spasatel'noy sluzhbe Armenii* [On approval of food supply standards in the Rescue Service of Armenia]: *Resolution of the Government of the Republic of Armenia dated March 27, 2003 No. 405-N (as amended in 2025).* (rus). ARLIS Information System: [website] (date accessed: February 4, 2026).
11. *O normakh prodovol'stvennogo payka voennosluzhashchikh Vooruzhennykh Sil Kyrgyzskoy Respubliki, drugikh voinskikh formirovaniy i gosudarstvennykh organov Kyrgyzskoy Respubliki, v kotorykh zakonom predusmotrena voennaya sluzhba, a takzhe vospitannikov Kyrgyzskogo natsional'nogo voennogo litseya imeni Geroya Sovetskogo Soyuza Asanova Daira Asanovicha* [On the food ration standards for military personnel of the Armed Forces of the Kyrgyz Republic, other military formations and state bodies of the Kyrgyz Republic, in which military service is provided for by law, as well as students of the Kyrgyz National Military Lyceum named after Hero of the Soviet Union Dair Asanovich Asanov]: *Resolution of the Government of the Kyrgyz Republic, February 16, 2021, No. 44.* (rus). Information system «Paragraph»: prg.kz. URL: https://prg.kz/document/?doc_id=39978648 (date accessed: February 4, 2026).
12. *Regulation (EU) No 1169/2011 of the European Parliament and of the Council of 25 October 2011 on the provision of food information to consumers.* (rus). Information and legal portal GARANT.RU. URL: <https://base.garant.ru/70256896/> (date accessed: February 4, 2026).
13. *Ob utverzhdenii kategoriy voennosluzhashchikh, prokhodyashchikh voennuyu sluzhbu po kontraktu v MChS Rossii, sotrudnikov federal'noy protivopozharnoy sluzhby Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby, federal'nykh gosudarstvennykh grazhdanskikh sluzhashchikh MChS Rossii, rabotnikov MChS Rossii, imeyushchikh pravo na prodovol'stvennoe obespechenie, ratsionov pitaniya, avariynogo ratsiona, bortovykh paykov, poryadka ikh prodovol'stvennogo obespecheniya, organizatsii pitaniya v statsionarnykh usloviyakh, v tom chisle s privilecheniem predpriyatiy obshchestvennogo pitaniya, i v polevykh usloviyakh, norm zameny odnykh produktov drugimi pri organizatsii ikh prodovol'stvennogo obespecheniya* [On approval of the categories of military personnel serving under contract in the EMERCOM of Russia, employees of the federal fire service of the State Fire Service, federal state civil servants of the EMERCOM of Russia, employees of the EMERCOM of Russia entitled to food supplies, food rations, emergency rations, on-board rations, the procedure for their food supply, the organization of meals in stationary conditions, including with the involvement of public catering establishments, and in field conditions, the standards for replacing some products with others when organizing their food supply]: *order of the EMERCOM of Russia dated March 3, 2026 No. 143.* (rus). URL: <https://minjust.consultant.ru/files/58458> (date accessed: February 4, 2026).
14. Gumerov T.Yu., Yamashev T.A., Mingaleeva Z.Sh. *Sostav zernovogo produkta dlya pitaniya sotrudnikov pozharnoy okhrany* [Composition of grain product for alimentation of fire service personnel]: *patent*

- RU 2824197 C1. Published August 6, 2024. Applicant: Kazan National Research Technological University. (rus)
15. Gumerov T.Yu., Murav'eva E.V., Klintsova A.K. *Zlakovyy batonchik dlya pitaniya sotrudnikov pozharно-spasatel'noy sluzhby* [Cereal bar for feeding employees of fire and rescue service]: *patent RU 2859982 C1*. Published April 14, 2026. Applicant: Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. (rus)
 16. Voda. *Opreделение toksichnosti po vyzhivaemosti presnovodnykh infuzoriy Paramecium caudatum Ehrenberg* [Determination of toxicity by survival rate of freshwater ciliates *Paramecium caudatum* Ehrenberg]: GOST R 57166-2016. Introduced October 17, 2016. Moscow: Standartinform, 2016. III, 24 p. (rus)
 17. Yashin A.Ya. *Metodologiya opredeleniya antioksidantnoy aktivnosti pishchevykh produktov i biologicheskikh zhidkostey* [Methodology for determining the antioxidant activity of foods and biological fluids]. *Analytics*, 2021. Vol. 11, No. 5. Pp. 370–385. (rus). DOI: 10.22184/2227-572X.2021.11.5.370.384. EDN: HXTAIN.
 18. *Khimicheskiy sostav rossiyskikh pishchevykh produktov* [Chemical composition of Russian food products]: handbook. Ed. by I.M. Skurikhin, V.A. Tutel'yan. Moscow: DeLi print, 2002. 236 p. (rus). ISBN 5-94343-028-8.
 19. Skurikhin I.M., Tutel'yan V.A. *Tablitsy khimicheskogo sostava i kaloriynosti rossiyskikh produktov pitaniya* [Tables of chemical composition and caloric content of Russian food products]: handbook. Moscow: DeLi print, 2007. 275 p. (rus). ISBN 978-5-94343-122-7.
 20. Tutel'yan V.A. et al. *Normy fiziologicheskikh potrebnostey v energii i pishchevykh veshchestvakh dlya razlichnykh grupp naseleniya Rossiyskoy Federatsii* [Norms of physiological needs of energy and nutrients for various population groups of the Russian Federation]: methodological recommendations. Moscow: Federal Research Center of Nutrition and Biotechnology, 2021. 48 p. (rus)
 21. *MR 2.3.1.0253-21. 2.3.1. Gigena pitaniya. Ratsional'noe pitanie. Normy fiziologicheskikh potrebnostey v energii i pishchevykh veshchestvakh dlya razlichnykh grupp naseleniya Rossiyskoy Federatsii* [MR 2.3.1.0253-21. 2.3.1. Food hygiene. Rational nutrition. Standards of physiological needs for energy and nutrients for different groups of the population of the Russian Federation]: *methodological recommendations*. Approved by the Chief State Sanitary Inspectorate of the Russian Federation on July 22, 2021. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2021. 72 p. (rus)
 22. Kuchinskiy V.N., Bardulin E.N., Gorelik R.A. *Istoricheskiy analiz, sovremennost' i perspektivy obespecheniya polnotsennym pitaniem sotrudnikov MChS Rossii, vpolnyayushchikh zadachi v Arkticheskoy zone Rossiyskoy Federatsii* [Historical analysis, modernity and prospects for providing adequate nutrition to employees of the Ministry of Emergency Situations of Russia performing tasks in the Arctic zone of the Russian Federation]. *Proc. of Intern. scientific-practical conf. «Russkiy led – 2024», Vytegra, February 6–8, 2024*. Saint-Petersburg State Fire Service University of EMERCOM of Russia. St. Petersburg, 2024. Pp. 35–43. (rus). EDN: HACJQU.
 23. Yakovleva M.V., Sannikov M.V., Aleksanin S.S., Nesterenko N.V. *Osobennosti bioelementnogo statusa u sotrudnikov MChS Rossii, rabotayushchikh v usloviyakh Arkticheskoy zony* [Features of the bioelement status of employees of the Ministry of Emergency Situations of Russia working under conditions of the Arctic zone]. *Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations*, 2021. No. 4. P. 94–102. (rus). DOI: 10.25016/2541-7487-2021-0-4-94-102. EDN: XWJUUK.
 24. Vasilchenko E.I., Vasilchenko N.V. *Funktsional'noe pitanie dlya spasateley i pozharnykh* [Functional food for rescue and firefighters]. *Proc. of Intern. scientific-practical conf. dedicated to the 20th anniversary of the Technological Institute «Pishchevaya industriya: innovatsionnye protsessy, produkty i tekhnologii»*, Moscow, May 16, 2024. Moscow: Sam Poligrafist, 2024. Pp. 837–843. EDN: RJDHSI.
 25. *TR TS 022/2011. Pishchevaya produktsiya v chasti ee markirovki* [TR TS 022/2011. Food products in terms of their labeling]: Technical Regulations of the Customs Union. Approved by Decision of the Commission of the Customs Union, December 9, 2011, No. 881. Moscow, 2012. 28 p. (rus)
 26. *TR TS 021/2011. O bezopasnosti pishchevoy produktsii* [TR TS 021/2011. On the safety of food products]: Technical Regulations of the Customs Union. Approved by Decision of the Commission of the Customs Union, December 9, 2011, 880. Moscow, 2012. 242 p. (rus)
 27. Shantyr' I.I., Rodionov G.G., Smetanin A.L., Korosteleva O.G., Svetkina E.V., Kolobova E.A. *Obespechennost' zhirorastvorimymi vitaminami i polinenasyshchennymi zhirnymi kislotami organizma voennosluzhashchikh po prizyvu po zavershenii perioda nachal'noy voennoy podgotovki* [Availability of fat-soluble vitamins and polyunsaturated fatty acids in military conscripts by the end of initial military training]. *Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations*, 2023. No. 3. Pp. 90–97. (rus). DOI: 10.25016/2541-7487-2023-0-3-90-97. EDN: CBJQAV.

28. Gumerov T.Yu., Klintsova A.K., Nasyrova E.A. O pitanii sotrudnikov spasatel'noy sluzhby [About nutrition of rescue service employees]. *Life Safety*, 2025. No. 5 (293). Pp. 6–11. (rus). EDN: XFTFBG.
29. Shagiakhmetova A.R., Gumerov T.Yu., Mingaleeva Z.Sh. O nekotorykh osobennostyakh pitaniya sotrudnikov spasatel'noy sluzhby [About some features of nutrition for rescue service employees]. *Biology in Agricultural*, 2025. No. 4 (49). Pp. 52–56. (rus). EDN: ADMFXH.
30. Gumerov T.Yu., Mingaleeva Z.Sh., Shvink K.Yu., Gomzina E.G. *Zernovoy produkt dlya pitaniya sotrudnikov spasatel'noy sluzhby* [Grain product for alimentation of rescue service personnel]: *patent RU 2823337 C1*. Published July 22, 2024. Applicant Kazan National Research Technological University.
31. Efimova E.A., Gumerov T.Yu., Klintsova A.K., Mingaleeva Z.Sh. Zernovye batonchiki dlya pitaniya sotrudnikov spasatel'noy sluzhby [Cereal bars for rescue service staff]. *Technology AND Merchandising of the Innovative Foodstuff*, 2024. No. 6 (89). Pp. 35–41. (rus). DOI: 10.33979/2219-8466-2024-89-6-35-41. – EDN: GAFROB.

Copyright © 2026 Shakirova A.I., Antonova I.I., Shagiakhmetova A.R., Gumerov T.Yu.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОБСТВЕННОЙ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ОРГАНАХ ПОГРАНИЧНОЙ СЛУЖБЫ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК

Ковтун В.А., Бугай А.Н., Ильючик Е.А.

Цель. Обоснование пределов приемлемо опасной дозы дополнительной к естественному радиационному фону для сотрудников органов пограничной службы, осуществляющих охрану государственной границы в различных условиях радиационной обстановки.

Методы. Анализ и описание специфичности воздействия различных типов облучения и характеристик некоторых радионуклидов. Сравнительный анализ и обобщение информации по дозовой нагрузке военнослужащих органов пограничной службы.

Результаты. Выявлены основные факторы, рекомендуемые к учету в процессе нормирования дозовой нагрузки и определения последствий облучения. Рассчитаны прогнозные показатели мощности экспозиционной дозы в целях распределения дозовой нагрузки на личный состав при выполнении ими задач по охране государственной границы в условиях радиоактивного загрязнения. Проведен анализ данных автоматизированной системы дозиметрического контроля военнослужащих, выполнявших задачи по охране государственной границы на территории Полесского государственного радиационного экологического заповедника (ППРЭЗ). Предложены основные пределы доз облучения для сотрудников органов пограничной службы, действующих в условиях радиологической чрезвычайной ситуации.

Ключевые слова: охрана государственной границы, радиоактивное загрязнение, ионизирующее излучение, дозовая нагрузка, радиационная безопасность, радиологическая чрезвычайная ситуация, предел дозы, дозиметрический контроль.

(Поступила в редакцию 30 сентября 2025 г.)

Введение

В ряде научных работ [1–5] показана принципиальная допустимость влияния малых уровней облучения (малых доз и малых мощностей доз)¹ искусственной (техногенной) радиации на человека. В то же время появляется все больше работ, в которых утверждается об опасности влияния любой радиации, воздействующей на человека сверх естественного радиационного фона.

В настоящее время в органах пограничной службы Республики Беларусь (ОПС) вопросами обеспечения радиационной безопасности занимаются специалисты службы радиационной, химической и биологической защиты (РХБ-защита). РХБ-защита является одним из видов боевого обеспечения оперативно-служебной деятельности ОПС и выполняет следующие задачи:

- обеспечение защиты сотрудников ОПС от воздействия источников ионизирующего излучения (ИИИ);
- предотвращение незаконного трансграничного перемещения ИИИ;
- мониторинг радиационной обстановки.

По мнению специалистов в данной сфере, в том числе в ОПС, не так опасна радиофобия, выражающаяся в необоснованном страхе перед радиацией, как «радиационный нигилизм», связанный с недостаточным учетом ее опасного влияния на человека.

Учитывая тот факт, что сегодня техногенная радиация самыми разными путями все активнее вторгается в жизнь человечества, одной из важнейших задач обеспечения собственной радиационной безопасности в ОПС является своевременное обнаружение возможных угроз, связанных с воздействием ионизирующих излучений.

¹ Малыми, как правило, считаются: разовая эквивалентная доза до 0,1 Зв (10 сЗв или 100 мЗв) или 10 бэр; поглощенная доза до 0,1 Гр (10 сГр или 100 мГр) или 10 рад. Малыми (низкими) мощностями доз (доза за единицу времени) обычно считается эффективная эквивалентная доза до 0,1 Зв/год (100 мЗв/год), что примерно соответствует экспозиционной дозе 750 мкР/ч.

С конца XIX в. и до наших дней произошли крупные аварии, инциденты и потенциально опасные события, связанные с использованием атомной энергии. Так, по результатам анализа аварийных радиологических ситуаций в мировой ядерной индустрии определено, что с 1952 г. произошло более 100 крупных аварий на АЭС, приведших к человеческим жертвам либо крупному материальному ущербу. Также нередко остаются необнаруженными и случайные техногенные низкоуровневые радиационные загрязнения окружающей среды, приводящие к головным болям, перепадам давления и другим недомоганиям [1; 2].

В течение многих лет после открытия радиации основным поражающим воздействием облучения считалось лишь покраснение кожи. До пятидесятих годов XX в. основным фактором непосредственного воздействия радиации считалось прямое радиационное поражение кожи, костного мозга, центральной нервной системы, желудочно-кишечного тракта. К началу шестидесятих годов выяснилось, что многократное облучение может сказаться не сразу, а через несколько десятков лет. Этот так называемый латентный (скрытый) период оказывается разным для разных видов рака, для нарушений кровообращения, шизофрении, катаракты и других заболеваний, вызываемых радиацией. Например, согласно отдельным прогнозным показателям, после облучения малыми дозами радиации в результате радиологической чрезвычайной ситуации вероятность развития различных форм раковых заболеваний резко возрастает: для мужчин через 55–65 лет, для женщин через 49–67 лет после облучения [3; 4].

Доказательством того, что те или иные заболевания могут быть связаны с радиацией, посвящены многочисленные научные труды. Обширный материал для таких трудов, кроме множества специальных экспериментальных исследований, дает изучение атомных бомбардировок Хиросимы и Нагасаки, последствий испытаний тысяч атомных бомб и катастрофы на Чернобыльской АЭС [5–7].

Сегодня официальные перечни² подтверждают связь с радиацией все большего круга заболеваний, возникновение или обострение которых обусловлено ее воздействием.

Основная часть

В основе современной системы регламентации малых радиационных нагрузок лежит учет трех эффектов: злокачественные новообразования у облученных лиц, крупные генетические эффекты, значительные нарушения умственного развития.

При этом важно отметить, что в вопросах нормирования дозовой нагрузки необходимо учитывать следующие факторы:

- возможность сенсibilизации (увеличения чувствительности) организма к последующему облучению после облучения в малых дозах;
- специфичность разных типов облучения;
- разная радиотоксичность каждого радионуклида;
- вторичные последствия техногенной радиации [8].

Исходя из вышеизложенного возникает реальная необходимость более скрупулезного учета последствий воздействия ионизирующих излучений, в том числе в ОПС, в связи с тем что официальные нормы радиационной безопасности учитывают не все из них.

Так, в 1950 г. шведский радиобиолог Р.М. Зиверт пришел к заключению, что для действия радиации на живые организмы нет порогового уровня, т.е. любая доза дополнительного облучения вызывает тот или иной эффект [9]. Например, при облучении в больших дозах поражения неизбежно возникают у каждой особи в виде так называемого детерминированного эффекта, а при облучении в малых дозах эффект будет стохастическим, т.е. изменения среди группы облученных обязательно возникнут, но у какой именно особи – заранее определить невозможно.

Поскольку радиация может нарушать работу различных органов человека, стохастические эффекты оказываются разнообразными. Известно, например, что дети и пожилые люди в большей степени подвержены воздействию радиации. Существует значительная изменчивость радиочувствительности в любой возрастно-половой группе, где примерно четверть всех людей обладает повышенной радиочувствительностью, а около 20 % – пониженной [10].

² О межведомственных экспертных советах и Государственном регистре лиц, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 11 июня 2009 г. № 773 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C20900773> (дата обращения: 15.09.2025).

Однако отсутствие порогового уровня при действии радиации не исключает существования приемлемого по опасности уровня облучения.

Пределы приемлемо опасной дозы дополнительного к естественному радиационному фону облучения для населения были впервые установлены в 1952 г. и соответствовали 15 мЗв в год. Однако под напором фактов об опасном воздействии радиации уже в 1959 г. эту дозу уменьшили до 5 мЗв в год, а в 1990 г. – до 1 мЗв в год.

В настоящее время по рекомендациям Международной комиссии по радиационной защите в Республике Беларусь для категории «персонал» допустимый предел годовой эффективной дозы для мужчин составляет 20 мЗв в год, а для категории «население» – 1 мЗв в год. Под термином «население» стоит понимать физических лиц, которые могут подвергнуться облучению в ситуациях планируемого, аварийного и существующего облучения, кроме профессионального и медицинского облучения, а под термином «персонал» – физических лиц, работающих по трудовым и (или) гражданско-правовым договорам, предметом которых является выполнение работ (оказание услуг) с ИИИ, а также физических лиц, работающих по трудовым и (или) гражданско-правовым договорам и находящихся по условиям труда в зоне воздействия ИИИ³.

При этом необходимо отметить, что приемлемо опасный уровень облучения для одного человека будет одним, а для другого человека из той же группы – другим, так же как в разное время дня и в разные сезоны года радиочувствительность одного и того же человека будет различной и, соответственно, приемлемый порог безопасности будет меняться.

В таблице 1 приведены прогнозные значения мощности экспозиционной дозы (МЭД) ИИИ, при которых личный состав ОПС получит соответствующую эквивалентную дозу (ЭД) с учетом специфики выполняемых задач оперативно-служебной деятельности (ОСД). Вычисления проводились в программе Rad Pro Calculator [11].

Таблица 1. – Варианты воздействия техногенных ИИИ на сотрудников ОПС

Условия облучения техногенной радиацией	Значение МЭД, мЗв/ч	Время нахождения в условиях воздействия ИИИ, ч	Значение ЭД, мЗв
Несение службы на территории ПГРЭЗ	до 0,016	до накопления предельного значения ЭД	не более 5 за отдельный год
Незаконное трансграничное перемещение ядерных и радиоактивных материалов	до 0,2	4 (выявление и локализация, проверочные мероприятия)	до 0,8
Применение «грязной бомбы» (разрушение объекта с ИИИ)	100 (для 0,5 кг Co ⁶⁰)	24 (локализация и ликвидация последствий, выполнение задач ОСД)	1200

Так, в соответствии с проведенными расчетами, при возникновении радиологической чрезвычайной ситуации (РЧС) в результате применения самодельного взрывного устройства с использованием такого радионуклида, как кобальт-60 произойдет радиоактивное загрязнение местности, пребывание на которой более 24 ч может привести к возникновению первой степени лучевой болезни.

Таким образом, в ОПС специалистами служб радиационной, химической и биологической защиты активно прорабатываются вопросы оптимизации дозовой нагрузки сотрудников в различных условиях радиационной обстановки.

Например, при возникновении на участке ответственности территориального органа пограничной службы (ТОПС) радиологической чрезвычайной ситуации личный состав будет выполнять задачи в условиях сложной радиационной обстановки, сопровождающейся неоднократным облучением, при котором его суммарная поглощенная доза может значительно превысить допустимую.

В настоящее время в ОПС в соответствии с действующим законодательством установлены следующие пороговые значения ЭД:

– для человека, относящегося к категории «население», – 1 мЗв в год;

³ О радиационной безопасности: Закон Респ. Беларусь от 18 июня 2019 г. № 198-З // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H11900198> (дата обращения: 15.09.2025).

– для человека, относящегося к категории «персонал» и выполняющего задачи по охране государственной границы на радиоактивно загрязненной местности (на территории ПГРЭЗ) – 5 мЗв в год^{4, 5}.

На рисунке 1 представлен графический анализ данных дозиметрического контроля на примере десяти военнослужащих подразделений Мозырского пограничного отряда и Гомельской пограничной группы, выполнявших задачи по охране государственной границы на территории ПГРЭЗ в течение одного календарного года. Значения ЭД определялись по показаниям штатных приборов дозиметрического контроля ДКГ-РМ 1610.

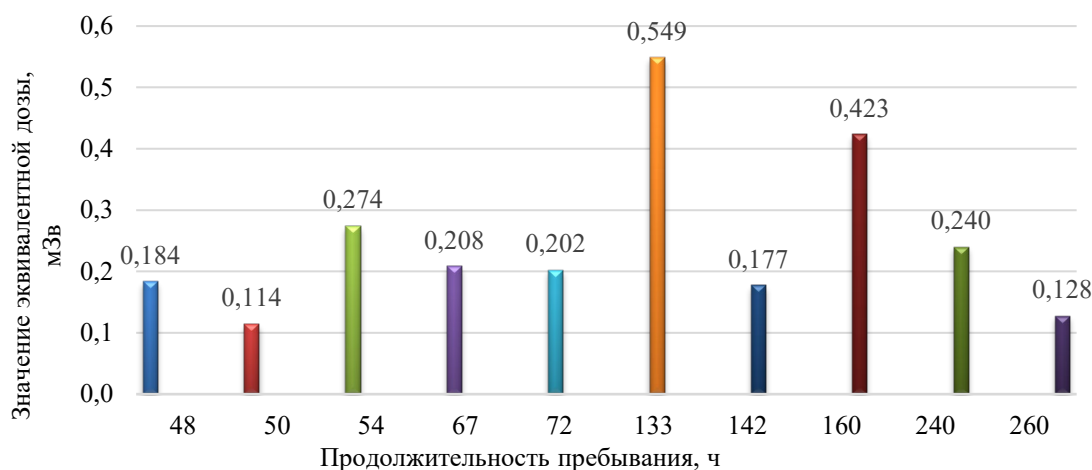


Рисунок 1. – Распределение дозовой нагрузки на личный состав при выполнении задач по охране государственной границы в условиях радиоактивного загрязнения

Результаты проведенного анализа данных позволили установить, что полученные дозы облучения личного состава распределяются неравномерно. При этом, как видно на графике, время пребывания на зараженной местности не является лимитирующим фактором, а основной вклад в дозовую нагрузку вносит МЭД на участке местности, на которой личный состав выполнял задачу по охране государственной границы. Также немаловажным фактором является функционирование системы обеспечения радиационной безопасности в ОПС, эффективность которой подтверждается тем, что за все время наблюдения с 2018 по 2025 г. превышения установленной дозовой нагрузки (5 мЗв в год) личным составом допущено не было.

Вместе с тем при оценке прогнозируемой радиационной обстановки необходимо прогнозировать варианты возникновения РЧС с наиболее сложной радиационной обстановкой, предполагающей неоднократное повторное облучение человека с учетом характера загрязнения и способности организма восстанавливаться после радиационного поражения. Организм человека способен восстановить в среднем 90 % от общей поглощенной дозы, которую принято называть обратимой частью радиационного поражения, а 10 % – это остаточная доза. Предполагается, что остаточная доза вносит основной вклад в появление и развитие отдаленных негативных эффектов радиационного поражения. При этом необходимо отметить, что в первые четверо суток с момента облучения восстановление не происходит. В условиях сложной радиационной обстановки в целях определения допустимого для организма облучения рекомендуется суммировать 10 % остаточной дозы с той частью обратимой дозы, от которой организм еще не восстановился. Сумма этих частей является эффективной дозой. При этом расчет эффективной дозы $D_{эф}$ при однократном облучении может быть произведен по формуле [12]:

$$D_{эф} = aD_0, \quad (1)$$

где D_0 – доза однократного облучения (ЭД), мЗв;

a – коэффициент для D_0 , определяемый по графику рисунка 2.

⁴ Об утверждении гигиенических нормативов: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 29 нояб. 2022 г. № 829 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100037> (дата обращения: 15.09.2025).

⁵ Об утверждении Инструкции о порядке организации служебной деятельности в зоне радиоактивного загрязнения: приказ Председателя Государственного пограничного комитета Респ. Беларусь от 20 марта 2019 г. № 130.

Расчет эффективной дозы при многократном облучении производится по формуле [12]:

$$D_{\text{эф}} = aD_0 + bD, \quad (2)$$

где D – суммарная доза многократного облучения (ЭД), мЗв;
 b – коэффициент для D , определяемый по графику рисунка 3.

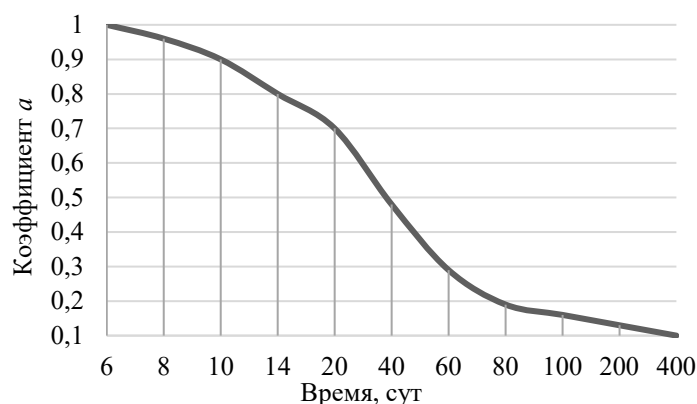


Рисунок 2. – Коэффициент a для определения эффективной дозы при однократном облучении

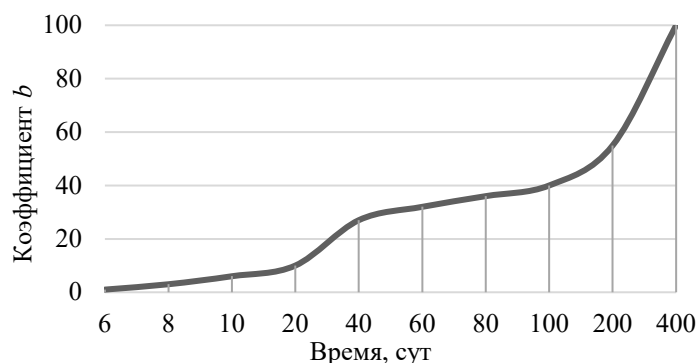


Рисунок 3. – Коэффициент b для определения эффективной дозы при многократном облучении

Далее необходимо отметить, что в непосредственной близости от государственной границы Республики Беларусь на территории Литвы, Украины и России расположены радиационно опасные объекты, такие как Игналинская АЭС (10 км южнее н.п. Игналина), Ровенская АЭС (5 км северо-западнее н.п. Кузнецовск Ровенской области), Чернобыльская АЭС (10 км юго-западнее н.п. Припять), Смоленская АЭС (20 км юго-западнее н.п. Рославль). Среднее удаление АЭС от границ республики составляет 45 км. В соответствии с действующей в ОПС методикой по оценке радиационной и химической обстановки [13] определено, что при максимальном разрушении одного из блоков указанных АЭС длительное радиационное воздействие возможно на расстоянии до 100 км. В случае аварии в зоне 100 км радиоактивному загрязнению может подвергнуться часть приграничных районов Республики Беларусь: Поставский, Глубокский, Мядельский, Миорский, Дрогичинский, Ивановский, Пинский, Столинский, Лельчицкий, Калинковичский, Хойницкий, Костюковичский, Климовичский, Мстиславский, Чаусовский, Горецкий. Произведен расчет прогнозируемых доз облучения сотрудников ОПС в случае возникновения РЧС на БелАЭС с выбросами в атмосферу более 50 % активных веществ. Данные прогноза развития следа представлены в таблице 2 (категория устойчивости атмосферы принята как сильно неустойчивая – А, а средняя скорость ветра в слое от поверхности земли до высоты перемещения центра облака – 2 м/с).

При таком развитии РЧС приграничные территории с населенными пунктами, а также подразделения границы и пункты пропуска, расположенные на данном участке, попадут в зоны радиоактивного загрязнения А и Б (100 км зона от АЭС). Согласно проведенным расчетам при пребывании на открытом зараженном участке местности в течение 12 ч значение эквивалентной дозы для зоны А составит 30 мЗв и 170 мЗв для зоны Б. В случае нахождения на внутренних границах указанных зон значения эквивалентных доз будут выше в 3,2 раза для зоны А и в 1,7 раза для зоны Б и составят 96 и 289 мЗв соответственно.

Таблица 2. – Данные прогноза развития следа¹ при аварии на БелаЭС

Категория устойчивости атмосферы ² / средняя скорость ветра, м/с	Тип реактора	Выход активности ³ , %	Зоны загрязнения (длина – ширина), км				
			М (доза облучения 0,05–0,5 Зв в год)	А (доза облучения 0,5–5 Зв в год)	Б (доза облучения 5–15 Зв в год)	В (доза облучения 15–50 Зв в год)	Г (доза облучения более 50 Зв в год)
А / 2	ВВЭР-1200	50	438–111	123–24,6	20,4–3,73	8,87–1,07	–

Примечания:

1. В методике [13] проведены расчеты для двух типов ядерных энергетических реакторов на тепловых нейтронах: реактор большой мощности канальный (РБМК); водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР). Также в типе реактора указывается мощность каждого блока, МВт.
2. Категория устойчивости атмосферы соответствует погодным условиям и времени суток (по Пасквиллу), она подразделяется на следующие виды: А – сильно не устойчивая, конвекция; D – нейтральная, изотермия; F – очень устойчивая, инверсия.
3. Выход активности – доля выброшенных радиоактивных веществ из ядерного энергетического реактора (от содержащихся в реакторе на момент аварии радиоактивных веществ), % (в методике приведены расчеты для 10, 30 и 50 %).

Таким образом, при возникновении радиоактивного заражения местности, особенно протяженных участков государственной границы, существует необходимость определения допустимых предельных значений доз облучения для сотрудников ОПС исходя из определенной эффективной дозы. В этом случае предельные значения доз облучения, которые можно получить при выполнении задач по охране государственной границы в условиях РЧС, рекомендуется определять с учетом действующих нормативных правовых актов Республики Беларусь, а также рекомендаций Международного комитета по радиационной защите и МАГАТЭ.

Порядок регистрации и контроля доз облучения сотрудников ОПС при возникновении РЧС в мирное время включает использование индивидуальных дозиметров либо технических средств радиационного и дозиметрического контроля с функцией отображения данных дозиметрического контроля (значений ЭД). Дозиметрический контроль в ОПС ведется индивидуальным способом – при наличии у каждого сотрудника соответствующего технического средства. Также допускается проведение дозиметрического контроля групповым способом в том случае, когда сотрудники ОПС действуют на местности, подвергшейся радиоактивному загрязнению в составе группы, при этом техническое средство радиационного и дозиметрического контроля находится у одного из сотрудников. После выполнения задачи в условиях радиоактивного загрязнения местности данные дозиметрического контроля вносятся в автоматизированную систему радиационного контроля, в ведомость учета индивидуальных доз облучения и в карточку учета индивидуальных доз облучения.

На основании изложенного аналитического материала предлагается выделить действующие (табл. 3) и предлагаемые (табл. 4) значения пределов доз облучения сотрудников ОПС.

Таблица 3. – Действующие значения пределов доз облучения сотрудников ОПС

Нормируемая величина	Пределы доз, мЗв	
	Сотрудники ОПС, отнесенные к категории «персонал»	Сотрудники ОПС, отнесенные к категории «население»
Эффективная доза	20 мЗв в год, допускается до 50 мЗв в год при условии, что средняя годовая эффективная доза облучения за пять последовательных лет, включая год, в котором был превышен предел средней годовой эффективной дозы, не превысит 20 мЗв	1 мЗв в год, допускается до 5 мЗв в год при условии, что средняя годовая эффективная доза облучения за пять последовательных лет, включая год, в котором был превышен предел средней годовой эффективной дозы, не превысит 1 мЗв
	5 мЗв в год для сотрудников ОПС, выполняющих задачи по охране государственной границы в зоне радиоактивного загрязнения после катастрофы на Чернобыльской АЭС	

При этом стоит отметить, что при возникновении РЧС на участке подразделения ТОПС пограничные наряды, вероятнее всего, продолжают выполнять задачи по охране государственной границы, но уже в условиях радиоактивного загрязнения местности, соблюдая при этом требования по обеспечению собственной радиационной безопасности. Также специалисты РХБ-защиты и иные должностные лица ОПС при проведении проверочных ме-

роприятий, связанных с обращением с ИИИ на участке Государственной границы Республики Беларусь в рамках своей компетенции, выявляют изменения радиационной обстановки на приграничной территории в ходе проведения радиационного контроля и мониторинга радиационной обстановки и осуществляют взаимодействие с республиканскими органами государственного управления⁶. В соответствии с требованиями Закона о радиационной безопасности ОПС входят в систему Национального мониторинга за радиационной обстановкой. Возможности подразделений ОПС позволяют на раннем этапе развития РЧС на приграничной территории выявить и локализовать ее, а также передать необходимую информацию взаимодействующим органам государственного управления и проинформировать приграничное население.

В таблице 4 указаны предлагаемые значения пределов доз облучения сотрудников ОПС при выполнении ими различных задач в условиях радиоактивного загрязнения. Данные таблицы 3 учитывают эффективную дозу, полученную от внешнего облучения, и соответствуют требованиям санитарно-гигиенических норм и правил⁷. Сотрудники ОПС, получившие в процессе выполнения задач в условиях радиоактивного загрязнения дозу облучения свыше установленного предела, к дальнейшим действиям в условиях радиоактивного загрязнения, а также к работам с радиоактивными веществами не допускаются. При получении сотрудниками ОПС дозы свыше 200 мЗв в год решение об их допуске к дальнейшему выполнению задач в условиях радиоактивного загрязнения, а также обращению с радиоактивными веществами принимается на основании медицинского заключения.

Таблица 4. – Предлагаемые значения пределов доз облучения для сотрудников ОПС в условиях РЧС

Задача	Уровень дозы облучения
Действия по спасению жизни людей на приграничной территории	Десятикратное значение предела дозы* в течение отдельного года (500 мЗв и более). Данный уровень дозы облучения может быть превышен лишь в том случае, если польза для других людей превышает риск для сотрудника ОПС и сотрудник добровольно согласен принимать участие в защитных мероприятиях, осознавая и принимая риск, которому подвергается
Оказание практической помощи Республиканским органам государственного управления и иным органам и организациям по ликвидации последствий РЧС на приграничной территории для предотвращения тяжелых детерминированных эффектов для здоровья людей и окружающей среды	Четырехкратное значение предела дозы в течение отдельного года (200 мЗв)
Действия, направленные на предотвращение высокой коллективной эффективной дозы облучения сотрудников ОПС и населения приграничной территории. Локализация РЧС, связанной с незаконным трансграничным перемещением ИИИ вне пунктов пропуска и в пунктах пропуска через Государственную границу Республики Беларусь	Двукратное значение предела дозы в течение отдельного года (100 мЗв)
Выполнение задач оперативно-служебной деятельности в условиях радиоактивного загрязнения. Проведение радиационного и дозиметрического контроля, радиационной разведки, дезактивации	Однократное значение предела дозы в течение отдельного года (50 мЗв)

Предлагаемые значения пределов доз облучения спрогнозированы исходя из наиболее сложного и неблагоприятного развития РЧС на приграничной территории, которая может потребовать длительного выполнения задач оперативно-служебной (служебно-боевой)

⁶ Об утверждении Положения о порядке взаимодействия республиканских органов государственного управления, иных государственных органов (организаций) при обнаружении источников ионизирующего излучения, собственники которых не установлены, а также в случае задержания источников ионизирующего излучения при ввозе в Республику Беларусь и (или) вывозе из Республики Беларусь: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 30 апр. 2009 г. № 560 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=C20900560> (дата обращения: 15.09.2025).

⁷ Об утверждении Санитарных норм и правил «Требования к радиационной безопасности» и Гигиенического норматива «Критерии оценки радиационного воздействия»: постановление М-ва здравоохранения Респ. Беларусь от 28 дек. 2012 г. № 213 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21326850p> (дата обращения: 15.09.2025).

деятельности на радиоактивно загрязненной местности, и могут быть введены в случае возникновения радиационной аварии в соответствии с Законом Республики Беларусь «О радиационной безопасности»⁸.

Заключение

Таким образом, анализ фактических данных радиационной обстановки на территории ППРЭЗ, данных дозиметрического контроля сотрудников ОПС, выполняющих задачи в условиях радиоактивного загрязнения, мировой опыт в локализации и ликвидации последствий РЧС, а также рассчитанные варианты прогнозного облучения сотрудников ОПС позволили выработать и обосновать следующие предложения и рекомендации по оптимизации дозовых нагрузок для сотрудников ОПС:

1. При определении допустимого времени пребывания личного состава ОПС на радиоактивно загрязненной местности необходимо учитывать характер загрязнения (радионуклидный состав), а также факт увеличения чувствительности организма к последующему облучению после его облучения малыми дозами, т.е. при оценке дозовой нагрузки рекомендуется производить расчет эффективной дозы, учитывающий многократное облучение.

2. При установлении норм рекомендуется указывать конкретные мероприятия, обоснованные спецификой выполняемых задач подразделениями ОПС в условиях РЧС, в ходе которых сотрудники ОПС будут подтверждены воздействию ионизирующего излучения.

Предлагаемые в статье значения доз облучения рекомендуется использовать при разработке инструкции по обеспечению радиационной безопасности в ОПС, учитывающей возникновение различных РЧС на участке ответственности ТОПС.

Таким образом, в целях выполнения задач по охране государственной границы на радиоактивно загрязненной местности, а также в случаях возникновения РЧС, с учетом выработанных предложений и рекомендаций, важнейшей задачей является обеспечение собственной радиационной безопасности сотрудников ОПС, заключающееся:

- в установлении норм облучения для сотрудников ОПС в соответствии с характером загрязнения и спецификой выполняемых задач, с учетом наиболее неблагоприятных условий развития РЧС и действующего законодательства в сфере обеспечения радиационной безопасности;
- обеспечении современными техническими средствами радиационного и дозиметрического контроля, в том числе дистанционного принципа действия;
- проведении расчетов допустимого времени пребывания сотрудников ОПС на радиоактивно загрязненной местности;
- подборе наиболее эффективных средств и методов индивидуальной и коллективной защиты;
- отработке наиболее эффективных алгоритмов действий личного состава, при выполнении ими задач в условиях РЧС, на которые распространяются нормы пределов доз;
- подготовке ведомственных нормативных правовых актов, регулирующих вопросы обеспечения радиационной безопасности в ОПС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бугай, А.Н. Хроники крупных аварий, инцидентов и потенциально опасных событий атомной эпохи по отечественным и зарубежным публикациям: обзор / А.Н. Бугай; Ин-т погранич. службы Респ. Беларусь. – Мн.: ИПС РБ, 2010. – 77 с.
2. Алексахин, Р.М. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры: монография / Р.М. Алексахин, Л.А. Булдаков, В.А. Губанов [и др.]; под общ. ред. Л.А. Ильина, В.А. Губанова. – М.: ИздАТ, 2001 – 752 с.
3. Жуковский, М.В. Радиационные риски для населения зоны ВУРСа Свердловской области / М.В. Жуковский, А.В. Павлюк // Урал атомный, Урал промышленный – 2000: тез. докл. VIII Междунар. экологического симпозиума / Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН. – Екатеринбург, 2000. – С. 91–95.
4. Бугай, А.Н. Некоторые аспекты оценки влияния прогнозируемой радиационной обстановки на выполнение задач по охране государственной границы в мирное время / А.Н. Бугай, Д.В. Воробьев // Вестник Института пограничной службы Республики Беларусь. – 2021. – № 2. – С. 26–36.

⁸ См. сноску 3.

5. Сахаровские чтения 2024 года: экологические проблемы XXI века: материалы 24-й Междунар. науч. конф., Минск, 23–24 мая 2024 г.: в 2 ч. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А.Д. Сахарова Бел. гос. ун-та; под ред. О.И. Родькина, М.Г. Герменчук. – Мн.: ИВИЦ Минфина, 2024. – Ч. 1. – 424 с. – URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/325903> (дата обращения: 15.09.2025).
6. Гамеза, А.Д. Последствия применения ядерного оружия / А.Д. Гомеза, К.А. Гаврилина, О.В. Малашевская // Обеспечение безопасности жизнедеятельности на современном этапе развития общества: материалы междунар. научно-практ. конф., Горки, 18–19 апр. 2024 г. – Горки: БГСХА, 2024. – С. 53–55. – EDN: CHUCKN.
7. Pincus, W. The horrors of nuclear weapons testing / W. Pincus // Bulletin of the Atomic Scientists. – 2024. – Vol. 80, No. 2. – P. 112–117. – DOI: 10.1080/00963402.2024.2314436.
8. IAEA Nuclear safety and security glossary: Terminology used in nuclear safety, nuclear security, radiation protection and emergency preparedness and response / International Atomic Energy Agency. – (Interim) Edition. – Vienna: IAEA, 2022. – 237 p. – DOI: 10.61092/iaea.rrxi-t56z.
9. Яблоков, А.В. Миф о безопасности малых доз радиации: Атомная мифология / А.В. Яблоков. – М.: Центр экологической политики России, ООО «Проект Ф», 2002. – 145 с. – ISBN 5-901815-04-1.
10. Нормы безопасности МАГАТЭ. Общие требования безопасности / Международное агентство по атомной энергии. – Вена: МАГАТЭ, 2015. – Часть 3. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. – 477 с. – ISBN 978-92-0-409915-7.
11. Rad Pro Calculator: [site]. – URL: <http://www.radprocalculator.com> (date of access: 17.12.2025).
12. Максимов, М.Т. Радиоактивные загрязнения и их измерения: учеб. пособие / М.Т. Максимов, О.Г. Оджагов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 304 с. – ISBN 5-283-02930-1.
13. Бугай, А.Н. Радиационная, химическая и биологическая защита. Методика оценки радиационной и химической обстановки: учеб. пособие / А.Н. Бугай, Д.В. Воробьев; Ин-т погранич. службы Респ. Беларусь. – Мн.: ИПС РБ, 2022. – 135 с.

**Обеспечение собственной радиационной безопасности в органах пограничной службы
путем оптимизации дозовых нагрузок**

Ensuring radiation safety in border service agencies by optimizing radiation doses

Ковтун Вадим Анатольевич

доктор технических наук, профессор
Филиал «Институт профессионального
образования» государственного учреждения
образования «Университет гражданской
защиты Министерства по чрезвычайным
ситуациям Республики Беларусь», кафедра
оперативно-тактической деятельности
и техники, профессор

Адрес: пр-т Речицкий, 35А,
246023, г. Гомель, Беларусь
Email: vadimkov@yandex.ru
SPIN-код: 3383-9618

Vadim A. Kovtun

Grand PhD in Technical Sciences, Professor
Branch «Institute of Vocational Education»
of the State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Operational-Tactical Activity
and Technical Equipment, Professor

Address: Rechitskiy ave., 35A,
246023, Gomel, Belarus
Email: vadimkov@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-9510-132X
ScopusID: 7006098716

Бугай Андрей Николаевич

кандидат военных наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Институт пограничной службы Республики
Беларусь», кафедра дисциплин обеспечения,
профессор

Адрес: ул. Славинского, 4,
220103, г. Минск, Беларусь
Email: anbugay68@gmail.com

Andrey N. Bugay

PhD in Military Sciences, Associate Professor
State educational institution
«Institute of Border Service Republic of Belarus»,
Chair of Support Disciplines,
Professor

Address: Slavinskogo str., 4,
220103, Minsk, Belarus
Email: anbugay68@gmail.com
ORCID: 0009-0005-8149-6689

Ильючик Евгений Андреевич

Государственное учреждение образования
«Институт пограничной службы Республики
Беларусь», кафедра дисциплин обеспечения,
старший преподаватель

Адрес: ул. Славинского, 4,
220103, г. Минск, Беларусь
Email: irathemam@gmail.com

Evgeniy A. Il'yuchik

State educational institution
«Institute of Border Service Republic of Belarus»,
Chair of Support Disciplines,
Senior Lecturer

Address: Slavinskogo str., 4,
220103, Minsk, Belarus
Email: irathemam@gmail.com
ORCID: 0009-0006-8809-8226

ENSURING RADIATION SAFETY IN BORDER SERVICE AGENCIES BY OPTIMIZING RADIATION DOSES

Kovtun V.A., Bugay A.N., Il'yuchik E.A.

Purpose. To justify the limits of acceptable hazardous doses in addition to natural background radiation for border service personnel guarding the state border under various radiation conditions.

Methods. Analysis and description of the specific effects of various types of radiation and the characteristics of certain radionuclides. Comparative analysis and generalisation of information on the radiation dose burden on border service personnel.

Findings. The key factors recommended for consideration in the process of standardizing radiation dose loads and determining the consequences of radiation exposure were identified. Predicted exposure dose rates were calculated for the purpose of distributing the dose load among personnel performing state border protection tasks in conditions of radioactive contamination. Data from an automated dosimetric monitoring system for military personnel performing border protection tasks in the Polesie State Radiation Ecological Reserve was analyzed. Basic radiation dose limits for border service personnel operating in radiological emergencies were proposed.

Keywords: state border protection, radioactive contamination, ionizing radiation, dose load, radiation safety, radiological emergency, dose limit, dosimetric monitoring.

(The date of submitting: September 30, 2025)

REFERENCES

1. Bugay A.N. *Khroniki krupnykh aviariy, insidentov i potentsial'no opasnykh sobytiy atomnoy epokhi po otechestvennym i zarubezhnym publikatsiyam* [Chronicles of major accidents, incidents and potentially dangerous events of the atomic era according to domestic and foreign publications]: review. Minsk: Institute of Border Service of the Republic of Belarus, 2010. 77 p. (rus)
2. Aleksakhin R.M., Buldakov L.A., Gubanov V.A. [et al.]. *Krupnye radiatsionnye avarii: posledstviya i zashchitnye mery* [Major radiation accidents: consequences and protective measures]: monograph. Ed. by L.A. Il'in, V.A. Gubanov. Moscow: IzdAT, 2001. 752 p. (rus)
3. Zhukovskiy M.V., Pavlyuk A.V. Radiatsionnye riski dlya naseleniya zony VURSa Sverdlovskoy oblasti [Radiation risks for the population of EURT area of Sverdlovsk region]. *Proc. of VIII International symposium «Ural atomic, Ural industrial – 2000»*. Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Ekaterinburg, 2000. Pp. 91–95.
4. Bugay A.N., Vorob'ev D.V. Nekotorye aspekty otsenki vliyaniya prognoziruemoy radiatsionnoy obstanovki na vypolnenie zadach po okhrane gosudarstvennoy granitsy v mirnoe vremya [Some aspects of the evaluation of the predicted radiation situation influence on the state border protection tasks completion]. *Vestnik Instituta pogranichnoy sluzhby Respubliki Belarus'*, 2021. No. 2. Pp. 26–36. (rus)
5. *Proc. of 24th Intern. scientific conf. «Sakharov readings 2024: environmental problems of the XXI century»*, Minsk, May 23–24, 2024. In 2 parts. International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University. Ed. by O.I. Rod'kin, M.G. Germenchuk. Minsk, 2024. Part 1. 424 p. (rus). URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/325903> (date of access: September 15, 2025).
6. Gameza A.D., Gavrilina K.A., Malashevskaya O.V. Posledstviya primeneniya yadernogo oruzhiya [Consequences of the use of nuclear weapons]. *Proc. of Intern. scientific-practical conf. «Obespechenie bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti na sovremennom etape razvitiya obshchestva»*, Gorki, April 18–19, 2024. Gorki: Belarusian State Agricultural Academy, 2024. Pp. 53–55. (rus). EDN: CHUCKN.
7. Pincus W. The horrors of nuclear weapons testing. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 2024. Vol. 80, No. 2. Pp. 112–117. DOI: 10.1080/00963402.2024.2314436.
8. *IAEA Nuclear safety and security glossary: Terminology used in nuclear safety, nuclear security, radiation protection and emergency preparedness and response*. International Atomic Energy Agency. (Interim) Edition. Vienna: IAEA, 2022. 237 p. DOI: 10.61092/iaea.rrxi-t56z.
9. Yablokov A.V. *Mif o bezopasnosti malykh doz radiatsii: Atomnaya mifologiya* [The myth of the safety of low radiation doses: Atomic mythology]. Moscow: Center for Environmental Policy of Russia, LLC «Proekt F», 2002. 145 p. (rus). ISBN 5-901815-04-1.
10. *IAEA Safety Standards: General Safety Requirements. Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. International Atomic Energy Agency. Vena: IAEA, 2015. 477 p. (rus). ISBN 978-92-0-409915-7.
11. *Rad Pro Calculator*: [site]. – URL: <http://www.radprocalculator.com> (date of access: December 17, 2025).

12. Maksimov M.T., Odzhagov O.G. Radioaktivnye zagryazneniya i ikh izmereniya [Radioactive contamination and its measurements]: tutorial. 2nd edition, revised and enlarged. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 304 p. (rus). ISBN 5-283-02930-1.
13. Bugay A.N., Vorob'ev D.V. Radiatsionnaya, khimicheskaya i biologicheskaya zashchita. Metodika otsenki radiatsionnoy i khimicheskoy obstanovki [Radiation, chemical and biological protection. Methodology of assessing radiation and chemical situation]: tutorial. Minsk: Institute of Border Service of the Republic of Belarus, 2022. 135 p. (rus)

Copyright © 2026 Kovtun V.A., Bugay A.N., Il'yuchik E.A.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

К ВОПРОСУ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 110 кВ И ВЫШЕ

Сидоренко А.С., Силин Н.В.

Цель. Анализ информации, позволяющей указать на необходимость разработки программы, направленной на совершенствование системы производственного экологического контроля и применение предупредительных мер по снижению негативного воздействия уровней напряженностей электромагнитных полей вблизи высоковольтного оборудования на территории электрических подстанций напряжением 110 кВ и выше.

Методы. Экспериментальное обследование пространственного распределения электромагнитного поля с формированием карт напряженностей для полей промышленной частоты (50 Гц) и высокочастотных полей.

Результаты. Показано, что электромагнитная обстановка на подобных объектах характеризуется высокими значениями напряженности электрического и магнитного полей в широком диапазоне частот. Приведена информация об источниках электромагнитных полей на электрических подстанциях, а также карты распределения уровней полей как на низкой частоте, так и в высокочастотном диапазоне. Представлена информация о спектральном составе собственного электромагнитного излучения силовых автотрансформаторов 500 кВ. Отмечено, что наиболее мощное излучение наблюдается в диапазоне от 1 до 150 МГц.

В качестве примеров приведены карты распределения повышенных уровней напряженностей полей на подстанции для различных частот. Определены наиболее опасные участки для обслуживающего персонала и факторы, влияющие на увеличение интенсивности полей. Приведены результаты экспериментальных исследований, показывающих, что для оборудования со сроком эксплуатации, превышающим нормативный, наблюдается повышение уровней электромагнитных полей. Сделан вывод, что для защиты персонала на электроэнергетических объектах необходима разработка мер по защите от электромагнитного влияния, зависящих от расположения высоковольтного оборудования на энергетическом объекте.

Область применения исследований. Данные исследования направлены на проработку проблемы совершенствования экологического контроля для предотвращения избыточного воздействия на организм человека. Полученные результаты могут быть использованы для разработки и совершенствования методик экологического контроля на высоковольтных подстанциях 110 кВ и выше.

Ключевые слова: экологическая безопасность, высоковольтное оборудование, высокочастотные излучения, напряженность поля, обслуживающий персонал.

(Поступила в редакцию 8 апреля 2026 г.)

Введение

На электроэнергетических объектах как при нормальной работе оборудования, так и при нестационарных процессах фиксируются высокие показатели напряженности электромагнитных полей в большом диапазоне частот. Электромагнитный фон в высокочастотном диапазоне формируется как природными факторами, так и нецелевым излучением технических устройств. В условиях штатной эксплуатации высоковольтного оборудования уровни напряженности электромагнитного поля (ЭМП) в прилегающей зоне могут превышать экологические нормы безопасности. При этом в переходных или аварийных режимах (короткие замыкания, удары молний) интенсивность поля кратно возрастает относительно стандартных рабочих значений [1].

Для электрических подстанций (ПС), как правило, характерна высокая степень насыщения высоковольтными установками, находящимися под рабочим напряжением. В этом случае в некоторых пространствах наблюдаются повышенные значения напряженностей полей, обусловленные наложением электромагнитных волн.

В связи с опасностью влияния электромагнитных полей на персонал, обслуживающий подстанцию, необходимо производить мониторинг электромагнитной обстановки вблизи высоковольтного оборудования, качественно измерять уровни напряженностей полей, анализировать потоки электромагнитных излучений.

Экологическая политика в электросетевом комплексе базируется на федеральных законах и иных нормативных правовых актах Российской Федерации, международных обязательствах Российской Федерации в области охраны окружающей среды. Публичное акционерное общество «Россети» (ПАО «Россети») в своей деятельности обеспечивает применение самых перспективных требований, направленных на снижение воздействия на окружающую среду, демонстрирует и владеет всеми необходимыми механизмами, направленными на предотвращение экологических рисков.

С целью улучшения ситуации в области экологической безопасности были разработаны положения о технической политике¹, согласно которым в том числе необходимо:

- проводить постоянный мониторинг экологической обстановки, соответствующий требованиям ГОСТ Р ИСО 14001-2016²;

- обеспечивать учет негативного воздействия на окружающую среду, модернизацию экологического контроля на производстве^{3, 4}.

Основная часть

Анализ источников ЭМП на ПС. Одной из основных особенностей электромагнитной обстановки на объектах электроэнергетики является высокая концентрация источников электромагнитных полей, что существенно затрудняет ее анализ, определение характеристик ЭМП, воздействующих на эксплуатирующий персонал. Среди высоковольтного оборудования на каждой ПС 110 кВ и выше к числу наиболее мощных источников относят трансформаторы, реакторы, трансформаторы напряжения и тока. Значительная часть высоковольтного оборудования подстанции расположена на относительно компактной площади (территория распределительного устройства), и расстояние между ее отдельными элементами (автотрансформаторы, реакторы, трансформаторы напряжения и тока) обычно не превышает десятка метров.

Например, на рисунке 1 представлен план размещения высоковольтного оборудования (автотрансформаторов и шунтирующих реакторов) на открытом распределительном устройстве 500 кВ (ОРУ 500 кВ) с зонами наибольших значений напряженности электрического поля (ЭП) на частоте 50 Гц. Эти зоны получены на основании результатов экспериментальных обследований пространственного распределения электрического и магнитного полей [2].

Экспериментальные исследования были произведены с помощью оборудования, состоящего из анализатора спектра Tektronix RSA306B⁵, логопериодической направленной антенны и компьютера с программным обеспечением. Методика измерения ЭМП на ПС основана на определении пространственного распределения напряженностей ЭП с учетом режимов работы высоковольтного оборудования и требований нормативных документов.

Измерения были выполнены для оценки уровней электромагнитного воздействия и сопоставления их с предельно допустимыми значениями. Основным измеряемым параметром – напряженность ЭП.

Выбор точек измерения определяется характером пространственного распределения поля. Контроль выполнен в зонах возможного максимума ЭМП: вблизи автотрансформаторов, ошиновки, вводов, а также на границах санитарно-защитной зоны.

Из рисунка видно, что на подстанциях существуют достаточно обширные площади с повышенными значениями напряженности ЭП. Исходя из СанПиН 1.2.3685-21⁶ для напряженности ЭП 50 Гц предельно допустимые уровни ЭМП для персонала подстанций 110 кВ и выше в течение смены не должны превышать 5 кВ/м. В случае превышения данного

¹ Положение ПАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе: утв. Советом директоров ПАО «Россети» (протокол от 22.02.2017 № 252). – М., 2017. – 196 с.

² Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению: ГОСТ Р ИСО 14001-2016. – Введ. 29.04.2016. – М.: Стандартинформ, 2018. – VII, 32 с.

³ Положение о технической политике ОАО «ФСК ЕЭС». – М.: 2011. – 147 с.

⁴ Положение ПАО «ФСК ЕЭС» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (новая редакция): утв. решением Совета директоров ПАО «ФСК ЕЭС» (протокол от 20.10.2022 № 592).

⁵ USB-анализатор спектра реального времени RSA306B // Каталог продукции Tektronix. – URL: <https://tektronix.nt-rt.ru/images/manuals/analizatori1.pdf> (дата обращения 02.04.2026).

⁶ Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»: утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 2 // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102030022> (дата обращения 02.04.2026).

значения время пребывания персонала в ЭП должно быть уменьшено. При уровне напряженности выше 25 кВ/м пребывание персонала в ЭП без средств индивидуальной защиты не допускается.

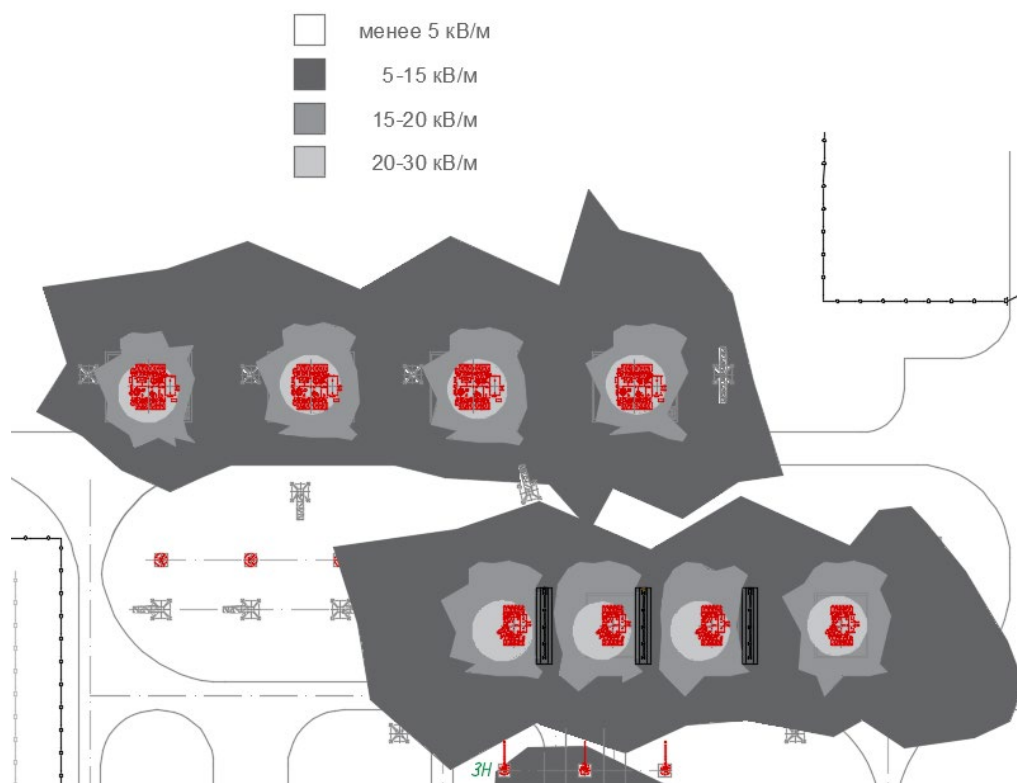


Рисунок 1. – Карта напряженности ЭП на фрагменте ОРУ 500 кВ на частоте 50 Гц

В таблице 1 приведены результаты анализа интервалов напряженности площадей ОРУ 500 кВ.

Таблица 1. – Распределение площадей зон с интервалами напряженности на ОРУ 500 кВ

Интервал напряженности, кВ/м	Площадь зоны напряженности на подстанции, %
<5	75,82
5–15	18,22
15–20	5,35
20–30	0,61

Как следует из таблицы, относительно общей площади ОРУ напряженность ЭП выше 5 кВ/м присутствует на четверти территории.

Помимо излучений на частоте 50 Гц, на ПС присутствуют излучения высоких частот от высоковольтного оборудования напряжением 110 кВ и выше, которые могут возникать из-за коммутационных процессов, частичных разрядов в изоляции, коронных разрядов.

Спектр ЭМП от каждой единицы оборудования индивидуален и, например для автотрансформаторов 500 кВ, имеют следующий вид (рис. 2).

Экспериментальные исследования спектров вблизи высоковольтного оборудования показывают, что наиболее интенсивные потоки ЭМП наблюдаются в диапазоне от 1 до 150 МГц. В качестве рассматриваемых частот с наиболее интенсивным излучением были выбраны частоты 18 и 118 МГц.

Для высокочастотного диапазона, исходя из СанПиН 1.2.3685-21, допустимые уровни электромагнитных полей для персонала в течение смены не должны превышать 80 В/м для напряженности ЭП 30–300 МГц, 50 А/м – для напряженности магнитного поля 0,03–3 МГц и 25 мкВт/см² – для плотности потока энергии 300 МГц – 300 ГГц.

Наложение ЭМП от расположенных рядом с другими единицами высоковольтного оборудования может привести к существенному возрастанию напряженностей полей.

На рисунке 3 представлены результаты наложения уровней ЭМП от автотрансформаторов 500 кВ для двух частот – 18 и 118 МГц.

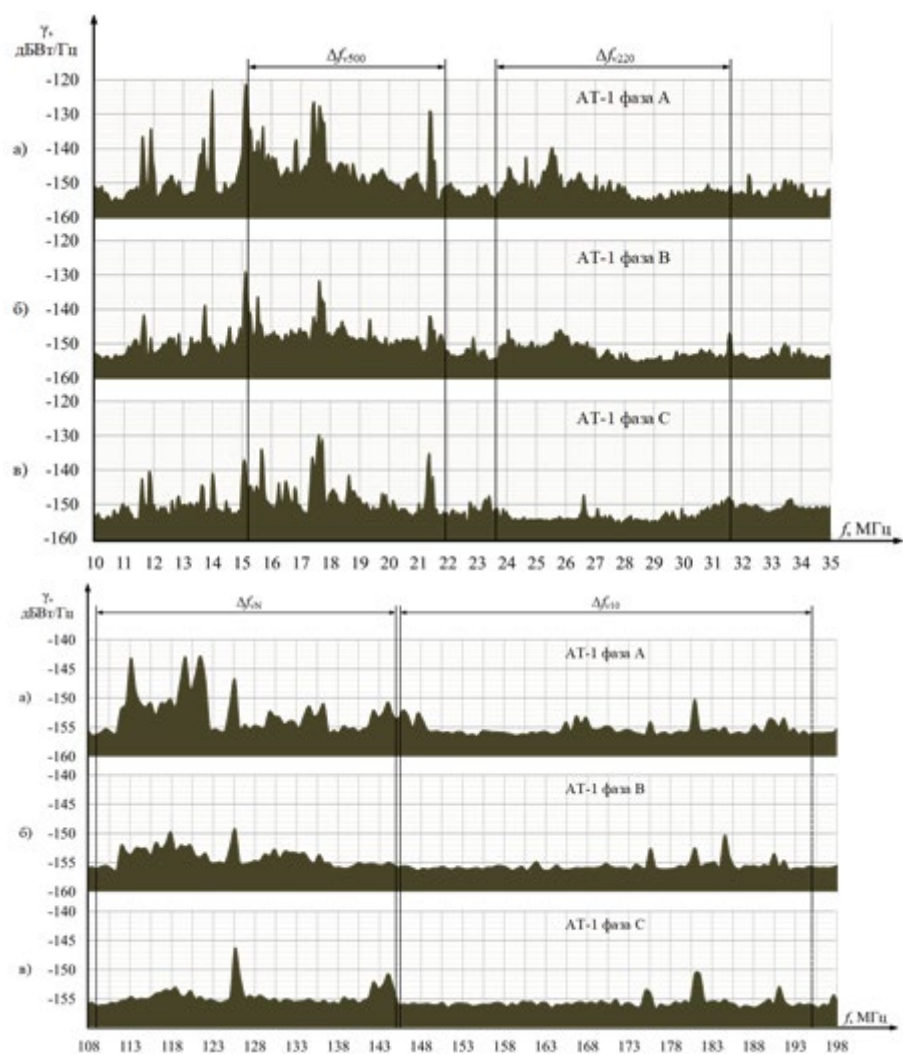


Рисунок 2. – Спектры ЭМП автотрансформаторов 500 кВ

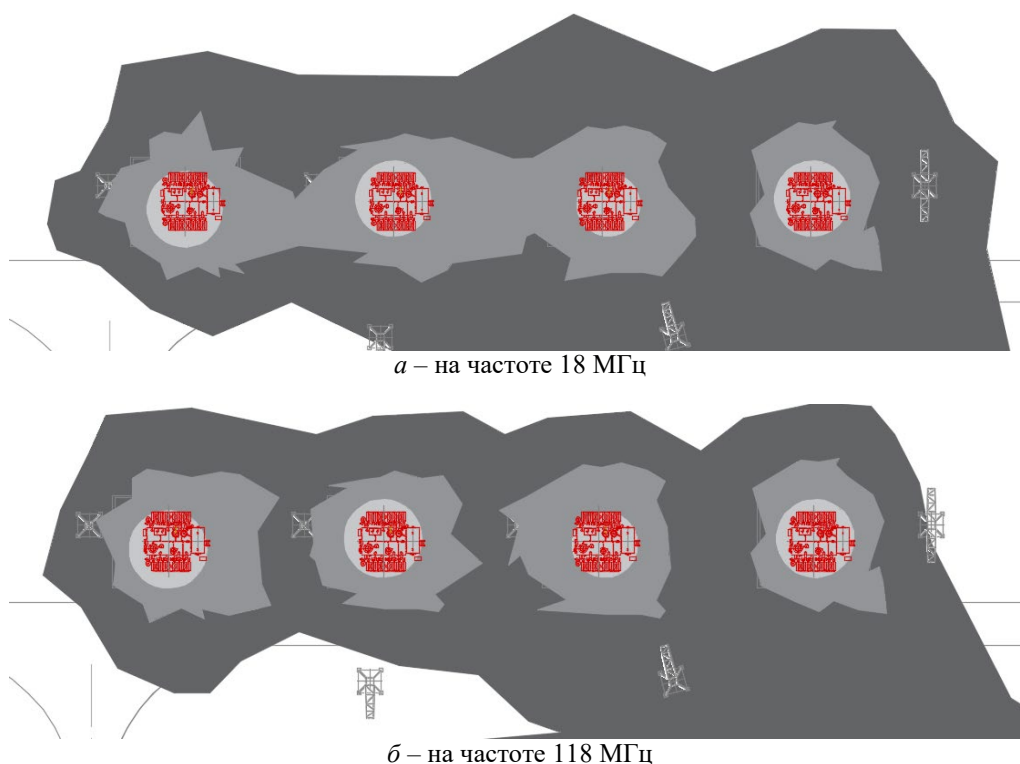


Рисунок 3. – Карта напряженности поля на фрагменте ОРУ 500 кВ

Аналогично измерениям, проведенным при частоте 50 Гц, на подстанциях присутствуют участки, на которых наблюдаются повышенные (по сравнению с общим фоном излучения за пределами подстанции) уровни электромагнитного излучения. На рисунке 3 серым цветом отмечены зоны, в пределах которых данное превышение составляет от 4 до 6 раз. Темным цветом отображены участки с трехкратным превышением.

Для оборудования со сроком эксплуатации, превышающим нормативный, наблюдается повышение уровней ЭМП. Это обусловлено ростом разрядных явлений в изоляции, деградацией экранирующих конструкций, износом компонентов. В таком состоянии, называемом предаварийным, параметры работы находятся в допустимых пределах, но наблюдаются устойчивые отклонения от эксплуатационных и диагностических показателей, что свидетельствует о высокой вероятности перехода в аварийный режим. Старение изоляции и ухудшение характеристик оборудования обусловлены физическими и эксплуатационными факторами [3]. Это создает дополнительные риски для обслуживающего персонала, требует регулярного мониторинга, оценки рабочих мест, а также защиты чувствительных органов организма человека от теплового воздействия.

В качестве примера повышения уровней ЭМП на рисунке 4 представлены спектры автотрансформатора 500 кВ для двух ситуаций:

1. Для нормального режима эксплуатации в исправном состоянии (проведенное измерение от 18.05.2002).
2. При переходе в предаварийное состояние (проведенное измерение от 27.11.2003).

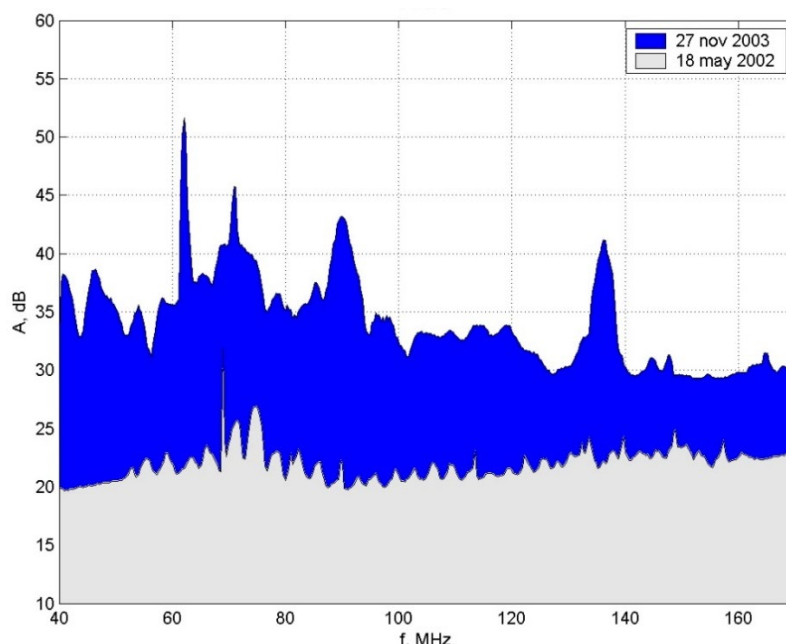


Рисунок 4. – Спектры автотрансформатора 500 кВ при работе в нормальном (серый) и предаварийном (синий) состояниях

Анализ представленных спектров автотрансформатора 500 кВ на рисунке 4 показывает, что при переходе оборудования из нормального режима в предаварийное состояние происходит существенное повышение уровней ЭМП.

В нормальном режиме спектр имеет сглаженный характер с умеренным уровнем амплитуд в диапазоне 20–30 дБ. Локальные пики незначительны и распределены равномерно, что свидетельствует о стабильной работе оборудования.

В предаварийном состоянии происходит общее повышение уровня сигнала в широком диапазоне частот, амплитуда возрастает в среднем на 5–15 дБ, проявляются выраженные пики (60–70 МГц, 130–140 МГц). Такие изменения свидетельствуют о развитии дефектных процессов в оборудовании, прежде всего частичных разрядов и нарушений изоляции, которые формируют короткие импульсы тока и, как следствие, широкополосное электромагнитное излучение. Дополнительно вклад в рост ЭМП вносит ухудшение экранирования и контактных соединений, что приводит к увеличению утечек и паразитных токов.

Влияние ЭМП на человека. В связи с значительными превышениями допустимых уровней напряженности поля возникает непосредственная опасность для персонала, обслуживающего подстанцию.

Воздействие ЭМП на человека в первую очередь сказывается на нервной системе, вызывая такие симптомы, как головные боли и повышенная утомляемость. Помимо этого, длительное негативное воздействие вызывает системную дезорганизацию организма: угнетение иммунитета, эндокринные сбои, нарушения нейрогуморальной регуляции и репродуктивного здоровья. Также клиническая картина дополняется расстройствами сна и дисфункцией желудочно-кишечного тракта. Стоит отметить, что в группе максимального риска находятся лица с кардиологическими заболеваниями.

Биологический эффект ЭМП определяется величиной поглощенной дозы (дозы излучения). Основным механизмом воздействия заключается в трансформации энергии поля в тепловую внутри организма человека. Наибольшую угрозу облучение представляет для органов с ограниченной перфузией (мозг, хрусталик глаза, почки, желудок). Превышение предельно допустимых уровней ЭМП промышленных частот на подстанции влечет патологические изменения в составе крови и деградацию функций иммунной и пищеварительной систем.

Использование средств индивидуальной защиты (экранирующих комплектов) является обязательным при работе в зонах, где напряженность электромагнитного поля превышает значение 25 кВ/м, а также при выполнении длительных операций в условиях электромагнитного воздействия.

Нормативный порог тока, возникающего при контакте человека с токоведущими частями в электроустановках сверхвысокого напряжения, установлен на уровне 50–60 мкА. Данная величина выбрана исходя из критерия электробезопасности, т.к. при таких значениях установившийся ток разряда, вызванный разностью потенциалов между человеком и металлоконструкцией, не вызывает болевых ощущений [4].

Заключение

Для защиты эксплуатационного персонала на подстанциях необходима разработка мер по защите от электромагнитного влияния, зависящая от расположения высоковольтного оборудования на энергетическом объекте. Решение данного вопроса напрямую связано с определением направлений, в которых наиболее вероятно распространение мощных ЭМИ, а также должно учитывать взаимные наложения полей от воздействия различных источников. Также необходимо учитывать состояние высоковольтного оборудования, т.к. при превышении нормативного срока службы увеличиваются уровни ЭМП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоренко, А.С. К вопросу анализа электромагнитной экологии на объекте электроэнергетики / А.С. Сидоренко, Н.В. Силин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2024. – № 3 (93). – С. 40–47. – DOI: 10.17277/voprosy.2024.03.pp.040-047. – EDN: ZYEHCM.
2. Сидоренко, А.С. Система экологического мониторинга электромагнитной обстановки на электрической подстанции / А.С. Сидоренко, Н.В. Силин // Наука и изобретения для жизни: материалы II Всероссийского фестиваля, Владивосток, 24–26 окт. 2024 г. / Дальневосточный федеральный университет, Всероссийское общество изобретателей и рационализаторов. – Владивосток: ДВФУ, ВОИР, 2024. – 459 с.
3. Липкин, Б.Ю. Надежность и диагностика электрооборудования / Б.Ю. Липкин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 304 с.
4. Семина, И.А. Влияние электромагнитных полей на окружающую среду и организм человека / И.А. Семина, В.П. Сержанский, М.А. Басмановский // Научный форум: Технические и физико-математические науки: сб. статей по материалам X Междунар. науч.-практ. конф. – М.: Изд. «МЦНО», 2017. – № 9 (10). – С. 156–162. – EDN: YQQCEQ.

**К вопросу экологической безопасности на электрических подстанциях
напряжением 110 кВ и выше**

**On the issue of environmental safety at electrical substations
with a voltage of 110 kV and above**

Сидоренко Андрей Сергеевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», департамент энергетических систем, аспирант

Адрес: о. Русский, п. Аякс, 10,
690922, г. Владивосток,
Приморский край, Россия
Email: sidorenko.aser@dvfu.ru

Andrey S. Sidorenko

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Far Eastern Federal University», Department of Energy Systems, postgraduate student

Address: Russky Island, settlement Ayaks, 10,
690922, Vladivostok,
Primorsky Krai, Russia
Email: sidorenko.aser@dvfu.ru

Силин Николай Витальевич

доктор технических наук,
доцент

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», департамент энергетических систем, доцент

Адрес: о. Русский, п. Аякс, 10,
690922, г. Владивосток,
Приморский край, Россия
Email: silin22@mail.ru
SPIN-код: 8944-6769

Nikolay V. Silin

Grand PhD in Technical Sciences,
Associate Professor

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Far Eastern Federal University», Department of Energy Systems, Associate Professor

Address: Russky Island, settlement Ayaks, 10,
690922, Vladivostok,
Primorsky Krai, Russia
Email: silin22@mail.ru
ORCID: 0000-0003-0076-8880

ON THE ISSUE OF ENVIRONMENTAL SAFETY AT ELECTRICAL SUBSTATIONS WITH A VOLTAGE OF 110 KV AND ABOVE

Sidorenko A.S., Silin N.V.

Purpose. Analysis of information indicating the need to develop a program aimed at improving the system of industrial environmental control and the application of preventive measures to reduce the negative impact of electromagnetic field intensity levels near high-voltage equipment on the territory of electrical substations with a voltage of 110 kV and higher.

Methods. Experimental investigation of the spatial distribution of the electromagnetic field with the formation of intensity maps for industrial frequency (50 Hz) and high-frequency fields.

Findings. It is shown that the electromagnetic environment at such facilities is characterized by high values of electric and magnetic field strengths in a wide frequency range. Information is provided on the sources of electromagnetic fields at electrical substations, as well as maps of the distribution of field levels both at low frequency and in the high frequency range. Information on the spectral composition of the electromagnetic radiation emitted by 500 kV power autotransformers is presented. It is noted that the most powerful radiation is observed in the range from 1 to 150 MHz.

The distribution maps of increased field strength levels at substations for various frequencies are given as examples. The most dangerous areas for maintenance personnel and the factors influencing the increase in field intensity have been identified. The results of experimental studies are presented, showing that for equipment with a service life exceeding the standard, there is an increase in the levels of electromagnetic fields. It is concluded that in order to protect personnel at electric power facilities, it is necessary to develop measures to protect against electromagnetic interference, depending on the location of high-voltage equipment at the power facility.

Application field of research. These studies are focused at researching the problem of improving environmental control to prevent excessive exposure to the human body. The obtained results can be used to develop and improve the methods of environmental control at high-voltage substations of 110 kV and higher.

Keywords: environmental safety, high-voltage equipment, high-frequency radiation, field strength, maintenance personnel.

(The date of submitting: April 8, 2026)

REFERENCES

1. Sidorenko A.S., Silin N.V. K voprosu analiza elektromagnitnoy ekologii na ob"ekte elektroenergetiki [The analysis of electromagnetic ecology at an electric power facility]. *Voprosy sovremennoy nauki I praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo*, 2024. No. 3 (93). Pp. 40–47. (rus). DOI: 10.17277/voprosy. 2024.03.pp.040-047. EDN: ZYEHCM.
2. Sidorenko A.S., Silin N.V. Sistema ekologicheskogo monitoringa elektromagnitnoy obstanovki na elektricheskoy podstantsii [The system of environmental monitoring of the electromagnetic situation at an electric substation]. *Proc. of II All-Russian Festival «Nauka i izobreteniya dlya zhizni», Vladivostok, October 24–26, 2024*. Far Eastern Federal University, All-Russian Society of Inventors and Innovators. Vladivostok, 2024, 459 p. (rus)
3. Lipkin B.Yu. Nadezhnost' i diagnostika elektrooborudovaniya [Reliability and diagnostics of electrical equipment]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 304 p. (rus)
4. Semina I.A., Serzhanskiy V.P., Basmanovskiy M.A. Vliyanie elektromagnitnykh poley na okruzhayushchuyu sredu i organizm cheloveka [Influence of electromagnetic fields on the environment and human body]. *Proc. of X Intern. scientific-practical conf. «Nauchnyy forum: Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki»*. Moscow, 2017. No. 9 (10). Pp. 156–162. (rus). EDN: YQQCEQ.

Copyright © 2026 Sidorenko A.S., Silin N.V.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНОЙ ЗАЩИТЫ ОРГАНИЗАЦИЙ, ПОДЛЕЖАЩИХ ПЕРЕВОДУ НА РАБОТУ В УСЛОВИЯХ ВОЕННОГО ВРЕМЕНИ

Булва А.Д.

Цель. Совершенствование научно-методического аппарата поддержки принятия технических решений в области гражданской обороны (ГО), которые направлены на повышение устойчивости функционирования организаций при ведении военных действий или вследствие этих действий, а также при чрезвычайных ситуациях (ЧС).

Методы. В статье использованы общенаучные методы исследования: индукции и дедукции, анализа и синтеза, сравнения и обобщения, аналогии, применены элементы нормативно-правового и системного анализа, а также метод анализа иерархий.

Результаты. Аккумулированы и систематизированы наиболее значимые результаты, ранее полученные автором. Предпринята попытка сформировать целостное представление о теоретико-методических основах комплексной защиты организаций, подлежащих переводу на работу в условиях военного времени.

Область применения исследований. Результаты исследования могут быть использованы при разработке и переработке нормативных правовых актов в области ГО, применяться органами управления ГО на различных уровнях для оценки текущего уровня комплексной защиты организаций, формирования приоритетов по направлениям повышения устойчивости функционирования отраслей экономики, обоснования организационных и инженерно-технических мероприятий ГО, мониторинга их эффективности и корректировки.

Ключевые слова: военная безопасность, гражданская оборона, законы войны, комплексная защита, методика ранжирования, организация, повышение устойчивости функционирования, поддержка принятия решений, теоретико-методические основы.

(Поступила в редакцию 4 марта 2026 г.)

Введение

В соответствии с национальным законодательством на организации, подлежащие переводу на работу в условиях военного времени, возлагается широкий спектр задач, направленных на обеспечение боевых (специальных и др.) действий оперативного и оперативно-тактического масштаба, включая реализацию договорных обязательств по выполнению государственного оборонного заказа, обеспечение Вооруженных Сил, других войск и воинских формирований, обязанности в области мобилизационной подготовки и мобилизации, мероприятия территориальной и гражданской обороны. Учитывая данное обстоятельство, в нормативных правовых актах, регулирующих различные аспекты национальной безопасности, предусматривается требование к повышению устойчивости функционирования организаций.

Следует отметить, что развернутая в 70-е гг. XX в. широкомасштабная научно-исследовательская работа по изучению устойчивости функционирования организаций и отраслей экономики в условиях военного времени в постсоветский период своего продолжения практически не находит. В то же время условия и факторы, предопределявшие исследования по повышению устойчивости функционирования организаций, существенно изменились в XXI в. Поэтому полученные ранее результаты, в частности принципы и содержание защитных мероприятий, включая инженерно-технические мероприятия ГО (ИТМ ГО), порядок их дифференцирования, условия разработки, систему управления защитными мероприятиями, сегодня требуют пересмотра и научного обоснования.

Основная часть

Учитывая указанные обстоятельства, целью данного исследования является совершенствование научно-методического аппарата поддержки принятия технических решений в области ГО, которые направлены на повышение устойчивости функционирования (ПУФ) организаций при ведении военных действий или вследствие этих действий, а также при ЧС. Следует отметить, что термин «ПУФ организаций при военных конфликтах, а также при ЧС»

может применяться в различных аспектах оборонных мероприятий, что иногда приводит к неопределенности в части ответственности за их выполнение либо невыполнение. Поэтому в интересах проводимого исследования, ограниченного исключительно задачами и мероприятиями гражданской защиты, введено понятие «комплексная защита организаций, подлежащих переводу на работу в условиях военного времени» (комплексная защита). При этом под комплексной защитой понимается совокупность взаимосвязанных по содержанию, месту, времени и ресурсам мероприятий, направленных на ПУФ организаций, подлежащих переводу на работу в условиях военного времени и обеспечивающих предупреждение и ликвидацию ЧС; снижение вероятности применения обычных средств поражения, диверсий; снижение риска гибели и травматизма людей, размера материального ущерба от применения средств поражения [1].

Для достижения цели исследования были определены следующие задачи:

- проанализировать условия и факторы, влияющие на комплексную защиту;
- проанализировать результаты исследований, направленных на разработку теоретико-методических основ комплексной защиты;
- обосновать роль и место комплексной защиты в системе обеспечения национальной безопасности государства;
- предложить и обосновать принципы комплексной защиты, принципы ИТМ ГО и систему мероприятий комплексной защиты;
- разработать рекомендации органам государственного управления, организациям по совершенствованию механизмов комплексной защиты и применению предложенного научно-методического аппарата.

Научной задачей является разработка методики ранжирования организаций в интересах ГО.

Для достижения сформулированной цели и задач разработана общая концепция исследования, включающая девять этапов (рис. 1).



Рисунок 1. – Общая концепция исследования

Анализ условий и факторов, влияющих на комплексную защиту организаций, позволил заключить, что основными условиями являются:

- обязанность организаций обеспечивать устойчивое функционирование подчиненных объектов в военное время и при возникновении ЧС;
- принципы защиты населения и территорий от ЧС, установленные законодательством¹;
- принципы снижения риска возникновения ЧС [2];

¹ О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: Закон Респ. Беларусь, 5 мая 1998 г., № 141-3 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=H19800141> (дата обращения: 02.03.2026).

- недостаточно развитые техническая нормативная правовая база и методический аппарат по организации и планированию мероприятий комплексной защиты [1];
- обеспечение комплексной защиты исключительно за счет прибыли от основного вида деятельности организаций;
- частые и интенсивные природные и техногенные ЧС [2];
- угрозы невоенного характера;
- использование высокоточного оружия (ВТО);
- массированное применение сил и средств авиации, включая беспилотные летательные аппараты (БПЛА).

Основные факторы комплексной защиты: удаленность организаций от городов и других целей, по которым вероятно нанесение ударов средствами ВТО, БПЛА; время и погодные условия; характеристики средств поражения; количество и перечень критических элементов в организации; подготовленность работников и уполномоченных должностных лиц к действиям в условиях военной угрозы и угроз невоенного характера; существующая техническая защищенность объектов организаций и оснащенность населения средствами индивидуальной и коллективной защиты; подготовленность и оснащенность гражданских формирований ГО и др.

Под теоретико-методическими основами комплексной защиты в работе понимаются соответствующий научно-методический аппарат и научно-теоретические основы. Научно-методический аппарат включает научные категории, законы, закономерности, принципы и критерии, методы и методики и др. Научно-теоретические основы определяют необходимость в мероприятиях комплексной защиты.

Обобщенная структура теоретико-методических основ комплексной защиты представлена на рисунке 2.

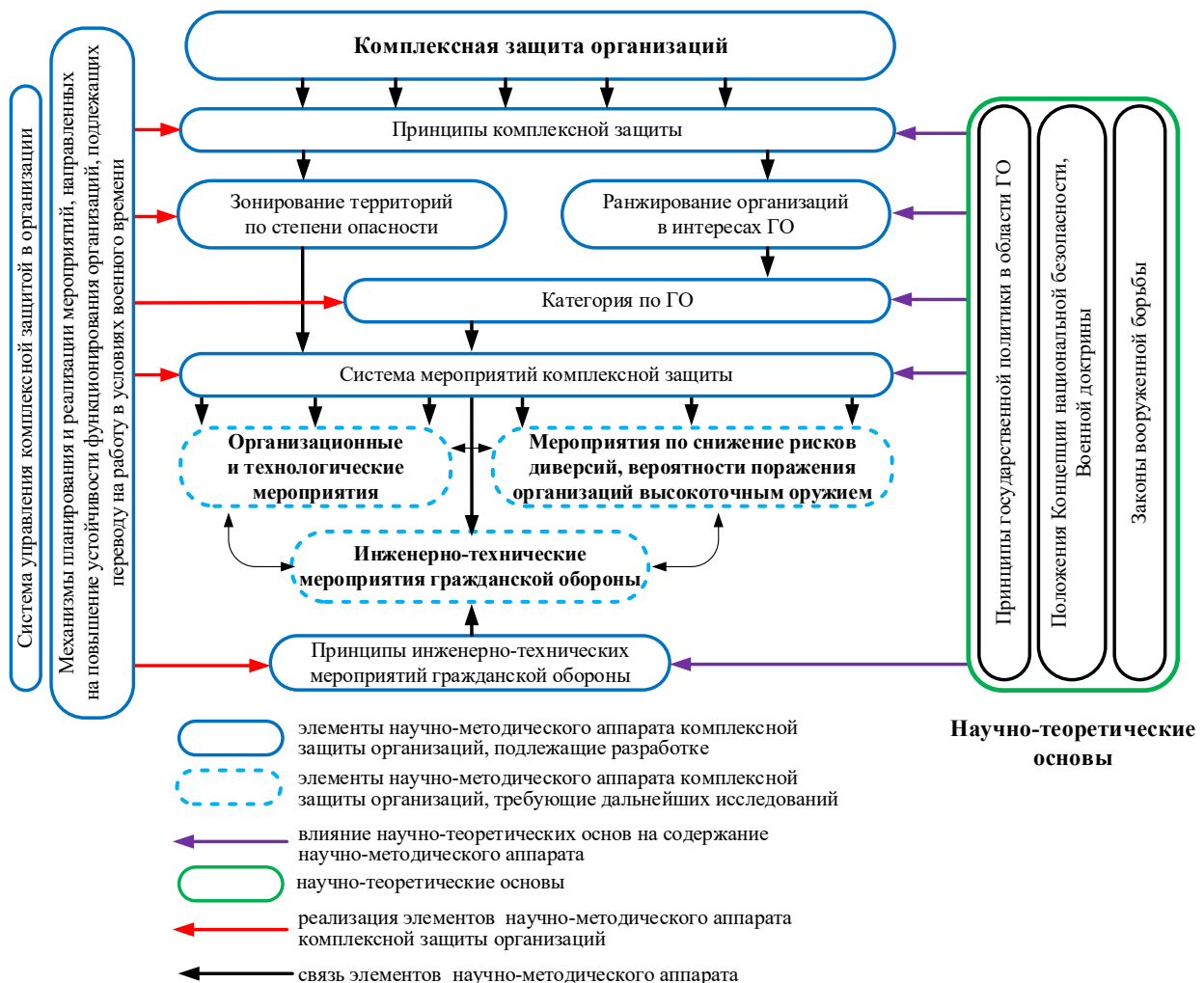


Рисунок 2. – Обобщенная структура теоретико-методических основ комплексной защиты организаций, подлежащих переводу на работу в условиях военного времени

На втором этапе исследования разработана общая архитектура комплексной защиты, включая ее принципиальную организацию, элементы, взаимосвязь элементов друг с другом, принципы и мероприятия.

К принципам комплексной защиты относятся [1]: заблаговременность проведения мероприятий; планирование и осуществление мероприятий с учетом экономических, природных и иных характеристик, степени реальной опасности возникновения ЧС, диверсий, применения средств поражения; необходимая достаточность и максимально возможное использование сил, средств и ресурсов при определении объема и содержания защитных мероприятий; планирование и реализация мероприятий ГО на всех стадиях жизненного цикла организации. Кроме того, для комплексной защиты определена и исследована ее научно-теоретическая основа, включающая принципы государственной политики в области ГО, положения Концепции национальной безопасности и Военной доктрины, законы вооруженной борьбы [3–6].

В работах [4; 5] показано, что комплексная защита, являясь составной частью мероприятий ГО, организуется в целях повышения уровня обороноспособности государства, повышения эффективности действий Вооруженных Сил и других войск. Кроме того, комплексная защита выступает частью комплексности экономических мер, направленных на обеспечение военной безопасности и вооруженной защиты государства, обеспечивает экономический потенциал страны, который позволяет в достаточном объеме удовлетворять потребности военной организации государства и нужды населения. Показано, что мероприятия по защите населения, территорий и организаций от ЧС в военное время должны рассматриваться в контексте целей стратегического и оперативно-стратегического уровней военного управления с дальнейшей детализацией задач и мероприятий на оперативно-тактическом и тактическом уровнях. В контексте обеспечения военной безопасности комплексная защита выступает и как часть мер стратегического сдерживания, и как часть оборонных мероприятий. В целом результаты исследований использованы² при подготовке Военной доктрины Республики Беларусь, утвержденной решением Всебелорусского народного собрания от 25 апреля 2024 г. № 6.

Исходя из предположения того, что законы войны и вооруженной борьбы являются общими для всех разделов военной науки, включая гражданскую оборону, был проведен анализ основных направлений деятельности, осуществляемых в период подготовки государства к ведению ГО, через призму данных законов. Выявлено наличие зависимости мероприятий комплексной защиты от законов вооруженной борьбы, включая законы противоборства деструктивных и конструктивных усилий; соответствия военных целей имеющимся силам и средствам; неравномерности распределения сил и средств; единства информации и дезинформации; внезапности и скрытности боевых действий и др. [6].

На третьем этапе исследования выполнена систематизация мероприятий комплексной защиты (рис. 3) и предложено 7 принципов ИТМ ГО, нашедших отражение в нормах проектирования ИТМ ГО [1; 7]:

- заблаговременное проведение ИТМ ГО;
- планирование и разработка ИТМ ГО с учетом характера современных военных конфликтов;
- дифференцированное осуществление ИТМ ГО в зависимости от уровня значимости организаций по ГО, а также с учетом границ зон повышенной опасности при поражении организаций ВТО;
- реконструкция и техническое перевооружение организаций без увеличения общего количества опасных веществ и материалов;
- ограничение строительства в зонах повышенной опасности; ограничение плотности застройки и населения, высоты зданий и сооружений в городской и промышленной застройке;
- приоритет интегрированным системам безопасности; развитие ландшафтно-рекреационных территорий в городах;
- кольцевание линейных сооружений объектов инженерной инфраструктуры и др.

² Справка «О практическом использовании (внедрении) результатов диссертационного исследования Булвы Александра Дмитриевича в сфере обеспечения национальной безопасности» от 28.03.2024 № 21-05/639, подписанная заместителем Государственного секретаря Совета Безопасности Республики Беларусь А.А. Рахмановым.

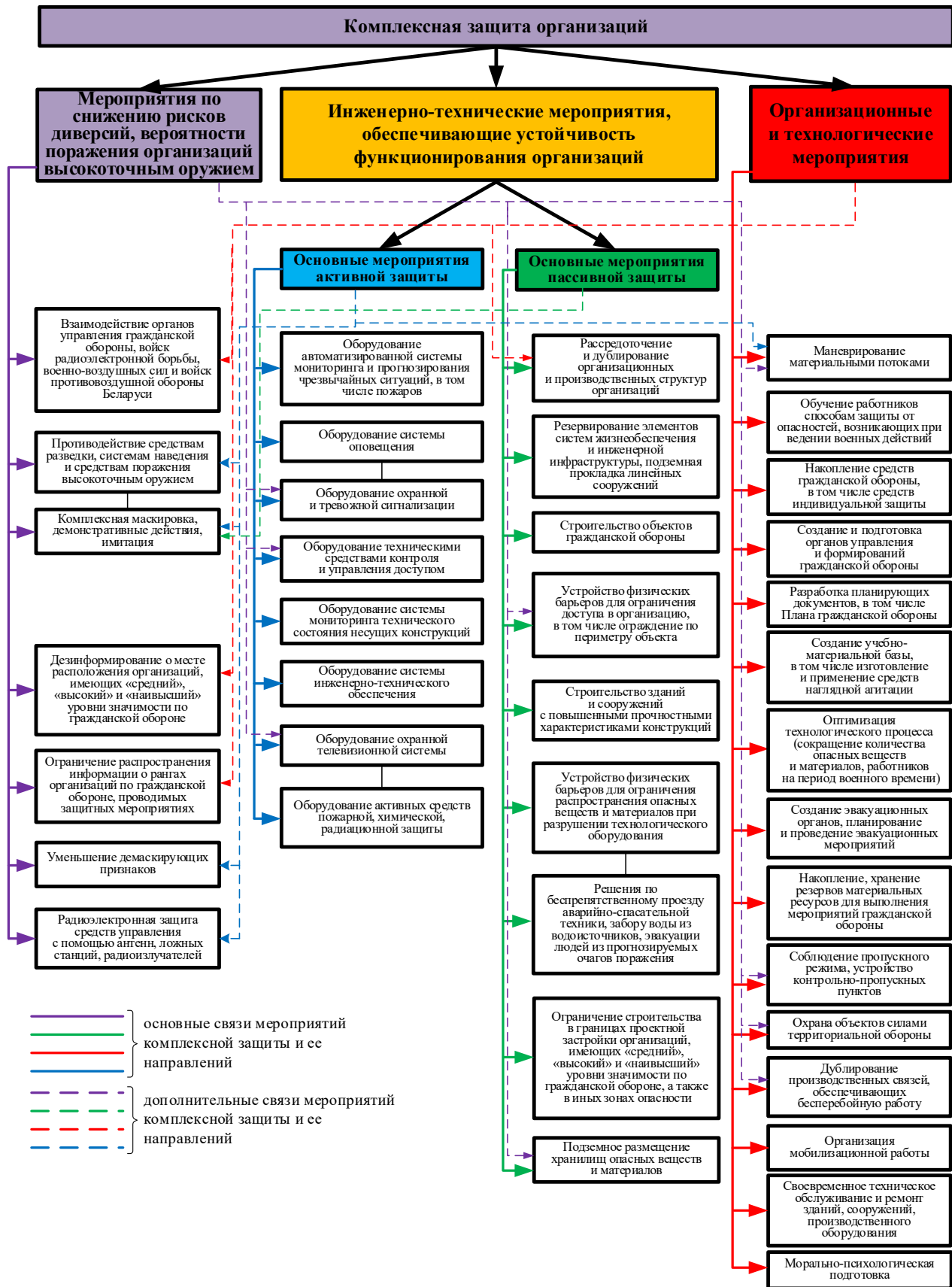


Рисунок 3. – Система основных мероприятий, обеспечивающих комплексную защиту организаций, подлежащих переводу на работу в условиях военного времени [1]

В работах [1; 7–9] показано, что важнейшим принципом комплексной защиты является дифференцированное осуществление ИТМ ГО в зависимости от уровня значимости ор-

ганизаций по ГО, а также с учетом границ зон повышенной опасности при поражении организаций ВТО. Однако для этого необходим соответствующий научно-методический аппарат, который позволил бы осуществлять ранжирование организаций по соответствующему уровню значимости.

В статье [7] проанализирована эволюция концептуальных взглядов на зонирование территорий по степени опасности, а также сформулированы предложения по совершенствованию нормативных правовых актов, включая следующие положения:

1) степень поражения организаций, отнесенных к категориям по ГО, принимается «сильной»;

2) при применении систем ВТО границы зон разрушений не выходят за пределы санитарно-защитной зоны;

3) в организациях, отнесенных к категориям по ГО, при расчете границ вторичных зон повышенной опасности сценарий ЧС должен учитывать разрушение всего технологического оборудования и установок, содержащих опасные вещества и материалы. Весь энергозапас опасных веществ и материалов образует вторичные поражающие факторы;

4) на потенциально опасных объектах, не отнесенных к категории по ГО, границы зон опасности определяются, исходя из аварийного сценария, в котором участвует максимальная единичная емкость, содержащая опасные вещества и материалы;

Следует отметить, что предложения, изложенные в статье [7], нашли отражение, например, в требованиях СП 2.02.03-2024³.

Последующие три этапа исследования были нацелены на совершенствование научно-методического аппарата поддержки принятия технических решений в области ГО.

В частности, в ходе четвертого этапа обосновывался метод решения научной задачи – разработка методики ранжирования организаций в интересах ГО. Показано, что наиболее целесообразным методом ее решения является метод анализа иерархий (МАИ), предложенный Т. Саати [10; 11].

На пятом этапе исследования разработана методика ранжирования организаций в интересах ГО, основанная как на классической (от 0 до 9) [10; 11], так и на упрощенной шкалах оценок экспертов (от 0 до 2) [12]. Качественная модель ранжирования организаций в интересах ГО представлена на рисунке 4 в виде иерархической структуры.

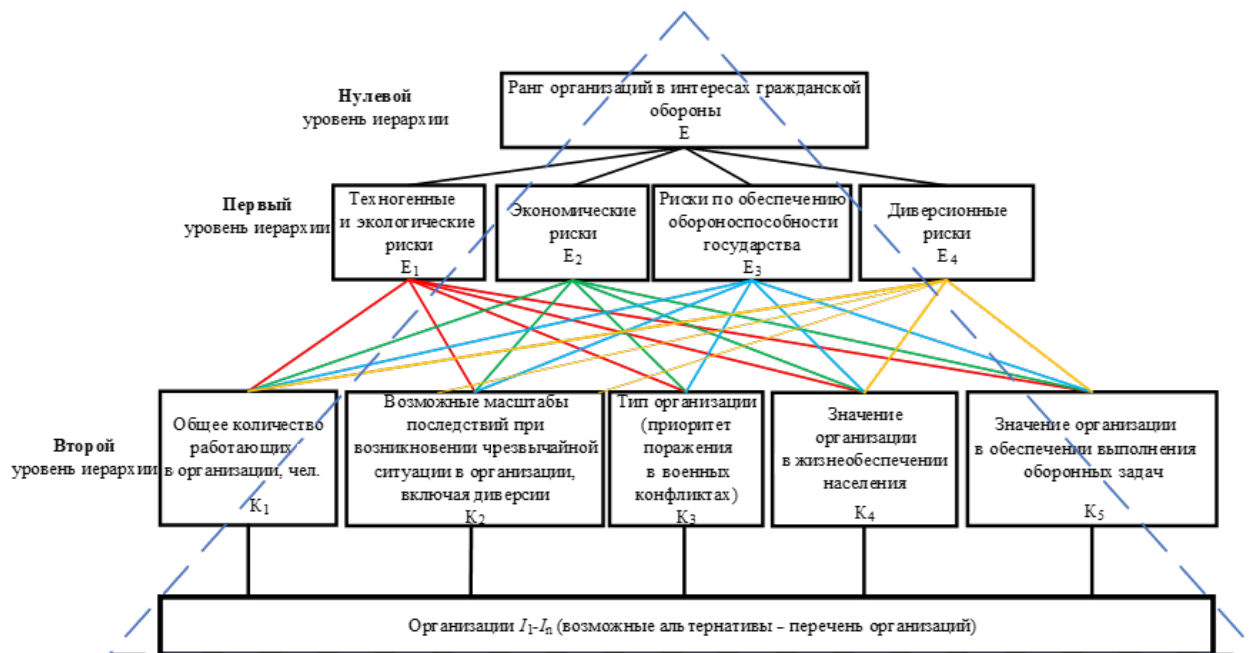


Рисунок 4. – Иерархическая структура ранжирования организаций в интересах ГО [10]

Для оценки критериев сформирована группа из 10 специалистов, имеющих практический опыт работы в сфере ГО.

³ Приспособление объектов коммунально-бытового назначения для санитарной обработки людей, специальной обработки одежды и подвижного состава автотранспорта: СП 2.02.03-2024. – Введ. 16.09.2024. – Мн.: Минстройархитектуры, 2024. – 46 с.

Для каждого уровня иерархии составлены матрицы парных сравнений, в которые вносились оценки, выставяемые экспертами. Кроме того, для каждой характеристики $K_1, \dots, K_5$ разработаны вспомогательные диапазоны значений, а группой экспертов определены приоритеты этих диапазонов относительно друг друга (для $K_1 - \Gamma_{11}, \dots, \Gamma_{17}$; для $K_2 - \Gamma_{21}, \dots, \Gamma_{23}$ (по критериям $D_1 \dots D_5$); для $K_3 - \Gamma_{31}, \dots, \Gamma_{314}$; для $K_4 - \Gamma_{41-1}, \dots, \Gamma_{43-3}$; для $K_5 - \Gamma_{51}, \dots, \Gamma_{56}$).

После укрупнения и преобразования иерархической структуры число рассматриваемых альтернатив $I_1, \dots, I_n$ (число возможных комбинаций в структуре общей иерархии) составило 79 380. Ввиду их значительного количества и исключения необходимости в ранжировании всех возможных комбинаций предложен метод нахождения абсолютного и относительного положения компоненты итогового вектора приоритета исследуемой альтернативы (организации) по отношению к двум гипотетическим, расположенным в крайних точках шкалы возможных альтернатив, т.е. гипотетические альтернативы максимально отличаются по уровню значимости друг относительно друга. Метод можно описать следующим образом. Пусть первая организация имеет максимальные (неблагоприятные) значения характеристик (Γ_{11} ; Γ_{21} (по критерию D_1); Γ_{31} ; Γ_{41-1} ; Γ_{51}), а вторая гипотетическая организация имеет наименьшие (наиболее благоприятные) значения характеристик (Γ_{17} ; Γ_{23} (по критерию D_5); Γ_{314} ; Γ_{43-3} ; Γ_{56}). Реальная g -я организация имеет фактические значения характеристик ($\Gamma_1(g)$; $\Gamma_2(g)$; $\Gamma_3(g)$; $\Gamma_4(g)$; $\Gamma_5(g)$). Сравнивая три организации между собой и определяя итоговые значения компонент собственного вектора приоритета, определяется относительное положение компоненты вектора приоритета реальной организации по отношению к компонентам гипотетических объектов.

Для получения значений компонент итоговых векторов приоритета $x_r(g)$, $x_r^{\min}(g)$, $x_r^{\max}(g)$ относительно цели E используются компоненты $x_{\Gamma_1}, x_{\Gamma_2}, \dots, x_{\Gamma_5}$, определяемые как для организации g на основании реальных характеристик, так и для гипотетических объектов по следующей формуле [10]:

$$x_r(g) = \sum_{i=1}^5 \left(x_{\Gamma_i} \sum_{j=1}^4 x_{K_i(E_j)} x_{E_j} \right), \quad (1)$$

где $x_{K_i(E_j)}$ — компонента вектора приоритета характеристики K_i относительно критерия E_j ;

x_{E_j} — компонента вектора приоритета критерия E_j относительно цели E .

При расчете $x_r^{\min}(g)$, $x_r^{\max}(g)$ в формуле (1) используются компоненты $x_{\Gamma_1}, x_{\Gamma_2}, \dots, x_{\Gamma_5}$, соответствующие гипотетическим объектам с минимальными и максимальными характеристиками соответственно.

Относительное значение компоненты итогового вектора приоритета $r_{\text{отн}}(g)$ определяется по формуле [10]:

$$r_{\text{отн}}(g) = \frac{x_r(g) - x_r^{\min}(g)}{x_r^{\max}(g) - x_r^{\min}(g)} \cdot 100 \%. \quad (2)$$

По итогам расчета относительного значения компоненты итогового вектора приоритета организации $r_{\text{отн}}(g)$ определяется ее уровень значимости, который служит альтернативой либо дополнительным инструментом отнесения организаций к категориям по ГО. Диапазоны относительных значений ранга разработаны для двух шкал (табл. 1), а расчет автоматизирован с использованием специально разработанного программно-информационного продукта поддержки принятия решения в области ГО [10–12].

Таблица 1. – Таблица критериев для определения уровня значимости организации

$r_{\text{отн}}(g)$ по классической шкале	$r_{\text{отн}}(g)$ по упрощенной шкале	Уровень значимости
менее 10 %	менее 15 %	низкий
от 10 до 20 %	от 15 до 25 %	средний
от 20 до 30 %	от 25 до 40 %	высокий
от 30 %	от 40 %	наивысший

В целях практического применения должностными лицами органов управления ГО методики ранжирования организаций в интересах ГО формула (1) после подстановки известных компонент, полученных с использованием упрощенной шкалы, приведена к следующему виду:

$$x_r(g) = 0,065x_{1g} + 0,2x_{2g} + 0,245x_{3g} + 0,23x_{4g} + 0,26x_{5g}, \quad (3)$$

где $x_{1g}, x_{2g}, \dots, x_{5g}$ – взвешивающие коэффициенты, учитывающие факторы и условия эксплуатации g -й организации, определяемые в соответствии с таблицами 4–8 работы [12].

Для расчета значения компоненты итогового вектора приоритета для гипотетической организации с минимальными значениями факторов $x_r^{\min}(g)$ применяется формула:

$$x_r^{\min}(g) = 0,0046(1 - x_{1g}) + 0,0067(1 - x_{2g}) + 0,0088(1 - x_{3g}) + 0,0088(1 - x_{4g}) + 0,0217(1 - x_{5g}). \quad (4)$$

Следует отметить, что выражения для вычисления величин $x_r(g)$ и $x_r^{\min}(g)$ впервые получены в работе [12], однако вследствие выявленных неточностей были скорректированы и уточнены формулами (3) и (4) соответственно.

Для расчета значения компоненты итогового вектора приоритета для гипотетической организации с максимальными значениями факторов $x_r^{\max}(g)$ применяется следующая формула [12]:

$$x_r^{\max}(g) = 1 - x_r^{\min}(g) - x_r(g). \quad (5)$$

Оценка корректности методик ранжирования организаций в интересах ГО выполнена с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена r : для экспертных оценок и модели расчета с использованием классического МАИ она составила $r = 0,381$, для экспертных оценок и модели расчета с использованием упрощенного МАИ – $r = 0,404$. Качественная характеристика тесноты связи коэффициента ранговой корреляции оценивалась по шкале Чеддока, которая свидетельствует о существовании значимой связи между оценками экспертов и моделями расчета. Оценка корректности была проведена на основе обработки данных о 111 организациях, предложенных для анализа территориальными органами управления ГО.

После оценки корректности методик на основании модели расчета с использованием упрощенного МАИ разработан программно-информационный продукт поддержки принятия решения в области ГО⁴, основная экранная форма которого представлена на рисунке 5.

Определение уровня значимости организаций в интересах ГО (Version 1.0)

Определение уровня значимости организаций в интересах ГО | Перечень мероприятий ГО | Описание программы | Краткая информация об авторе и правообладателе

1. Общее количество работающих в организации (по условиям мирного времени), включая обучающихся в учреждениях образования:
Менее 50 чел.

2. Категория опасности организации и границы зоны действия поражающих факторов в случае разрушения ее критических элементов:
Категория опасности:
5 - Иные объекты
Зона действия поражающих факторов:
3 - Не выходит за территорию организации

3. Тип организации:
5 - Насосная станция продуктопровода

4. Роль организации в жизнеобеспечении населения:
9 - Иная сфера деятельности

5. Роль организации в области мобилизационной подготовки и мобилизации:
1 - Выполнение государственного оборонного заказа

Выполнить расчет

Итоговое значение $x_r(g)$: 0.242657
Минимальное значение $x_r^{\min}$: 0.035816
Максимальное значение $x_r^{\max}$: 0.721527
Относительный ранг ($r_{\text{отн}}$): 30.16%

УРОВЕНЬ ЗНАЧИМОСТИ: ВЫСОКИЙ

© Бульва А.Д.
© УГЗ МЧС, 2026

Рисунок 5. – Основная экранная форма программы
«Расчет уровня значимости организаций в интересах гражданской обороны»

⁴ Свидетельство о регистрации компьютерной программы ВУ 2012. Расчет уровня значимости организаций в интересах гражданской обороны: заявлено 09.03.2026; опублик. 03.04.2026 / Бульва А.Д.; заявитель Университет гражданской защиты. – URL: <https://search.ncip.by/depon/index.php?pref=1&lng=ru&page=3&target=2555> (дата обращения: 20.04.2026).

Представленная программа предназначена для автоматизации процесса определения уровня значимости организаций в интересах ГО.

Программа предоставляет удобный графический интерфейс для ввода информации об организации по пяти ключевым критериям:

- общее количество работников;
- категория опасности объекта и возможная зона поражения;
- тип организации;
- роль организации в жизнеобеспечении населения;
- роль организации в области мобилизационной подготовки и мобилизации.

На основе введенных данных программа автоматически выполняет расчет относительного ранга организации в процентах и определяет ее уровень значимости («низкий», «средний», «высокий» или «наивысший»).

Результаты расчета отображаются в текстовом виде, содержащем итоговое значение, минимальное и максимальное значения, относительный ранг в процентах и уровень значимости организации.

В зависимости от уровня значимости во вкладке «Перечень мероприятий ГО» формируется соответствующий рекомендуемый для выполнения перечень мероприятий ГО. Кроме того, программа содержит вкладку с подробным описанием назначения программы, порядка работы и математической модели, используемой для расчета уровня значимости.

На последующих этапах исследования разрабатывались практические рекомендации по совершенствованию механизмов комплексной защиты и применению усовершенствованного научно-методического аппарата.

На седьмом этапе разработаны рекомендации по совершенствованию механизмов комплексной защиты и применению предложенного научно-методического аппарата при эксплуатации организаций. Всего определено 36 основных мероприятий, объем и содержание которых установлены в зависимости от уровня значимости организаций. К непосредственному дифференцированию мероприятий привлекались специалисты, профессионально занимающиеся вопросами ГО. Для оценки соответствия эксплуатируемых организаций комплексу защитных мер предложен количественный показатель Π – степень соответствия комплексной защите, определяемый по формуле:

$$\Pi = \frac{1}{5f} \sum_{i=1}^f n_i, \quad (6)$$

где f – количество выставленных оценок (количество оцениваемых мероприятий);

n_i – оценка f -го мероприятия.

Комплексная защита считается «не обеспеченной», если $\Pi < 0,5$; «ограниченно обеспеченной», если $0,5 \leq \Pi < 0,75$; «обеспеченной», если $\Pi \geq 0,75$.

Данные рекомендации использовались при подготовке проекта постановления Совета Министров Республики Беларусь «Об отнесении организаций к категориям по гражданской обороне»⁵.

С учетом предложенных принципов комплексной защиты и принципов ИТМ ГО сформулированы рекомендации и предложения по совершенствованию механизмов комплексной защиты и применению предложенного научно-методического аппарата при подготовке разрешительной и проектной документации на строительство (работы [13–16]). Кроме того, дополнительно предлагается, с учетом изменений, произошедших в законодательстве, и разработанной методики ранжирования организаций в интересах ГО учесть следующие предложения.

Коммунальным унитарным предприятиям, осуществляющим государственно-властные полномочия в области архитектурной, градостроительной и строительной деятельности на территории административно-территориальных единиц:

– для уточнения категорий по ГО проектируемым объектам, если последние являются частью существующих организаций, обращаться с запросом к заказчику, а последнему, при отсутствии соответствующей информации, – в вышестоящий орган по подведомственности;

⁵ Акт «О практическом использовании (внедрении) результатов диссертационного исследования» от 17.02.2022, утвержденный заместителем Министра по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь А.М. Юржицем.

– в отношении объектов нового строительства запрос на получение технических требований дополнить сведениями о категории опасности объекта, фактической роли организации в области мобилизационной подготовки и мобилизации, данными о границах зон действия поражающих факторов, характере вероятного нарушения условий жизнедеятельности людей;

– учитывать при подготовке запроса в органы государственного надзора содержание (при наличии) мобилизационного плана, декларации промышленной безопасности, производственного плана, плана предупреждения и ликвидации ЧС, объектового плана ГО, плана ликвидации аварийных ситуаций.

Министерству по чрезвычайным ситуациям предлагается:

– предусмотреть при разработке технических требований на разработку раздела ИТМ ГО и ЧС в составе проектной документации процедуру определения проектной категории по ГО;

– категорию по ГО для вновь проектируемых организаций определять, учитывая проектное требование, в соответствии с которым организации промышленного комплекса выполняют мобилизационное задание (заказ) на поставку продукции (работ, услуг) для нужд обороны, установленное республиканским органом государственного управления или иной государственной организацией, подчиненной Правительству Республики Беларусь, местными исполнительными и распорядительными органами, а другие организации (независимо от сферы деятельности) – выполнение мобилизационного задания (заказа) на поставку продукции (работ, услуг) по внутри- и межведомственной кооперации;

– проектную категорию по ГО определять на основании расчета ранга и уровня значимости организации в интересах ГО;

– при подготовке технических требований учитывать принципы ИТМ ГО;

– внести изменения в оперативно-служебную документацию в части определения границ зон повышенной опасности для сценария разрушения технологического оборудования с максимальными катастрофическими последствиями;

– нормативно закрепить предложенные зависимости реализуемых защитных мероприятий от уровня значимости эксплуатируемых организаций.

Министерству архитектуры и строительства, проектным организациям рекомендуется:

– внести изменения в СН 2.02.04-2020⁶ в части определения зон повышенной опасности, учитывая, что в отношении категоризованных по ГО организаций и в пределах санитарно-защитной зоны детерминировано образуются зоны сильных разрушений, независимо от категории по ГО;

– предусмотреть в содержании технических нормативных правовых актов порядок обоснования зон повышенной опасности, формируемых при поражении объектов обычными средствами поражения.

Проектным организациям при разработке проектной документации предлагается прогнозирование последствий разрушения технологического оборудования и установок, в которых содержатся опасные вещества и материалы в условиях военного времени, выполнять для двух сценариев – для условий мирного и военного времени (для условий военного времени – исходя из возможности полного разрушения технологических коммуникаций и оборудования).

Таким образом, рекомендации и предложения направлены на совершенствование действующих нормативных правовых актов, порядок подготовки разрешительной и проектной документации на строительство, разработку технических требований органов государственного надзора при проектировании ИТМ ГО.

Заключение

В данной статье с использованием собственных результатов, полученных на предыдущих этапах научной работы, предпринята попытка сформировать целостное представление о проведенном исследовании – теоретико-методических основах комплексной защиты организаций, подлежащих переводу на работу в условиях военного времени, как о системе

⁶ Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны: СН 2.02.04-2020. – Введ. 12.11.2020. – Мн.: Минстройархитектуры, 2021. – 26 с.

взаимосвязанных мероприятий, реализуемых заблаговременно и дифференцированно, с учетом реальных условий, факторов опасности и ресурсных ограничений. Предложено понятие «комплексная защита», определены условия и факторы, влияющие на ее организацию и результативность, а также разработаны принципы, обеспечивающие системность планирования и реализации мероприятий на всех стадиях жизненного цикла организации. Кроме того, разработана архитектура комплексной защиты, выполнена систематизация защитных мероприятий и предложено их дифференцированное применение в зависимости от уровня значимости организаций и зон повышенной опасности, обоснованы принципы ИТМ ГО. С учетом разработанного научно-методического аппарата предложены новые положения по совершенствованию подходов зонирования территорий по степени опасности, учету вторичных поражающих факторов, что повышает обоснованность проектных и организационных решений при планировании защитных мер.

Ключевым практико-ориентированным результатом является разработка методики ранжирования организаций по уровню значимости на основе МАИ (в классическом и упрощенном вариантах). Методика обеспечивает сопоставимость организаций по совокупности различных критериев и позволяет перейти от формального отнесения к категориям по ГО к обоснованной дифференциации требований и защитных мероприятий. Корректность предложенных моделей ранжирования организаций в интересах ГО подтверждена сопоставлением с экспертными оценками на выборке по 111 организациям с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Результаты свидетельствуют о наличии значимой согласованности получаемых расчетов и мнений экспертов.

Для внедрения результатов исследования разработаны практические рекомендации по применению предложенного научно-методического аппарата при эксплуатации организаций, при подготовке разрешительной и проектной документации. Кроме того, разработан программно-информационный продукт, автоматизирующий определение не только уровня значимости организации в интересах ГО, но и рекомендуемый перечень мероприятий в соответствии с рассчитанным уровнем. Для эксплуатируемых организаций предложен количественный показатель степени их соответствия комплексной защите, позволяющий проводить мониторинг состояния защищенности эксплуатируемых организаций, выявлять и обобщать корректирующие мероприятия.

В целом результаты данного исследования расширяют теоретические и методические аспекты ГО в части ПУФ организаций, формируют инструментарий для более прозрачного, воспроизводимого и ресурсно-ориентированного принятия технических решений в сфере безопасности. Направления дальнейших исследований целесообразно связать с актуализацией критериев и весов, используемых в методике ранжирования организаций в интересах ГО, а также на интеграции программно-информационного продукта с действующими информационными системами учета, планирования и контроля мероприятий гражданской защиты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булва, А.Д. Комплексная защита организаций, подлежащих переводу на работу в условиях военного времени / А.Д. Булва, Е.А. Безносик, А.В. Лебедин // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 1. – С. 59–73. – DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-1.59. – EDN: GXLWNH.
2. Саланович, С.А. Разработка обновленной Национальной стратегии по снижению риска чрезвычайных ситуаций в Республике Беларусь до 2030 года / С.А. Саланович, И.И. Полевода, М.М. Тихонов, Н.М. Олесюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2024. – Т. 8, № 2. – С. 199–208. – DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-2.199. – EDN: UNQWCF.
3. Булва, А.Д. Законы вооруженной борьбы как научно-теоретическая основа комплексной защиты организаций, подлежащих переводу на работу в условиях военного времени / А.Д. Булва // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2022. – Т. 6, № 1. – С. 103–118. – DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-1.103. – EDN: WTTLWY.
4. Карпиленя, Н.В. Военная доктрина как научно-теоретическая основа совершенствования гражданской обороны / Н.В. Карпиленя, А.Д. Булва // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3, № 2. – С. 178–194. – DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-2.178. – EDN: GOCWJC.
5. Булва, А.Д. Роль и место гражданской обороны в системе обеспечения национальной безопасности Республики Беларусь (в контексте обеспечения военной безопасности) / А.Д. Булва // Вестник

- Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2022. – Т. 6, № 3. – С. 326–338. – DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-3.326. – EDN: KIUDUE.
6. Булва, А.Д. Теория гражданской обороны в контексте военно-научного знания / А.Д. Булва, Ю.В. Капральный // Теория и практика экономики гражданской защиты на страже безопасности жизнедеятельности современного общества: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 25 дек. 2024 г. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2025. – С. 254–263. – EDN: FZUSMG.
 7. Булва, А.Д. Концептуальные подходы к зонированию территорий по степени опасности / А.Д. Булва, Н.В. Карпилена, А.В. Лебедкин // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3, № 4. – С. 420–437. – DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-4.420. – EDN: SPPFIZ.
 8. Булва, А.Д. Научно-теоретическое основание гражданской обороны в системе знаний о войне и военной безопасности / А.Д. Булва // Гражданская защита: сохранение жизни, материальных ценностей и окружающей среды: материалы IV Междунар. заоч. научн.-практ. конф., Минск, 1 марта 2019 г. / Ун-т гражданской защиты МЧС Беларуси. – Мн.: УГЗ, 2019. – С. 17–22.
 9. Булва, А.Д. Критерии комплексной защиты организаций, подлежащих переводу на работу в условиях военного времени / А.Д. Булва // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Минск, 13 апр. 2023 г. / Ун-т гражданской защиты МЧС Беларуси: в 2 т. – Мн.: УГЗ, 2023. – Т. 1. – С. 165–167.
 10. Ласута, Г.Ф. Методика ранжирования организаций в интересах гражданской обороны с использованием метода анализа иерархий / Г.Ф. Ласута, Н.В. Карпилена, А.Д. Булва // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3, № 3. – С. 301–313. – DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-3.301. – EDN: QCJVYO.
 11. Булва, А.Д. Методика определения ранга организаций для дифференцированного планирования мероприятий гражданской обороны / А.Д. Булва // Технологии гражданской безопасности. – 2019. – Т. 16, № 2 (60). – С. 70–78. – DOI: 10.54234/CST.19968493.2019.16.2.60.10.70. – EDN: VIOSCY.
 12. Булва, А.Д. К вопросу расчета ранга организации по гражданской обороне с использованием упрощенного метода анализа иерархий / А.Д. Булва, Н.В. Карпилена // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 1. – С. 85–95. – DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-1.85. – EDN: VZCMVG.
 13. Булва, А.Д. Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны и мероприятия по предупреждению чрезвычайных ситуаций в составе проектной документации / А.Д. Булва, В.А. Панасевич // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 2. – С. 256–268. – DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-2.256. – EDN: UQKNZU.
 14. Булва, А.Д. Методологические аспекты подготовки запроса на выдачу технических условий, разработку раздела «Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны. Мероприятия по предупреждению чрезвычайных ситуаций» в проектной документации на строительство / А.Д. Булва // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3, № 1. – С. 74–82. – DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-1.74. – EDN: YZVGDR.
 15. Булва, А.Д. Концептуальные предпосылки проектирования и разработки инженерно-технических мероприятий гражданской обороны / А.Д. Булва // Национальная стратегия по снижению рисков ЧС в Республике Беларусь на 2019–2030 гг.: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 27 сент. 2018 г. / Ун-т гражданской защиты МЧС Беларуси. – Мн.: УГЗ, 2018. – С. 7–10.
 16. Булва, А.Д. Методологические аспекты проектирования мероприятий гражданской защиты / А.Д. Булва // Национальная стратегия по снижению рисков ЧС в Республике Беларусь на 2019–2030 гг.: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 27 сент. 2018 г. / Ун-т гражданской защиты МЧС Беларуси. – Мн.: УГЗ, 2018. – С. 10–12.

**Теоретико-методические основы комплексной защиты организаций,
подлежащих переводу на работу в условиях военного времени**
**Theoretical and methodological foundations of complex protection of organizations subject
to shift working under wartime conditions**

Булва Александр Дмитриевич

Филиал «Институт переподготовки
и повышения квалификации»
государственного учреждения образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра повышения
квалификации, начальник кафедры

Адрес: д. Светлая Роша, 1,
222515, Борисовский р-н,
Минская обл., Беларусь

Email: bulva@list.ru

SPIN-код: 5284-8759

Aleksandr D. Bulva

Branch «Institute for Retraining
and Professional Development»
of the State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Professional Development,
Head of the Chair

Address: Svetlaya Roshcha village, 1,
222515, Borisov district,
Minsk region, Belarus

Email: bulva@list.ru

ORCID: 0000-0001-9887-8759

THEORETICAL AND METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF COMPLEX PROTECTION OF ORGANIZATIONS SUBJECT TO SHIFT WORKING UNDER WARTIME CONDITIONS

Bulva A.D.

Purpose. Improvement of the scientific and methodological framework for supporting the adoption of technical solutions in the field of civil defense, which are aimed at increasing the stability of organizations' functioning during military operations or in the result of such operations, as well as at emergencies.

Methods. The article used general scientific research methods: induction and deduction, analysis and synthesis, comparison and generalization, analogy, elements of legal and system analysis, as well as the method of hierarchical analysis, were applied.

Findings. The presented article accumulates and systematizes the most significant results obtained by the author of this article at the previous stages of scientific work. An attempt is made to form a holistic view of the theoretical and methodological foundations of the integrated protection of organizations that are to be gifted to work in wartime conditions.

Applications field of research. The results of the study can be used in the development and revision of regulatory legal acts in the field of civil defense, applied by civil defense management bodies at various levels to assess the current level of integrated protection of organizations, form priorities in the areas of increasing the sustainability of the functioning of economic sectors, substantiate organizational and engineering and technical measures of civil defense, monitor their effectiveness and adjust them.

Keywords: civil defense, comprehensive protection, decision support, increased stability of functioning, laws of war, military security, organization, ranking methodology, theoretical and methodological foundations.

(The date of submitting: March 4, 2026)

REFERENCES

1. Bulva A.D., Beznosik E.A., Lebedkin A.V. Kompleksnaya zashchita organizatsiy, podlezhashchikh perevodu na rabotu v usloviyakh voennogo vremeni [Integrated protection of organizations which have to be transferred for working under war conditions]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 1. Pp. 59–73. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-1.59. EDN: GXLWHX.
2. Salanovich S.A., Polevoda I.I., Tikhonov M.M., Olesiyuk N.M. Razrabotka obnovennoy Natsional'noy strategii po snizheniyu riska chrezvychaynykh situatsiy v Respublike Belarus' do 2030 goda [Development of an updated National strategy of reducing the risk of emergencies in the Republic of Belarus until 2030]. *Journal of Civil Protection*, 2024. Vol. 8, No. 2. Pp. 199–208. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-2.199. EDN: UHQWCF.
3. Bulva A.D. Zakony vooruzhennoy bor'by kak nauchno-teoreticheskaya osnova kompleksnoy zashchity organizatsiy, podlezhashchikh perevodu na rabotu v usloviyakh voennogo vremeni [The laws of armed struggle as a scientific and theoretical basis for the comprehensive protection of organizations subject to transfer to work in wartime conditions]. *Journal of Civil Protection*, 2022. Vol. 6, No. 1. Pp. 103–118. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-1.103. EDN: WTTLWY.
4. Karpilenya N.V., Bulva A.D. Voennaya doktrina kak nauchno-teoreticheskaya osnova sovershenstvovaniya grazhdanskoy oborony [Military doctrine as a scientific and theoretical basis for the improvement of civil defense]. *Journal of Civil Protection*, 2019. Vol. 3, No. 2. Pp. 178–194. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-2.178. EDN: GOCWJC.
5. Bulva A.D. Rol' i mesto grazhdanskoy oborony v sisteme obespecheniya natsional'noy bezopasnosti Respubliki Belarus' (v kontekste obespecheniya voennoy bezopasnosti) [The role and place of civil defense in the system of ensuring national security of the republic of belarus (in the context of ensuring military security)]. *Journal of Civil Protection*, 2022. Vol. 6, No. 3. Pp. 326–338. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-3.326. EDN: KIUDUE.
6. Bulva A.D., Kapral'nyy Yu.V. Teoriya grazhdanskoy oborony v kontekste voenno-nauchnogo znaniya [The Theory of Civil Defense in the Context of Military Science Knowledge]. *Proc. of Intern. scientific-practical conf. «Teoriya i praktika ekonomiki grazhdanskoy zashchity na strazhe bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti sovremennogo obshchestva»*, Moscow, December 25, 2024. Moscow: VNII GOChS (FC), 2025. Pp. 254–263. (rus)
7. Bulva A.D., Karpilenya N.V., Lebedkin A.V. Kontseptual'nye podkhody k zonirovaniyu territoriy po stepeni opasnosti [Conceptual approaches to zoning of territories by the degree of danger]. *Journal of*

- Civil Protection*, 2019. Vol. 3, No. 4. Pp. 420–437. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-4.420. EDN: SPPFIZ.
8. Bulva A.D. Nauchno-teoreticheskoe osnovanie grazhdanskoy oborony v sisteme znaniy o voyne i voennoy bezopasnosti [Scientific and theoretical basis of civil defense in the system of knowledge about war and military security]. *Proc. of IV Intern. scientific-practical conf. «Grazhdanskaya zashchita: sokhranenie zhizni, material'nykh tsennostey i okruzhayushchey sredy»*, Minsk, March 1, 2019. Minsk: University of Civil Protection, 2019. Pp. 17–22. (rus)
 9. Bulva A.D. Kriterii kompleksnoy zashchity organizatsiy, podlezhashchikh perevodu na rabotu v usloviyakh voennogo vremeni [Criteria for the comprehensive protection of organizations that are to be shifted to wartime operations]. *Proc. of XVII Intern. scientific-practical conf. young scientists «Obespechenie bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: problemy i perspektivy»*, Minsk, April 13, 2023. Minsk: University of Civil Protection, 2023. Pp. 165–167. (rus)
 10. Lasuta G.F., Karpilenya N.V., Bulva A.D. Metodika ranzhirovaniya organizatsiy v interesakh grazhdanskoy oborony s ispol'zovaniem metoda analiza ierarkhiy [Ranking methodology of organizations for benefit of civil defense using the method of hierarchies]. *Journal of Civil Protection*, 2019. Vol. 3, No. 3. Pp. 301–313. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-3.301. EDN: QCJVYO.
 11. Bulva A.D. Metodika opredeleniya ranga organizatsiy dlya differentsirovannogo planirovaniya meropriyatiy grazhdanskoy oborony [Method of determining the rank of organizations for the differentiated planning of civil defense activities]. *Civil Security Technology*, 2019. Vol. 16, No. 2. Pp. 70–78. (rus). DOI: 10.54234/CST.19968493.2019.16.2.60.10.70. EDN: VIOSCY.
 12. Bulva A.D., Karpilenya N.V. K voprosu rascheta ranga organizatsii po grazhdanskoy oborone s ispol'zovaniem uproschennogo metoda analiza ierarkhiy [About ranking of organization on civil defense using the simplified method of hierarchies]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 1. Pp. 85–95. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-1.85. EDN: VZCMVG.
 13. Bulva A.D., Panasevich V.A. Inzhenerno-tehnicheskie meropriyatiya grazhdanskoy oborony i meropriyatiya po preduprezhdeniyu chrezvychaynykh situatsiy v sostave proektnoy dokumentatsii [Engineering and technical activities of civil defense and emergency prevention activities in the composition of design documentation]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 2. Pp. 256–268. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-2.256. EDN: UQKNZU.
 14. Bulva A.D. Metodologicheskie aspekty podgotovki zaprosa na vydachu tekhnicheskikh usloviy, razrabotku razдела «Inzhenerno-tehnicheskie meropriyatiya grazhdanskoy oborony. Meropriyatiya po preduprezhdeniyu chrezvychaynykh situatsiy» v proektnoy dokumentatsii na stroitel'stvo [Methodological aspects of the preparation of the request for issuance of technical conditions for the development of the section «Technical measures for civil defense. Measures for emergencies prevention» in construction project documentations]. *Journal of Civil Protection*, 2019. Vol. 3, No. 1. Pp. 74–82. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-1.74. EDN: YZVGDR.
 15. Bulva A.D. Kontseptual'nye predposylki proektirovaniya i razrabotki inzhenerno-tehnicheskikh meropriyatiy grazhdanskoy oborony [Conceptual background of the design and development of civil defense engineering activities]. *Proc. of Intern. scientific-practical conf. «Natsional'naya strategiya po snizheniyu riskov ChS v Respublike Belarus' na 2019-2030 gody»*, Minsk, September 27, 2018. Minsk: University of Civil Protection, 2018. Pp. 7–10. (rus).
 16. Bulva A.D. Metodologicheskie aspekty proektirovaniya meropriyatiy grazhdanskoy zashchity [Methodological aspects of designing civil protection measures]. *Proc. of Intern. scientific-practical conf. «Natsional'naya strategiya po snizheniyu riskov ChS v Respublike Belarus' na 2019-2030 gody»*, Minsk, September 27, 2018. Minsk: University of Civil Protection, 2018. Pp. 10–12. (rus)

Copyright © 2026 Bulva A.D.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БЕЛОРУССКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Сафонов Р.А., Крысин А.И., Гурьева О.Н.

Цель. Анализ состояния системы технической (научно-технической) поддержки эксплуатирующей организации, сравнение и оценка совместимости подобных систем органа регулирования и эксплуатирующей организации, выработка предложений по совершенствованию подходов к организации и координации деятельности по оказанию технической и научной поддержки Белорусской АЭС.

Методы. Группа теоретических методов исследований, направленных на осознание сущности процессов, явлений: анализ, синтез, сравнение, обобщение, конкретизация, аналогия.

Результаты. Проанализированы правовые нормы международного и республиканского уровня, в вопросах оказания научной и технической поддержки организациям, эксплуатирующим объекты использования атомной энергии и органам регулирования ядерной и радиационной безопасности. Выделены терминологические особенности в области организации и осуществления научно-технической поддержки. Рассмотрены различные аспекты функционирования систем научно-технической поддержки. Выработаны предложения организационного характера, применительно к республиканскому опыту, по совершенствованию подходов к организации и оказанию научно-технической поддержки эксплуатирующей организации объекта использования атомной энергии.

Область применения исследований. Совершенствование правовой сферы в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности, а также организации и функционирования системы научно-технической поддержки эксплуатирующей организации, создание комплекса мер для снижения предпосылок к возникновению конфликта интересов организаций научно-технической поддержки, консультирующих эксплуатирующие организации и регулирующий орган.

Ключевые слова: атомная энергетика, ядерная и радиационная безопасность, научная и техническая поддержка, эксплуатирующая организация, орган регулирования, особенности деятельности, консультационные услуги, экспертная поддержка.

(Поступила в редакцию 10 ноября 2025 г.)

Введение

В Республике Беларусь создана и интенсивно развивается в рамках совершенствования энергетической отрасли атомная энергетика. Основными приоритетами этой деятельности являются защита жизни и здоровья настоящего и будущих поколений граждан, охрана окружающей среды. Реализация этих приоритетов осуществляется всеми доступными средствами, одним из которых является формирование и активное использование научных и экспертных знаний при обосновании решений в ходе проектирования, строительства, эксплуатации и при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии.

Вопросы создания и функционирования системы научно-технической поддержки (НТП) эксплуатирующей организации могут подвергаться анализу с учетом различных аспектов этой деятельности.

В первую очередь это касается содержания деятельности по оказанию НТП исходя из действующего терминологического поля.

Во вторую очередь анализ может затрагивать возможности по привлечению сил для оказания НТП, отражая организационный потенциал системы.

В третью очередь исследование вопросов создания и функционирования систем НТП целесообразно строить с учетом комплексных возможностей по оказанию НТП на фоне необходимости рационального использования имеющегося и удовлетворения недостающего в стране научного и технического потенциала, а также требований по недопущению конфликта интересов организаций НТП (ОНТП, TSO – Technical and Scientific Support Organizations), консультирующих эксплуатирующие организации и регулирующий орган.

Поводом для выделения в Советском союзе комплекса мероприятий по оказанию научной и технической поддержки в самостоятельную организационную систему НТП стала

Чернобыльская авария 1986 г. Она является отправной точкой к проведению целого ряда масштабных организационных преобразований, составивших основу для создания системы НТП [1]. Несколько позже контакты с западными коллегами, которые интенсифицировались в 1990-е гг., показали, что этот путь был верным и у большинства из них имеются организации ОНТП [1].

В настоящее время целый ряд документов Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) [2–5] имеют прямое или косвенное указание на наличие возможности и необходимость создания, развития и использования научного и технического потенциала для оказания НТП при принятии решений, реализации и управлении соответствующими действиями, предпринимаемыми заинтересованными сторонами в атомной отрасли, включая определение их целесообразности, эффективности и приоритета.

Авторами работ [1; 6] подробно раскрыты основные пути, которыми шло становление систем НТП на международном уровне и в Российской Федерации. Однако эти шаги раскрыты с позиции формирования и функционирования системы НТП органа регулирования.

Следует отметить, что этот акцент прослеживается и в политике МАГАТЭ. По вопросам обсуждения подходов к созданию систем НТП эксплуатирующих организаций публикаций и научных мероприятий, прошедших на международном уровне, значительно меньше.

МАГАТЭ организовало и провело ряд международных конференций, изучающих роль TSO в поддержке регулирующих органов и ядерной отрасли в целом. Первая из них прошла во Франции (International Conference on the Challenges Faced by Technical and Scientific Support Organizations in Enhancing Nuclear Safety. Aix-an-Provence, France, 23–27 April 2007) и была посвящена задачам, стоящим перед TSO органов регулирования [7].

Целью данной конференции являлось предоставление площадки для обсуждения общей позиции в отношении сфер ответственности, потребностей и потенциала TSO. Во время конференции представители TSO разных стран пришли к осознанию необходимости существования постоянной площадки для сотрудничества между TSO с целью совершенствования ядерной и физической безопасности и развития компетенций в странах, вступающих на путь развития ядерной энергии (стран-новичков).

Следует отметить, что эта конференция стала первой и единственной, в ходе которой поднимался вопрос о правовом статусе TSO. Конференция дала весьма полезный импульс для более целенаправленного диалога о роли TSO в поддержке как регулирующих органов, так и эксплуатирующих организаций.

На следующих аналогичных конференциях подобная тематика не затрагивалась и обсуждения сводились к роли TSO в оказании НТП регулирующим органам.

Основная часть

Терминологические особенности. В глоссарии МАГАТЭ по вопросам безопасности, содержащем терминологию, используемую в области ядерной безопасности и радиационной защиты, понятия в отношении «научно-технической поддержки» и «организации научно-технической поддержки» не сформулированы. В общем случае это может указывать на отсутствие единства мнений в отношении дефиниции подобных объектов. Однако в той или иной интерпретации в различных документах МАГАТЭ встречаются словосочетания, отсылающие к «организации технической поддержки», «организации технической безопасности», «организации научной и технической поддержки», «специализированной организации поддержки», «специализированной вспомогательной организации» и содержание их деятельности в целом очертились достаточно внятыми контурами.

В дальнейшем был создан Форум TSO органов регулирования ядерной и радиационной безопасности (TSOF-Technical and Scientific Support Organizations Forum), и в марте 2018 г. опубликован документ IAEA-TECDOC-1835 «Организации научно-технической поддержки, оказывающие услуги в поддержку регулирующих функций» (Technical and Scientific Support Organizations Providing Support to Regulatory Functions) [8]. Однако, как понятно из названия, он применим только к TSO регулирующим органам и также не содержит однозначного определения «научно-техническая поддержка».

В отношении же формирования взглядов на НТП эксплуатирующей организации руководством МАГАТЭ было признано, что уроки, извлеченные из аварий того времени, повышают роль поддержания сильного технического потенциала на площадке и необходимость того, чтобы квалифицированный инженерно-технический персонал, обладающий

глубокими знаниями о конструкции и конфигурации станции, входил в состав бригад эксплуатации и смены эксплуатации реактора. В 1999 г. МАГАТЭ был подготовлен документ IAEA-TECDOC-1078 «Техническая поддержка эксплуатации атомных электростанций» (Technical Support for Nuclear Power Operations) [9], в котором подчеркивалась важность наличия компетентной и целенаправленной технической поддержки на этапе эксплуатации. В документе содержались ключевые рекомендации для руководства станции по созданию и поддержанию эффективного системного оператора. За два десятилетия, прошедшие после публикации IAEA-TECDOC-1078, был накоплен дополнительный опыт эксплуатации и сделаны новые наблюдения относительно передовой практики (а также сохраняющихся проблем) в отношении получения, предоставления, понимания, оценки и использования технической поддержки атомной электростанции (АЭС) для принятия безопасных решений.

Как результат, в 2018 г. в серии изданий МАГАТЭ по ядерной энергии опубликован документ № NP-T-3.28 «Техническая поддержка атомных электростанций и программ» [10]. В нем раскрыт смысл понятия «техническая поддержка». В терминологическом аспекте «техническая поддержка – это деятельность (или часть деятельности) по оказанию помощи лицам, принимающим решения, путем предоставления технического и научного вклада в принятие решений, связанных с достижением целей проектирования и производительности». Следует отметить, что хотя предлагаемая словарная конструкция для этого словосочетания и не включает слово «научная», его содержание раскрыто уже с учетом «научного вклада». Можно предположить, что собственно англоязычная аббревиатура TSO не содержит вторую букву S в соответствии со словосочетанием Technical and Scientific Support Organizations, потому что в период становления понятий использовалось в основном определение в отношении Technical Support Organizations, а в смысловом содержании «технической поддержки» уже подразумевали наличие научной составляющей. Другой терминологии, поясняющей содержание словосочетания «научно-техническая поддержка», в документах международного уровня не имеется.

Основу деятельности по оказанию технической поддержки АЭС ошибочно могут воспринимать лишь как работы по проверке инженерных расчетов, документов, обосновывающих безопасность при проведении проектных работ и эксплуатационных операций. Однако документом № NP-T-3.28 определено, что хоть техническая поддержка и имеет опору на инженерные принципы, она во многом должна опираться на результаты прикладных научных исследований, в том числе в области естественных наук [10].

Основные группы задач технической поддержки разделяются следующим образом [10]:

- подготовительные задачи (определение целей, задач и объемов оказания технической поддержки, требований к исходным данным и различным видам обеспечения);
- демонстрационные задачи (сбор, анализ, оценка, исследование и интерпретация получаемых данных);
- верификационные задачи (проверка, квалификация, оценка соответствия техническим требованиям, подтверждение инженерных и технических решений);
- экспертные задачи (рассмотрение, анализ, экспертиза, выдача на основе технических и научных знаний консультативных и экспертных заключений, рекомендаций);
- прогнозные задачи (обобщение опыта эксплуатации объектов использования атомной энергии с использованием научной методологии, научно-технический прогноз, определение перспективных направлений научно-технического развития);
- исследовательские задачи (прикладные научные и научно-технические исследования, обеспечивающие научную поддержку решений, принимаемых в ходе выполнения текущих и перспективных проектных, эксплуатационных задач, задач по выводу из эксплуатации объекта использования атомной энергии, а также всех видов обеспечения этой деятельности);
- инновационные задачи (практическое внедрение в жизнь результатов прикладных научных исследований: технологий, разработок, методов и т.п.).

Этим же документом определены особенности научной и технической поддержки различными видами TSO (внешняя, внутренняя) на всех стадиях жизненного цикла, а также требования к концентрации компетенций на различных группах задач и ряд других аспектов.

После Международной конференции МАГАТЭ по проблемам, с которыми сталкиваются организации технической и научной поддержки, прошедшей во Франции в 2007 г., TSO из разных государств – членов TSOF совместно выработали общее понимание ролей и задач TSO регулирующих органов.

Информация о порядке предоставления технической и научной поддержки регуляторных функций государства в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности обобщена в упомянутой выше публикации МАГАТЭ IAEA-TECDOC-1835 [8].

Указанная публикация представляет собой передовые методы работы TSO на основе рекомендаций экспертов в отношении конкретных задач: общие принципы, лежащие в основе оказания технической и научной поддержки регулируемому органу; характеристики организаций, предоставляющих такую поддержку; услуги, предоставляемые для поддержки регулирующих функций, а также связанные с ними действия и процессы для поддержания требуемого уровня знаний, современных инструментов и оборудования [8].

При этом TSO определяется как *организация* или организационное подразделение, назначенное или иным образом *признанное регулирующим органом и/или правительством для предоставления экспертных знаний и услуг* в поддержку ядерной и радиационной безопасности и все связанные с этим *научно-технические вопросы* [8].

Для сравнения: применительно к нуждам эксплуатирующей организации к *организации технической поддержки* относится *любая организация* (лицо, группа лиц), *оказывающая техническую поддержку* лицам, принимающим решения при подготовке проекта АЭС, лицензировании, строительстве, вводе в эксплуатацию, эксплуатации, техническом обслуживании и выводе из эксплуатации АЭС [10].

Сфера деятельности TSO определяется функциями, которые реализует регулирующий орган [2]. При этом особый упор делается:

- на проведение экспертизы безопасности в области использования атомной энергии и источников ионизирующего излучения, оказание экспертной поддержки при осуществлении иных действий государственного регулирования в области обеспечения безопасности при использовании атомной энергии и источников ионизирующего излучения;
- обоснование предложений по совершенствованию законодательства, разработке проектов нормативных правовых актов, документов технического нормирования и стандартизации в области обеспечения безопасности при использовании атомной энергии и источников ионизирующего излучения;
- участие в обеспечении аварийной готовности и реагирования на чрезвычайные ситуации.

Наряду с этим для TSO целесообразно развивать возможности по использованию технических инструментов, аналитических моделей, научных методов и новейших экспериментальных данных.

С учетом этого в дополнение к поддержке основных регулирующих функций TSO рекомендовано:

- развивать собственные компетенции путем активного проведения научных исследований и разработок, применения эффективных методов управления знаниями, разностороннего взаимодействия и сотрудничества;
- осуществлять ведение баз данных и записей, связанных с безопасностью;
- участвовать в экологическом мониторинге и анализе его результатов.

Кроме того, публикацией определены наиболее перспективные направления научных исследований, которые позволяют поддерживать (развивать) компетенции TSO на требуемом уровне [8]. Подробно проанализированы и раскрыты формы существования TSO регулирующих органов и их привлечения на различных стадиях жизненного цикла объекта использования атомной энергии.

Таким образом, можно отметить, что устоявшегося термина «научно-техническая поддержка» (в любых его вариациях) практически не существует ни в отношении ее оказания эксплуатирующей организации, ни в отношении ее оказания регулируемому органу. Существует единственное формализованное определение термина «техническая поддержка» [10], которое применяется в отношении ее оказания эксплуатирующей организации, и оно в своем контексте содержит упоминание о необходимости использования *научного потенциала* для обеспечения качества мероприятий поддержки.

Определения, действующие в отношении организаций поддержки регулирующего органа и эксплуатирующей организации, имеют принципиальные отличия. *Поддержку регулятору* может оказывать только организация или подразделение (допускается привлечение ими отдельных лиц, экспертов), *признанное* регулятором или правительством, а *поддержку эксплуатирующей организации* может оказывать *любая организация*, лицо или группа лиц.

В обоих случаях допускается привлечение TSO в вопросах, не связанных напрямую с классическим пониманием обеспечения ядерной и радиационной безопасности (финансовое, юридическое, маркетинговое обеспечение – в случае поддержки эксплуатирующей организации и кадровое обеспечение, физическая защита и гарантии – в случае поддержки регулирующего органа).

Содержание и формы деятельности по оказанию НТП эксплуатирующей организации [10] и регулирующего органа [8] во многом схожи. Однако последним документом шире раскрыты характер этой деятельности по основным направлениям и пути поддержания научного уровня TSO для обеспечения собственного экспертного потенциала и развития области актуальных компетенций в целом.

Организационные возможности. Анализ упомянутых выше публикаций МАГАТЭ, указывает на то, что организационные усилия, обеспечивающие соблюдение общих принципов, положенных в основу предоставления технической и научной поддержки регулирующему органу и эксплуатирующей организации, имеют одинаковую основу.

В упомянутых выше документах [8; 10] раскрыты особенности создания и функционирования внешних и внутренних TSO, их потенциальные формы управления, финансирования, возможности для привлечения зарубежных организаций, внешних экспертов.

В ряде случаев для TSO регулирующего органа [8; 11] раскрыты подходы к построению организационно-штатных структур. Публикацией [10] сделан акцент на то, что TSO эксплуатирующей организации целесообразно иметь различные организационно-штатные структуры, непосредственно зависящие от стадии жизненного цикла объектов использования атомной энергии, а прерогативу в отношении определения TSO с необходимой структурой отдают основному потребителю его услуг. В качестве приоритетного варианта привлечения TSO предлагается рассматривать внутреннюю TSO, действующую по принципу «одно окно». Однако учитывая, что потребность в НТП может носить как запланированный характер, так и острый (незапланированный) характер, не исключается вовлечение в эти процессы сторонних TSO, соответствующих требованиям эксплуатирующей организации, которые целесообразно закрепить в политике оказания НТП. Основу этой политики должны составлять подходы к созданию и поддержанию требуемых компетенций у эксплуатирующей организации и ее TSO, прогнозные объемы и охват требуемой НТП, баланс бюджетного и внешнего финансирования TSO. Для TSO эксплуатирующей организации особенности выбора форм управления (собственности) не выделяются.

В свою очередь, рекомендаций со стороны МАГАТЭ в отношении организационно-штатных структур TSO, являющихся внешней структурой по отношению к регулирующему органу, не имеется [8]. Этим же документом проанализированы формы возможного управления TSO регулирующих органов. Выделены две формы управления: государственная и частная, а также три формы финансирования: бюджетная, смешанная, внебюджетная. При этом констатируется, что около 20 % проанализированных в публикации TSO имеют внутреннюю форму организации функционирования, т.е. входят в структуру регулирующего органа (80 % TSO внешние к регулирующему органу). Около 30 % TSO имеют государственную форму собственности (70 % частную) и в 53 % проанализированных случаев имели исключительно бюджетное финансирование (смешанное финансирование 29 % TSO, внебюджетное финансирование 18 % TSO).

Разделение же областей деятельности TSO эксплуатирующей организации и регулирующего органа, как говорилось выше, осуществляется в соответствии с отличными друг от друга подходами.

Эксплуатирующим организациям предлагается выстраивать свои потребности в НТП в соответствии с разделением стадий жизненного цикла объектов использования атомной энергии [10]:

- подготовительный этап (размещение);
- проектирование, строительство и ввод в эксплуатацию;
- эксплуатация;
- вывод из эксплуатации.

Регулирующим органам рекомендовано учитывать при формировании НТП области деятельности по направлениям [8]:

- обеспечение ядерной и радиационной безопасности АЭС;
- обеспечение радиационной безопасности источников ионизирующего излучения;
- аварийная готовность и реагирование;

- обращение с радиоактивными отходами;
- обеспечение безопасности объектов ядерного топливного цикла;
- обеспечение ядерной и радиационной безопасности экспериментальных и исследовательских ядерных реакторов, критических и подкритических ядерных стенов (сборок).

Следует отметить, что предложенная классификация направлений деятельности TSO [8] во многом совпадает с одной из основных классификационных группировок классификатора технических правовых актов, введенного в 2025 г. Госатомнадзором (за исключением объектов ядерного топливного цикла) [12].

Дальнейшую детализацию областей деятельности TSO предлагается осуществлять в соответствии с видами предоставляемых ими услуг [8]:

- рассмотрение оценок и обзоров в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности;
- обоснование предложений в положения норм и правил, а также руководств по обеспечению ядерной и радиационной безопасности;
- участие в инспекциях объектов использования атомной энергии и источников ионизирующего излучения;
- проведение научных исследований и разработок;
- участие в разработке, поддержании и совершенствовании комплекса мер по обеспечению аварийной готовности и аварийного реагирования на чрезвычайные ситуации на объектах использования атомной энергии;
- измерение параметров, характеризующих радиационную обстановку;
- участие в обеспечении функционирования системы учета и анализа эксплуатационного опыта АЭС;
- консультации заинтересованных потребителей в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности;
- внутреннее и международное научное, научно-техническое сотрудничество;
- управление знаниями, в том числе информацией, компетенциями и персоналом.

В обоих случаях при недостатке требуемых компетенций допускается привлечение внешних TSO (экспертных организаций) или экспертов, в том числе зарубежных. При этом должна сохраняться привилегия в необходимости принятия эксплуатирующей организацией (регулирующим органом) всех возможных мер для обеспечения ядерной и радиационной безопасности.

Обобщая, можно отметить, что подходы к организационному построению систем НТП эксплуатирующей организации и регулирующего органа имеют общие признаки, допускается использование внешних и внутренних TSO, различных форм управления (собственности) TSO, различных форм финансирования.

Отличия заключаются в том, что регулирующий орган должен использовать в качестве TSO официально признанную (регулирующим органом или правительством) организацию, а к эксплуатирующей организации такие требования не предъявляются. Регулирующему органу предлагается строить (выбирать) TSO исходя из направлений (области) деятельности и видов оказываемых услуг (ограничения по количеству TSO не имеется), а эксплуатирующей организации рекомендовано создавать (выбирать) TSO исходя из стадий жизненного цикла объекта использования атомной энергии, предусматривать гибкость ее организационно-штатной структуры и придерживаться принципа «одно окно» (допускается привлечение сторонних организаций).

Комплексный подход. С вводом в эксплуатацию энергоблоков государственного предприятия «Белорусская АЭС» (Белорусская АЭС) на данном этапе завершился и законодательский процесс по формированию самостоятельной отрасли права «Законодательство о ядерной и радиационной безопасности». Базисом этого процесса выступили основные направления проведения единой государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности [13]. Документ, определяющий политику в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности, разрабатывался в целях закрепления совокупности основополагающих принципов МАГАТЭ по обеспечению безопасности и ключевых направлений деятельности по их реализации для формирования единства подходов к обеспечению безопасности. В нем определено, что в Республике Беларусь развивается система экспертной, консультативной и технической поддержки в рамках формирования национальной инфраструктуры для реализации ядерно-энергетической программы. Совершенствование указанной системы обеспечивается наращиванием потенциала ОНТП регулирующего

органа и эксплуатирующих организаций для сопровождения их деятельности и оказания им услуг (выполнения работ) по отдельным направлениям.

В свою очередь, ст. 35 Закона [14] определено, что *эксплуатирующая организация* для проведения оценки проектной, конструкторской, технологической документации, подготовки периодических отчетов безопасности, анализа расчетов при обосновании безопасности, научного, технического и инженерного сопровождения осуществляемой деятельности, выполнения научно-исследовательских работ (в целях поддержания и повышения уровня безопасности) *формирует собственную систему НТП* или имеет право привлекать ОНТП системы НТП (регулирующего органа).

Согласно п. 30 норм и правил по обеспечению ядерной и радиационной безопасности НП АС-022(15)-20/23 [15] эксплуатирующая организация должна создать структурные подразделения для осуществления непосредственно на площадке АЭС деятельности по сооружению и безопасной эксплуатации АЭС, наделяя их необходимыми правами, финансовыми средствами, материально-техническими и людскими ресурсами, обеспечивая нормативными документами и НТП, определить их ответственность, а также обеспечить осуществление контроля этой деятельности.

Одним из направлений развития ядерной инфраструктуры в соответствии с Концепцией развития ядерной инфраструктуры для целей устойчивого функционирования Белорусской АЭС (эксплуатирующей организации), утвержденной приказом государственного производственного объединения «Белэнерго» (ГПО «Белэнерго») от 14 апреля 2021 г. № 82, является организация и планирование НТП эксплуатации Белорусской АЭС. Эта задача является комплексной и в краткосрочной перспективе в вопросах оказания НТП предполагается взаимодействие Белорусской АЭС с белорусской специализированной организацией и через нее с проектировщиками Белорусской АЭС и другими компетентными организациями Республики Беларусь и Российской Федерации.

В долгосрочной перспективе при непосредственном взаимодействии с ведущими организациями атомной отрасли Российской Федерации ожидается прирост компетенций белорусских организаций, которые смогут обеспечивать НТП по большинству востребованных направлений работы эксплуатирующей организации и при возникновении необходимости привлекать к выполнению работ внешние компетентные организации (включая российские).

Данный подход к обеспечению НТП положен в основу Плана реализации системы мероприятий для устойчивого самостоятельного функционирования Белорусской АЭС как эксплуатирующей организации, утвержденного первым заместителем генерального директора – главным инженером государственного предприятия «Белорусская АЭС».

С практической точки зрения работа Белорусской АЭС в части получения НТП со стороны организаций Российской Федерации организована преимущественно с использованием услуг единого отраслевого интегратора – акционерного общества «Росатом Сервис». Имеются и другие, заключенные напрямую с исполнителями в Российской Федерации, договоры на оказание консультационных услуг по научно-техническому сопровождению Белорусской АЭС.

В части создания национальной системы НТП в соответствии с Указом Президента Республики Беларусь от 12 ноября 2007 г. № 565 «О некоторых мерах по строительству атомной электростанции» ответственность за обеспечение научного сопровождения работ по строительству Белорусской АЭС возлагалась на Национальную академию наук Беларуси (НАН Беларуси), а организацией, выполняющей *научное сопровождение работ по ее строительству*, было определено ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» НАН Беларуси.

В дальнейшем на фоне изменения стадии жизненного цикла Белорусской АЭС был предпринят ряд шагов. В 2023 г. ГПО «Белэнерго» совместно с Белорусской АЭС проведена работа по определению наиболее актуальных направлений НТП, проанализированы возможности белорусских и российских ОНТП. Порядок функционирования системы НТП эксплуатирующей организации и направления ее оказания определены приказом ГПО «Белэнерго» от 27 марта 2023 г. № 105 «О формировании системы научно-технической поддержки Белорусской АЭС».

В 2024 г. проведена предварительная работа с республиканским унитарным предприятием «БелТЭИ» (РУП «БелТЭИ»), входящим в состав ГПО «Белэнерго», с целью его привлечения к работам по оказанию НТП Белорусской АЭС. Для *выполнения нелицензируемых*

видов работ/услуг в РУП «БелТЭИ» создано новое структурное подразделение – лаборатория научно-технических исследований, основной задачей которой является реализация проектов по научно-техническому сопровождению эксплуатации Белорусской АЭС.

После получения РУП «БелТЭИ» соответствующих компетенций и лицензии Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь на право осуществления деятельности в области использования атомной энергии будет рассмотрен вопрос создания проектного офиса РУП «БелТЭИ» на площадке Белорусской АЭС, который будет выполнять функции белорусской специализированной организации для контактов с внешними ОНТП.

В развитие системы НТП эксплуатирующей организации в 2025 г. подписаны соглашения о сотрудничестве в области научно-технического сопровождения эксплуатации Белорусской АЭС с РУП «БелТЭИ» и государственным научным учреждением «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова» НАН Беларуси. Соглашения позволяют объединить усилия сторон для реализации проектов в области научно-технического сопровождения эксплуатации Белорусской АЭС, создать условия для обучения, повышения квалификации и прохождения стажировки персонала сторон, а также принимать совместное участие в мероприятиях, способствующих повышению качества выполнения работ (услуг).

Рассмотрев представленные выше основные правила и этапы построения систем НТП эксплуатирующей организации и регулирующего органа, можно выделить некоторые моменты, которые, по мнению авторов, заслуживают внимания при организации и ведении этой работы со стороны Белорусской АЭС и структур, которым она подчинена.

Одним из естественных направлений деятельности являются работы по сокращению стоимости услуг по оказанию НТП и повышению оперативности их получения. Эта работа ни в коей мере не может допускать снижения их качества. По мере формирования пула белорусских ОНТП, обладающих требуемыми компетенциями по оказанию НТП эксплуатирующей организации и регулирующему органу, актуальным может стать вопрос разработки общеотраслевых методик расчета трудозатрат и формирования себестоимости работ по оказанию НТП по типовым тематическим вопросам.

Учитывая, что специализированная организация по оказанию НТП Белорусской АЭС не имеет аккредитации в качестве научной организации, деятельность по наращиванию ее научного потенциала и получение соответствующего свидетельства от Национальной академии наук Беларуси и Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь может рассматриваться в качестве приоритетного направления.

Поскольку за эксплуатирующей организацией законодательно закреплено право формирования собственной системы НТП либо привлечения ОНТП системы НТП регулирующего органа, реализацию этих возможностей целесообразно осуществлять по направлениям, правилам и в порядке, закрепленным нормативным правовым актом, обеспечивающим привлечение ОНТП различной ведомственной подчиненности. Это позволит потенциальным ОНТП эксплуатирующей организации и регулирующего органа однозначно позиционировать себя в отношении направлений требуемой НТП и иметь возможность организовать собственную работу по оказанию НТП, обеспечив отсутствие конфликта интересов.

Результаты. Проведенный анализ действующих актов законодательства, публикаций МАГАТЭ, технических нормативных правовых актов и других правовых актов, действующих в области обеспечения безопасного использования атомной энергии, позволяет обозначить единство и различие взглядов на формирование и организацию функционирования систем НТП эксплуатирующей организации и регулирующего органа.

Очевидно, что *отсутствие единой терминологической основы* может препятствовать однозначному пониманию, интерпретации и применению нормативно закрепленных требований и рекомендаций. Указанная проблема может быть обусловлена как условиями «многоязычности», в которых осуществлялось формирование некоторых определений, так и «молодостью» самой предметной области TSO. На национальном уровне урегулирование возможно путем разработки и внедрения в повседневную жизнь сборника основных терминов и определений в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности, действующих в нормативных правовых актах, в том числе технических нормативных правовых актах.

Рассмотрение основных организационных аспектов формирования и применения систем НТП указывает на то, что в целом работы по созданию и обеспечению функционирования систем НТП эксплуатирующей организации и органа регулирования ведутся на системном уровне и не имеют серьезных противоречий с требованиями актов законодательства

о ядерной и радиационной безопасности. По мере становления и развития собственного потенциала НТП для Белорусской АЭС, может быть полезным закрепление нормы о *необходимости признания государством ОНТП, оказывающих поддержку эксплуатирующим организациям* (на примере системы НТП регулирующего органа, т.е. определение в нормативном правовом акте, уровнем не ниже постановления правительства, конкретных ОНТП и их направлений деятельности). Это позволит очертить требования к ним, определить направления оказания НТП и установить единые правила взаимодействия между всеми элементами системы. При этом ОНТП, попадающие в поле интересов эксплуатирующей организации и органа регулирования, должны будут принимать внутренние меры (например, в рамках выполнения особых лицензионных требований и условий) по разграничению сфер ответственности между структурными подразделениями и сотрудниками, участвующими в НТП обоих потребителей услуг, с целью *исключения конфликта интересов*.

На системном уровне, ввиду малого числа организаций, обладающих потенциалом для оказания НТП эксплуатирующей организации и регулирующему органу, с целью снижения влияния на рынок этих услуг монополистических тенденций актуальной видится *задача разработки общепромышленных методик формирования себестоимости работ по оказанию НТП* по типовым тематическим вопросам. Поскольку эта задача многогранная и ресурсоемкая, ее решение всем отраслевым научным сообществом целесообразно начинать уже в ближайшее время.

Заключение

В обоих рассматриваемых случаях оказания НТП эксплуатирующей организации и регулирующему органу практически отсутствует формализованный подход к организации работы по созданию, подтверждению и развитию экспертного потенциала. Не существует и единых подходов к стимулированию экспертной деятельности. В настоящее время имеются отдельные элементы этой системы, касающиеся предоставления допуска к проведению экспертизы безопасности, а также ведения реестра аттестованных физических и других лиц, оказывающих услуги по консультированию в области обеспечения радиационной безопасности. При этом оказание экспертной поддержки требуется при реализации абсолютного большинства функций эксплуатирующей организации и регулирующего органа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Букринский, А.М. Безопасность атомных станций и ее регулирование в России: сб. статей / А.М. Букринский. – М.: НТЦ ЯРБ, 2016. – 421 с.
2. Нормы безопасности МАГАТЭ. Общие требования безопасности / Международное агентство по атомной энергии. – Вена: МАГАТЭ, 2016. – Часть 1. Государственная, правовая и регулирующая основа обеспечения безопасности. – 49 с. – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1713_R_web.pdf (дата обращения: 20.11.2025).
3. Нормы безопасности МАГАТЭ. Общие требования безопасности / Международное агентство по атомной энергии. – Вена: МАГАТЭ, 2015. – Часть 3. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. – 477 с. – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1578_R_web.pdf (дата обращения: 20.11.2025).
4. Нормы безопасности МАГАТЭ. Конкретные требования безопасности / Международное агентство по атомной энергии. – Вена: МАГАТЭ, 2016. – № SSR-2/1. Безопасность атомных электростанций: проектирование. – 83 с. – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1715_R_1rev1_web.pdf (дата обращения: 20.11.2025).
5. Нормы безопасности МАГАТЭ. Конкретные требования безопасности / Международное агентство по атомной энергии. – Вена: МАГАТЭ, 2017. – № SSR-2/2. Безопасность атомных электростанций: ввод в эксплуатацию и эксплуатация. – 58 с. – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1716_R_web.pdf (дата обращения: 20.11.2025).
6. Хамаза, А.А. Деятельность ФБУ «НТЦ ЯРБ» в рамках форума организаций научно-технической поддержки органов регулирования ядерной и радиационной безопасности (Форум ОНТП) / А.А. Хамаза, Д.А. Мистрюгов, Д.И. Урманова // Ядерная и радиационная безопасность. – 2019. – № 1 (91). – С. 22–31. – DOI: 10.26277/SECNRS.2019.91.1.004. – EDN: DPMSJM.
7. Proceedings of the International Conference on the Challenges Faced by Technical and Scientific Support Organizations in Enhancing Nuclear Safety, Aix-en-Provence, France, April 23–27, 2007 // International Atomic Energy Agency: [site]. – URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/cn142papers.asp> (date of access: 20.11.2025).

8. IAEA-TECDOC-1835: Technical and Scientific Support Organizations Providing Support to Regulatory Functions / International Atomic Energy Agency. – Vienna: IAEA, 2018. – 53 p. – URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te-1835-web.pdf> (date of access: 20.11.2025).
9. IAEA-TECDOC-1078: Technical support for nuclear power operations / International Atomic Energy Agency. – Vienna: IAEA, 1999. – 81 p. – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1078_prn.pdf (date of access: 20.11.2025).
10. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.28: Technical Support to Nuclear Power Plants and Programmes / International Atomic Energy Agency. – Vienna: IAEA, 2018. – 130 p. – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1824_web.pdf (date of access: 20.11.2025).
11. Нормы безопасности МАГАТЭ. Общее руководство по безопасности / Международное агентство по атомной энергии. – Вена: МАГАТЭ, 2023. – № GSG-12. Организация, менеджмент и укомплектование персоналом регулирующего органа в интересах обеспечения безопасности. – 150 с. – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1801R_web.pdf (дата обращения: 20.11.2025).
12. Сафонов, Р.А. Классификация технических правовых актов в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности как основа для классификации областей знаний: опыт Республики Беларусь / Р.А. Сафонов, Г.А. Асташко, М.В. Мазуренко, А.И. Крысин // Ядерная и радиационная безопасность. – 2025. – № 2 (116). – С. 112–122. – DOI: 10.26277/SECNRS.2025.116.2.005. – EDN: MFLNWY.
13. Об основных направлениях проведения единой государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 15 августа 2023 г. № 535 // *ilex: информ. правовая система* (дата обращения: 20.11.2025).
14. О регулировании безопасности при использовании атомной энергии: Закон Респ. Беларусь от 10 октября 2022 г. № 208-З // *ilex: информ. правовая система* (дата обращения: 20.11.2025).
15. Об утверждении норм и правил по обеспечению ядерной и радиационной безопасности: постановление М-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь от 13 апреля 2020 г. № 15: в ред. от 30 июля 2020 г. № 32, от 26 сентября 2023 г. № 51 // *ilex: информ. правовая система* (дата обращения: 20.11.2025).

**Состояние и перспективы научно-технической поддержки эксплуатации
Белорусской атомной электростанции**
**Status and prospects of scientific and technical support for operation
of the Belarusian nuclear power plant**

Сафонов Руслан Анатольевич

Государственное научное техническое учреждение «Центр по ядерной и радиационной безопасности», отдел научно-организационного сопровождения и информационно-аналитической работы, сектор планирования и информационно-аналитической работы, старший научный сотрудник

Адрес: ул. Шпилевского, 59-7Н,
220067, г. Минск, Беларусь
Email: safonau@bcnrs.by

Ruslan A. Safonov

State Scientific and Technical Institution «Center for Nuclear and Radiation Safety», Department of Scientific and Organizational Support and Information-analytical Work, Planning and Information-analytical Work Sector, Senior Researcher

Address: Shpilevskogo str., 59-7N,
220067, Minsk, Belarus
Email: safonau@bcnrs.by

Крысин Александр Иванович

Государственное научное техническое учреждение «Центр по ядерной и радиационной безопасности», отдел ядерной безопасности, сектор анализа рисков, заведующий сектором

Адрес: ул. Шпилевского, 59-7Н,
220067, г. Минск, Беларусь
Email: krysin@bcnrs.by

Aleksandr I. Krysin

State Scientific and Technical Institution «Center for Nuclear and Radiation Safety», Nuclear Safety Department, Risk Analysis Sector, Head of the Sector

Address: Shpilevskogo str., 59-7N,
220067, Minsk, Belarus
Email: krysin@bcnrs.by

Гурьева Ольга Николаевна

Государственное научное техническое учреждение «Центр по ядерной и радиационной безопасности», отдел научно-организационного сопровождения и информационно-аналитической работы, сектор планирования и информационно-аналитической работы, заведующий сектором

Адрес: ул. Шпилевского, 59-7Н,
220067, г. Минск, Беларусь
Email: gurieva@bcnrs.by

Olga N. Gur'eva

State Scientific and Technical Institution «Center for Nuclear and Radiation Safety», Department of Scientific and Organizational Support and Information-analytical Work, Planning and Information-analytical Work Sector, Head of the Sector

Address: Shpilevskogo str., 59-7N,
220067, Minsk, Belarus
Email: gurieva@bcnrs.by
ORCID: 0009-0003-9401-6053

**STATUS AND PROSPECTS OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL SUPPORT
FOR OPERATION OF THE BELARUSIAN NUCLEAR POWER PLANT****Safonov R.A., Krysin A.I., Gur'eva O.N.**

Purpose. An analysis of the state of the system of technical (scientific and technical) support for the operating organization, a comparison and evaluation of the compatibility of such systems of the regulatory body and the operating organization, and the development of proposals to improve approaches to organizing and coordinating activities aimed at providing technical and scientific support to the Belarusian NPP.

Methods. A group of theoretical research methods aimed at understanding the essence of processes and phenomena: analysis, synthesis, comparison, generalization, concretization, analogy.

Findings. Legal norms at the international and national levels were analyzed with regard to providing scientific and technical support to organizations operating nuclear facilities and to nuclear and radiation safety regulatory bodies. Terminological features in the field of organizing and implementing scientific and technical support were identified. Various aspects of the functioning of scientific and technical support systems were examined. Organizational proposals were developed, based on national experience, aimed at improving approaches to organizing and providing scientific and technical support to the operating organization of a nuclear facility.

Application field of research. Improvement of the legal framework in the field of ensuring nuclear and radiation safety, as well as the organization and functioning of the system of scientific and technical support for the operating organization; creation of a set of measures to reduce the prerequisites for conflicts of interest among scientific and technical support organizations providing consultation to both operating organizations and the regulatory body.

Keywords: nuclear energy, nuclear and radiation safety, scientific and technical support, operating organization, regulatory body, features of the activities, consulting services, expert support.

(The date of submitting: November 10, 2025)

REFERENCES

1. Bukrinskiy A.M. *Bezopasnost' atomnykh stantsiy i ee regulirovanie v Rossii* [Safety of nuclear power plants and its regulation in Russia]: collection of articles. Moscow: Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, 2016. 421 p. (rus)
2. *IAEA Safety Standards: General Safety Requirements. No. GSR Part 1. Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety.* International Atomic Energy Agency. Vena: IAEA, 2016. 42 p. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1713web-70795870.pdf> (date of access: 20.11.2025).
3. *IAEA Safety Standards: General Safety Requirements. No. GSR Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards.* International Atomic Energy Agency. Vena: IAEA, 2014. 436 p. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1578_web-57265295.pdf (date of access: 20.11.2025).
4. *IAEA Safety Standards: Specific Safety Requirements. No. SSR-2/1. Safety of Nuclear Power Plants: Design.* International Atomic Energy Agency. Vena: IAEA, 2016. 71 p. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1715web-46541668.pdf> (date of access: 20.11.2025).
5. *IAEA Safety Standards: Specific Safety Requirements. No. SSR-2/2. Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation.* International Atomic Energy Agency. Vena: IAEA, 2016. 47 p. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1716web-18398071.pdf> (date of access: 20.11.2025).
6. Khamaza A.A., Mistryugov D.A., Urmanova D.I. Sec NRS activities in the framework of technical and scientific support organizations forum (TSOF). *Nuclear and Radiation Safety Journal*, 2019. No. 1 (91). Pp. 22–31. (rus). DOI: 10.26277/SECNRS.2019.91.1.004. EDN: DPMSJM.
7. *Proceedings of the International Conference on the Challenges Faced by Technical and Scientific Support Organizations in Enhancing Nuclear Safety, Aix-en-Provence, France, April 23–27, 2007.* International Atomic Energy Agency: [site]. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/cn142papers.asp> (date of access: 20.11.2025).
8. *IAEA-TECDOC-1835: Technical and Scientific Support Organizations Providing Support to Regulatory Functions.* International Atomic Energy Agency. Vienna: IAEA, 2018. 53 p. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te-1835-web.pdf> (date of access: 20.11.2025).

9. *IAEA-TECDOC-1078: Technical support for nuclear power operations*. International Atomic Energy Agency. Vienna: IAEA, 1999. 81 p. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1078_prn.pdf (date of access: 20.11.2025).
10. *IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.28: Technical Support to Nuclear Power Plants and Programmes*. International Atomic Energy Agency. Vienna: IAEA, 2018. 130 p. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1824_web.pdf (date of access: 20.11.2025).
11. *IAEA Safety Standards: General Safety Guide. No. GSG-12. Organization, Management and Staffing of the Regulatory Body for Safety*. International Atomic Energy Agency. Viena: IAEA, 2018. 124 p. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1801_web.pdf (date of access: 20.11.2025).
12. Safonov R.A., Astashko G.A., Mazurenko M.V., Krysin A.I. Classification of technical legal acts in the field of nuclear and radiation safety as a basis for classifying areas of knowledge: experience of the Republic of Belarus. *Nuclear and Radiation Safety Journal*, 2025. No. 2 (116). Pp. 112–122. (rus). DOI: 10.26277/ SECNRS.2025.116.2.005. EDN: MFLNWY.
13. *Ob osnovnykh napravleniyakh provedeniya edinoy gosudarstvennoy politiki v oblasti obespecheniya yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti* [On the main directions of implementing a unified state policy in the field of ensuring nuclear and radiation safety]: *Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, August 15, 2023, No. 535*. illex: information legal system (date of access: November 20, 2025). (rus)
14. *O regulirovanii bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii* [On the regulation of safety in the use of atomic energy]: *Law of the Republic of Belarus, October 10, 2022, No. 208-Z*. illex: information legal system (date of access: November 20, 2025). (rus)
15. *Ob utverzhdenii norm i pravil po obespecheniyu yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti* [On approval of norms and rules for ensuring nuclear and radiation safety]: *Resolution of the of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, April 13, 2020, No. 15: as amended on July 30, 2020, No. 32, and on September 26, 2023, No. 51*. illex: information legal system (date of access: November 20, 2025). (rus)

Copyright © 2026 Safonov R.A., Krysin A.I., Gur'eva O.N.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

**ПРАВИЛА ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ
статей для публикации в научном журнале
«Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси»**

1. Направляемые в Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси статьи должны представлять результаты научных исследований и испытаний, описания технических устройств и программно-информационных продуктов, проблемные обзоры, краткие сообщения, комментарии к нормативным техническим документам, справочные материалы и т.п.

2. Объем научной статьи, учитываемой в качестве публикации по теме диссертации, должен составлять не менее 0,35 авторского листа (14 000 печатных знаков, включая пробелы между словами, знаки препинания, цифры и др.). В этот объем входят таблицы, фотографии, графики, рисунки и список литературы.

3. Статья предоставляется в двух экземплярах. К рукописи статьи прилагаются: а) рекомендация кафедры, научной лаборатории или учреждения образования; б) экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати; в) подписанный лицензионный договор на право опубликования статьи (заключается с каждым автором отдельно и печатается с двух сторон на одном листе). Форма договора размещена на сайте журнала: <https://journals.ucp.by>.

4. Электронная версия статьи, подготовленная в текстовом редакторе Microsoft Word, предоставляется на стандартных носителях либо по электронной почте на адрес: vestnik@ucp.by. Рисунки прилагаются дополнительно как отдельные файлы графического формата.

5. Материал статьи излагается в следующем порядке:

1) информация об авторах (на отдельном листе): фамилия, имя, отчество – полностью, ученая степень, ученое звание, место работы (полное название, адрес с указанием индекса и страны), должность, рабочий телефон, email (обязательно), имеющиеся персональные идентификационные номера в наукометрических базах (при этом обязательным является указание SPIN-кода РИНЦ, идентификатора ORCID). Если авторов несколько, указывается корреспондент по вопросам содержания статьи;

2) номер УДК (универсальная десятичная классификация);

3) название статьи;

4) аннотация (не менее 200 и не более 300 слов) является основным источником информации о статье, может публиковаться самостоятельно в реферативных журналах и информационных системах в отрыве от основного текста и, следовательно, должна быть понятной без обращения к самой публикации. Аннотация должна раскрывать: *цель* (определяется круг рассматриваемых вопросов, обозначаются цель и задачи работы, объект и предмет исследования); *методы* (излагаются подходы, методы и технологии исследования); *результаты* (приводятся наиболее значимые теоретические положения, экспериментальные данные, подчеркивается их актуальность и новизна); *область применения исследований* (описываются возможности использования полученных результатов, отмечается их научно-практическая значимость);

5) ключевые слова и словосочетания статьи (не более 12 слов);

6) дата поступления статьи (месяц и год);

7) введение; основная часть статьи; заключение, завершаемое четко сформулированными выводами;

8) указание на источник финансирования (если статья подготовлена в рамках выполнения гранта научных исследований);

9) список цитированной литературы. Для каждого источника указывается (при наличии) его DOI. Эксперты международных наукометрических баз данных негативно воспринимают включение в список цитированной литературы источников локального характера (постановлений, законов, инструкций, неопубликованных отчетов, диссертаций, авторефератов и т.п.), электронных материалов и ресурсов сети Интернет. Поэтому ссылки на такие источники рекомендуем оформлять в виде постраничных сносок со сквозной нумерацией.

На отдельной странице на английском языке приводятся следующие сведения: информация об авторах; название статьи; аннотация, обязательно включающая следующие пункты: purpose, methods, findings, application field of research; ключевые слова и словосочетания; транслитерация на латинице и перевод на английский язык списка цитированной литературы.

Для русскоязычных источников в транслитерации на латинице приводятся фамилия, имя, отчество авторов, названия статей, журналов (если нет англоязычного названия), материалов конференций, издательств и на английском языке – названия публикаций и выходные сведения (город, том и номер издания, страницы). Для транслитерации на латиницу следует применять систему транслитерации BGN, при этом можно использовать интернет-ресурсы, например сайт: <http://translit.net>.

Основные требования к оформлению статей, предоставляемых в научный журнал, и пример оформления статьи размещены на сайте издания: <https://journals.ucp.by>.

6. Содержание разделов статьи, таблицы, рисунки, цитированная литература должны отвечать требованиям межгосударственного стандарта ГОСТ 7.1-2003 и Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации) на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, автореферата и публикаций по теме диссертации, утвержденной постановлением ВАК Беларуси от 28 февраля 2014 г. № 3.

7. Редакция оставляет за собой право на изменения, не искажающие основного содержания статьи. Рукописи отклоненных статей авторам не возвращаются.

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ «УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ
МИНИСТЕРСТВА ПО ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ»**

Факультет заочного обучения

Проводит:

Подготовку по специальностям:

6-05-1033-01 «Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций» с присвоением квалификации «Инженер по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций». Форма обучения – заочная. Полный срок обучения – 5 лет, сокращенный – 3 года.

По окончании обучения выдается диплом о высшем образовании государственного образца.

Факультет безопасности жизнедеятельности

Проводит:

Переподготовку лиц с высшим образованием по специальностям:

9-09-1033-02 «Инжиниринг безопасности объектов строительства» с присвоением квалификации «Инженер». Срок обучения – 18 месяцев. Форма обучения – заочная (три сессии).

9-09-1033-03 «Промышленная безопасность» с присвоением квалификации «Инженер». Срок обучения – 18 месяцев. Форма обучения – заочная (три сессии).

По окончании обучения выдается диплом государственного образца о переподготовке на уровне высшего образования.

Повышение квалификации для руководящих работников и специалистов, имеющих высшее или среднее специальное образование, по образовательным программам:

- «Экспертная деятельность» (в пожарной безопасности);
- «Пожарная безопасность. Предупреждение чрезвычайных ситуаций. Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны»;
- «Монтаж, наладка и техническое обслуживание систем пожарной автоматики»;
- «Техническое обслуживание систем пожарной автоматики»;
- «Техническое обслуживание систем пожарной автоматики, применяемых на БелАЭС»;
- «Проектирование систем пожарной автоматики»;
- «Выполнение работ с применением огнезащитных составов (инженерно-технические работники)»;
- «Обеспечение пожарной безопасности на объектах Республики Беларусь»;
- «Промышленная безопасность»;
- «Организация и обеспечение промышленной безопасности при обращении пиротехнических изделий»;
- «Безопасность горных работ»;
- «Экспертная деятельность в промышленной безопасности»;
- «Радиационная безопасность» (при использовании источников ионизирующего излучения в медицинских целях);
- «Радиационная безопасность» (при использовании источников ионизирующего излучения, в целях отличных от медицинских);
- «Основы обеспечения ядерной и радиационной безопасности» (для лиц, участвующих в обеспечении ядерной и радиационной безопасности при эксплуатации объектов использования атомной энергии);
- «Экспертиза безопасности в области использования атомной энергии» (для работников, оказывающих услуги по проведению экспертизы безопасности в области использования атомной энергии);
- «Проектирование пунктов хранения радиоактивных отходов»;
- «Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»;
- «Охрана труда»;
- «Защита от чрезвычайных ситуаций»;
- «Противодействие коррупции»;
- «Реагирование на инциденты с наличием химических, биологических, радиоактивных и ядерных веществ».

Обучающие курсы для лиц, имеющих профессионально-техническое и общее среднее образование, по образовательным программам:

- «Монтаж, наладка и техническое обслуживание систем пожарной автоматики»;
- «Техническое обслуживание систем пожарной автоматики»;
- «Выполнение работ с применением огнезащитных составов (исполнители работ)»;
- «Защита от чрезвычайных ситуаций».

Семинары по образовательным программам:

- «Оказание первой помощи пострадавшим в ЧС»;
- «Расчет предела огнестойкости (железобетонных, металлических, деревянных, каменных строительных конструкций»;
- «Расчет времени эвакуации людей при пожаре»;
- «Расчет температурного режима пожара в помещении»;
- «Расчет величины противопожарных разрывов между зданиями, сооружениями и наружными установками»;
- «Расчет площади легкобросываемых конструкций»;
- «Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»;
- «Порядок проектирования пассивной противопожарной защиты зданий различного назначения»;
- «Оптимизация затрат на обеспечение требований пожарной безопасности на основании расчетных методов»;
- «Охрана труда в организациях непромышленной сферы».

Подготовку лиц к поступлению в учреждения образования Республики Беларусь по учебным предметам: математика, физика, русский язык, белорусский язык, английский язык, немецкий язык, французский язык, история, обществоведение, химия (очная/дистанционная форма обучения).

Обучение проводит профессорско-преподавательский состав университета и ведущие специалисты Республики Беларусь в области пожарной и промышленной безопасности.

Наш адрес: 220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25,
ФЗО: тел/факс +37517 340-71-89,
ФБЖ: тел. +37517 340-69-55, факс +37517 340-35-58, email: fpipk@ucsp.by.

Дополнительная информация размещена на сайте университета: <http://ucsp.by>
в разделе «Повышение квалификации»

Научный журнал

Вестник
Университета гражданской защиты МЧС Беларуси
Том 10, № 2, 2026

Подписано в печать 27.05.2026.
Формат 60×84 ¹/₈.
Бумага офсетная. Цифровая печать.
Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 17,21. Уч.-изд. л. 15,83.
Тираж 35 экз. Заказ 023-2026.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты Министерства
по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/259 от 01.10.2025.
Ул. Машиностроителей, 25, 220118, Минск.