

СОДЕРЖАНИЕ

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Фогилев И. С., Чан Д. Ч.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ЛИСТЬЕВ БАНАНОВОГО ДЕРЕВА, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ КРОВЛИ ЖИЛЫХ СТРОЕНИЙ В СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ ВЬЕТНАМА3

Якубова Т. В., Шкуро А. Е., Плюснин Г. А., Хатыпов Д. А.

БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ АНТИПИРЕНЫ: КЛАССИФИКАЦИЯ, МЕХАНИЗМЫ ДЕЙСТВИЯ И ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ10

Гарелина С. А., Любкин Р. Н.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОЙ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МЕТОДИКИ ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ В МЧС РОССИИ27

Штерензон В. А., Худякова С. А., Али Е. Б., Шпаньков А. В.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ПОЖАРНОЙ АВТОМАТИКИ47

Молодоженцев П. В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ВЕЛИЧИН ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ62

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Петрова Е. Г.

ПРИРОДНЫЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОБЪЕКТАХ ТЕХНОСФЕРЫ73

Гарелина С. А.

АПРОБАЦИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ СТРАТЕГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ И МОНИТОРИНГА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ83

Глушков А. П.

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ MODIS100

Пичугин Л. М., Лавров В. Ю., Шабанова С. В., Абрамов А. Д.

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕРЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ109

CONTENTS

FIRE SAFETY

Ivan S. Fogilev, Chang Duc Chung

DETERMINATION OF THE CALORIFIC VALUE OF BANANA TREE LEAVES USED IN THE CONSTRUCTION OF RESIDENTIAL ROOFS IN RURAL VIETNAM3

Tatiana V. Yakubova, Alexey E. Shkuro, Grigory A. Plyusnin, Denis A. Khatypov

BIODEGRADABLE FLAME RETARDANTS: CLASSIFICATION, MECHANISMS OF ACTION AND ENVIRONMENTAL SAFETY ASSESSMENT10

Svetlana A. Garelina, Roman N. Lyubkin

PRACTICAL IMPLEMENTATION OF A COMPREHENSIVE RISK-BASED METHODOLOGY FOR SUBSTANTIATING THE RATIONAL PARAMETERS OF THE SYSTEM FOR ORGANIZING THE VERIFICATION OF MEASURING INSTRUMENTS IN THE MINISTRY OF EMERGENCY SITUATIONS OF RUSSIA27

Vera A. Shterenzon, Svetlana A. Khudyakova, Elena B. Ali, Andrey V. Shpankov

ANALYSIS OF THE RESULTS OF THE FIRE ALARM SYSTEMS OPERATION47

Pavel V. Molodozhentsev

DETERMINATION OF CALCULATED VALUES OF FIRE HAZARDS FOR ENERGY FACILITIES62

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

Elena G. Petrova

NATURAL FACTORS CAUSING EMERGENCY SITUATIONS AT TECHNOSPHERE FACILITIES73

Svetlana A. Garelina

APPROBATION OF A MULTIPARAMETRIC MODEL FOR OPTIMIZING WASTE RECYCLING AND MONITORING STRATEGIES AT INDUSTRIAL FACILITIES83

Alexey P. Glushkov

ALGORITHMIZATION OF SUPPORT FOR MANAGEMENT DECISION MAKING TO ENSURING SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS OF NATURAL AND MAN-MADE NATURE BASED ON MODIS DATA100

Leonid M. Pichugin, Valery Yu. Lavrov, Svetlana V. Shabanova, Alexander D. Abramov

INNOVATIVE MEASURES TO COUNTERACT EMERGENCIES AT ENTERPRISES109

УДК 614.84

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ЛИСТЬЕВ БАНАНОВОГО ДЕРЕВА, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ КРОВЛИ ЖИЛЫХ СТРОЕНИЙ В СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ ВЬЕТНАМА

Фогилев Иван Сергеевич, Чан Дык Чунг
Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. На протяжении нескольких лет проводятся исследования пожарной опасности жилых строений повышенной пожарной опасности, расположенных в сельских поселениях Вьетнама. Исследования связаны с проблемой возникновения пожаров в сельских поселениях и их каскадного развития по территории застройки. Большая часть рассматриваемых строений выполнена из горючих строительных материалов, способных самостоятельно гореть после удаления источника зажигания. Основой жилых строений служит каркас из бревен древесины, в основном из сосны, и кровли, выполненной из природного материала — листьев бананового дерева — или шифера, реже из других материалов.

В настоящее время отсутствуют данные о пожарной опасности листьев бананового дерева, в этой связи не представляется возможным провести качественное моделирование пожаров и их детальное исследование, чтобы предложить меры повышения пожарной безопасности в сельских населенных пунктах провинций Вьетнама.

В публикации представлены основные результаты проведенных лабораторных исследований показателя пожарной опасности — теплоты сгорания исследуемого материала: листьев бананового дерева, применяемых населением повсеместно при возведении кровли жилых строений в сельской местности Вьетнама. Результаты, полученные при проведении лабораторных экспериментов, будут использованы при моделировании развития опасных факторов пожаров жилых строений повышенной пожарной опасности.

Ключевые слова: листья бананового дерева, теплота сгорания, пожар, лабораторные эксперименты, жилые строения повышенной пожарной опасности

Для цитирования: Фогилев И. С., Чан Д. Ч. Определение теплоты сгорания листьев бананового дерева, применяемых при возведении кровли жилых строений в сельской местности Вьетнама // Техносферная безопасность. 2026. № 1 (50). С. 3–9.

DETERMINATION OF THE CALORIFIC VALUE OF BANANA TREE LEAVES USED IN THE CONSTRUCTION OF RESIDENTIAL ROOFS IN RURAL VIETNAM

Ivan S. Fogilev, Chang Duc Chung
SFA of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

Abstract. For several years, research has been conducted on the fire hazard of residential buildings with a high fire hazard located in rural settlements in Vietnam. The research focuses on the issue of fires in rural settlements and their cascading effects on the built-up area. Most of the buildings under consideration are made of combustible construction materials that can ignite on their own once the ignition source is removed. The residential buildings are typically constructed using a frame made of wooden logs, primarily pine logs, and a roof made of natural materials such as banana tree leaves or slate, although other materials are also used.

Currently, there is no data on the fire hazard of banana tree leaves, which makes it impossible to conduct a qualitative simulation of fires and their detailed study in order to propose measures to improve fire safety in rural settlements in Vietnam's provinces.

The publication presents the main results of laboratory studies on the fire hazard indicator, which is the heat of combustion of the material being studied: banana tree leaves, which are widely used by the local population for roofing residential buildings in rural areas of Vietnam. The results obtained from the laboratory experiments will be used in the simulation of the development of hazardous factors in residential buildings with high fire hazards.

Keywords: banana tree leaves, heat of combustion, fire, laboratory experiments, residential buildings with high fire hazards

For citation: Fogilev I. S., Chang D. Ch. Determination of the calorific value of banana tree leaves used in the construction of residential roofs in rural Vietnam // Technospheric safety. 2026. No. 1 (50). Pp. 3–9.

Введение

В ранее проведенных исследованиях [1, 2] определялись особенности строительства жилых строений в сельских поселениях Вьетнама. Особо стоит отметить высокую пожарную опасность веществ и материалов, используемых при возведении жилых строений. Важно подчеркнуть, что в настоящее время не все строительные материалы изучены с точки зрения пожарной опасности. Так, ни в одном открытом источнике нет информации о пожарной опасности листьев бананового дерева, используемого местным сельским населением при возведении кровли жилых строений в качестве строительного материала (рис. 1).

Для проведения исследований параметров развития пожаров в вышеуказанных объектах защиты необходимо провести его моделирование с применением современных программно-аппаратных комплексов (FDS, FireCat, Fenix+3), позволяющих выполнить эту задачу. Для выполнения моделирования развития пожаров на объектах исследования необходимо лабораторным способом получить показатель пожарной опасности листьев бананового дерева — теплоту сгорания.

Анализируя процессы протекания пожаров в жилых сооружениях с кровлей из листьев бананового дерева (открытые данные из интернет-источников), отметим, что пожар быстро распространяется по покрытие

из листьев, уничтожая в первую очередь кровлю жилища и оставляя в завершающей

фазе пожара лишь обгоревшие остатки опор сооружения (рис. 2) [3].



Рис. 1. Жилые сооружения с кровлей, выполненной из листьев бананового дерева, Вьетнам

Fig. 1. Residential buildings with roofs made of banana leaves, Vietnam



Рис. 2. Горение кровли из листьев бананового дерева

Fig. 2. Banana leaf roofing fire

Определение теплоты сгорания листьев бананового дерева

Высшая теплотворная способность исследуемого материала представляет меру возможного выделения количества теплоты в течение развитой стадии пожара и определяется в соответствии с требованиями государственного стандарта [4].

Теплота сгорания материалов определяется лабораторным путем с помощью калориметра сгорания. На рис. 3 представлена схема лабораторной установки для проведения исследований.

Лабораторная установка состоит из следующих основных частей: оболочка калори-

метра 6, крышка оболочки 2, калориметрический сосуд 5, калориметрическая бомба 7, термопара 4.

В состав вспомогательного оборудования входят миксер (мешалка) 1, система заполнения бомбы кислородом, регистратор времени, плавкая проволока, блок поджига с электродами 3.

Процесс сгорания осуществляется в закрытом реакционном сосуде при электрическом зажигании навески предварительно измельченного образца массой до 1,5 г в присутствии избытка кислорода. Определение показателя теплоты сгорания исследуемого образца материала производится по следующему принципу: измеряются

преобразования температуры калориметрического вещества, в которое погружена кало-

риметрическая бомба, в зависимости от временного периода протекающей реакции.

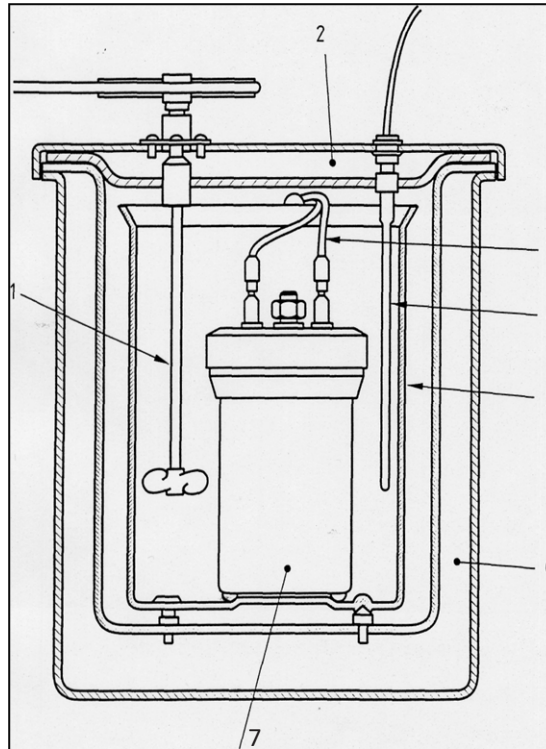


Рис. 3. Схематичное изображение установки-калориметра сгорания:
1 — мешалка; 2 — крышка оболочки; 3 — электроды; 4 — термопара; 5 — калориметрический сосуд;
6 — оболочка калориметра; 7 — калориметрическая бомба

Fig. 3. General view and diagram of the combustion calorimeter setup:
1 — stirrer; 2 — shell lid; 3 — electrodes; 4 — thermocouple; 5 — calorimeter vessel; 6 — calorimeter shell;
7 — calorimeter bomb

С учетом водного эквивалента калориметра, поправок на добавленное топливо и тепловые потери экспериментальным путем определяется значение высшей теплотворной способности PCS ли-

ствьев бананового дерева, исчисляемой в МДж/кг. На рис. 4 представлено изображение калориметра сгорания, используемого при проведении лабораторных испытаний.



Рис. 4. Промышленный калориметр сгорания, предназначенный для проведения лабораторных исследований

Fig. 4. Industrial combustion calorimeter for laboratory research

Процедура проведения лабораторных исследований

Первый этап — подготовка исследуемого материала. Для проведения лабораторных экспериментов заблаговременно были подготовлены образцы банановых листьев. Предварительно образцы листьев бананового дерева кондиционировались в помещении в течение 72 ч при температуре воздуха 20 °С и относительной влажности в 65 %.

Далее образцы помещались в калориметрическую бомбу, которая впоследствии заполнялась кислородом до заданного значения.

Второй этап. В лабораторную установку подавалось напряжение на электроды зажи-

гания и осуществлялось зажигание образца листьев бананового дерева. Затем объем (количество) тепла, высвободившегося в процессе горения образца исследуемого вещества (теплота сгорания материала или его теплотворная способность), был определен на основе результатов измерения температуры жидкости в калориметрическом сосуде после завершения протекания в калориметрической бомбе химической реакции.

За конечный результат экспериментальных исследований принималась среднеарифметическая величина теплоты сгорания образцов вещества (материала) в серии проведенных опытных исследований.

Результаты экспериментального определения теплоты сгорания представлены в таблице.

Таблица

Экспериментальное определение теплоты сгорания листьев бананового дерева, масса образца — 0,28 г

Table

Experimental determination of the heat of combustion of banana tree leaves, sample weight — 0,28 g

№ опыта, <i>i</i> Experience number, <i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q_p , МДж/кг Q_p , MJ/kg	17,29	17,47	17,40	17,35	17,41	17,46	17,37	17,43	17,42	17,30

В результате проведенных лабораторных исследований по определению теплоты сгорания листьев бананового дерева получены значения от 17,29 до 17,47 МДж/кг.

Усредненное значение теплоты сгорания листьев бананового дерева по результатам серии проведенных экспериментальных исследований будет равно:

$$Q = \sum Q_i / i ,$$

$$Q = 17,39 \text{ МДж/кг.}$$

Выводы

В результате проведенных лабораторным путем экспериментальных исследований получен показатель теплоты сгорания листьев бананового дерева, равный 17,39 МДж/кг.

В сравнении с ранее полученными показателями для различных веществ и материалов значение теплоты сгорания бананового листа близко к показателям: ледерина (кожзаменитель, 17,7 МДж/кг), линолеума (поливинилхлоридный двух-

слойный, 17,91 МДж/кг), мипора (пенопласт, 17,6 МДж/кг) [5], хлопка в тюках (16,7 МДж/кг) [6], бумажно-слоистого пластика (18 МДж/кг) [7].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чан Д. Ч., Фогилев И. С., Андросенко С. Г. Классификации зданий и сооружений в области пожарной безопасности во Вьетнаме // Ройтмановские чтения : сборник материалов XII научно-практической конференции. М., 2024. С. 165–169.
2. Чан Д. Ч., Фогилев И. С. Влияние застройки сельских населенных пунктов Вьетнама на состояние пожарной безопасности поселений // Сборник трудов секции № 9 XXXIV Международной научно-практической конференции «Предотвращение. Спасение. Помощь». Химки, 2024. С. 183–189.
3. Обобщенный отчет по работе пожарной охраны провинции Хазянг 2016 г. Хазянг, 2016. 5 с. URL: <https://clck.ru/3Rm7bP> (дата обращения: 10.01.2026).
4. ГОСТ Р 56025–2014. Материалы строительные. Метод определения теплоты сгорания. М., 2019. 13 с.
5. Пособие по применению НПБ 105–95 «Определение категорий помещений и зданий по взрывоопасной и пожарной опасности» при рассмотрении проектно-сметной документации / Ю. Н. Шебеко [и др.]. М., 1998. 119 с.
6. Пособие по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов / Д. М. Гордиенко [и др.]. М., 2012. 242 с.
7. Тербнев В. В. Справочник руководителя тушения пожара. Тактические возможности пожарных подразделений. М., 2004. 248 с.

REFERENCES

1. Chang D. C., Fogilev I. S., Androsenko S. G. Classifications of Buildings and Structures in the Field of Fire Safety in Vietnam // Roitman Readings : Collection of Materials from the XII Scientific and Practical Conference. Moscow, 2024. Pp. 165–169.
2. Chang D. C., Fogilev I. S. The Influence of the Development of Rural Settlements in Vietnam on the Fire Safety of Settlements // Collection of Papers of Section No. 9 of the XXXIV International Scientific and Practical Conference. Khimki, 2024. Pp. 183–189.
3. Summary report on the work of the Hazyang Province Fire Department. 2016. Khazyang, 2016, 5 p. URL: <https://clck.ru/3Rm7bP> (accessed 10.01.2026).
4. GOST R 56025–2014. Construction Materials. Method for Determining the Heat of Combustion. Moscow, 2019. 13 p.
5. Guidelines for Applying NPB 105-95 'Determination of Categories of Rooms and Buildings for Explosive and Fire Hazards' When Reviewing Design and Estimation Documentation / Yu. N. Shebeko et al. Moscow, 1998. 119 p.

6. Guidelines for Determining Fire Risk Estimates for Industrial Facilities / D. M. Gordienko et al. Moscow, 2012. 242 p.

7. Terebnev V. V. Handbook of the Fire Fighting Manager. Tactical Capabilities of Fire Units. Moscow, 2004. 248 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фогилев Иван Сергеевич, канд. техн. наук, профессор кафедры пожарной тактики и службы УНК пожаротушения Академии ГПС МЧС России (129366, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4); ORCID: 0000-0003-2058-5758; SPIN-код: 6792-0626; AuthorID: 972535; e-mail: galich_ivan@mail.ru

Чан Дык Чунг, выпускник адъюнктуры Института подготовки иностранных граждан Академии ГПС МЧС России (129366, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4); ORCID: 0000-0003-2375-9143; SPIN-код: 9011-9507; AuthorID: 1196018; e-mail: tranductrung56@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan S. Fogilev, Cand. Sci. (Eng.), Professor, Department of Fire Tactics and Service of the Fire Fighting Training and Research Complex of Fire Safety in Construction SFA of EMERCOM of Russia (4 Borisa Galushkina St., Moscow, 129366, Russian Federation); ORCID: 0000-0003-2058-5758; SPIN-code: 6792-0626; AuthorID: 972535; e-mail: galich_ivan@mail.ru

Chang Duc Chung, graduate of the Institute of Training of Foreign Citizens of Fire Safety in Construction SFA of EMERCOM of Russia (4 Borisa Galushkina St., Moscow, 129366, Russian Federation); ORCID: 0000-0003-2375-9143; SPIN-code: 9011-9507; AuthorID: 1196018; e-mail: tranductrung56@gmail.com

УДК 678.046:628.477

БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ АНТИПИРЕНЫ: КЛАССИФИКАЦИЯ, МЕХАНИЗМЫ ДЕЙСТВИЯ И ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Якубова Татьяна Валерьевна¹, Шкуро Алексей Евгеньевич², Плюснин Григорий Александрович¹, Хатыпов Денис Акрамович¹

¹ Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

² Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. Обзор посвящен актуальной проблеме разработки и применения биоразлагаемых антипиренов как экологичной альтернативы традиционным огнезащитным составам. Рассмотрены основные классы таких антипиренов, включая биополимеры (лигнин, хитозан, ДНК, фитиновая кислота), модифицированные природные соединения и синтетические биоразлагаемые системы. Подробно описаны механизмы их огнезащитного действия в конденсированной и газовой фазах, а также важность синергетических эффектов при комбинировании различных компонентов. Особое внимание уделено методам оценки биоразлагаемости и экотоксичности, соответствующим международным стандартам (OECD, ISO), и сложностям, связанным с влиянием полимерной матрицы и условий окружающей среды. Проанализированы ключевые преимущества биоразлагаемых антипиренов, такие как снижение долговременного экологического риска и соответствие принципам «зеленой» химии, а также их недостатки, включая сравнительно более низкую эффективность, проблемы совместимости с полимерами и высокую стоимость. Описаны перспективные области применения в строительстве, текстильной промышленности, электронике, транспорте и упаковке. Отмечены современные тренды развития, такие как интеллектуальный дизайн молекул, использование нанотехнологий и биоинженерии. Подчеркнута необходимость междисциплинарного подхода для успешной разработки и внедрения данных материалов, отвечающих требованиям пожарной безопасности и устойчивого развития.

Ключевые слова: биоразлагаемые антипирены, экологичная огнезащита, «зеленые» антипирены, пожарная безопасность полимеров, возобновляемое сырье, механизмы огнезащиты, синергизм антипиренов, экотоксичность

Для цитирования: Биоразлагаемые антипирены: классификация, механизмы действия и оценка экологической безопасности / Т. В. Якубова [и др.] // Техносферная безопасность. 2026. № 1 (50). С. 10–26.

BIODEGRADABLE FLAME RETARDANTS: CLASSIFICATION, MECHANISMS OF ACTION AND ENVIRONMENTAL SAFETY ASSESSMENT

Tatiana V. Yakubova¹, Alexey E. Shkuro², Grigory A. Plyusnin¹, Denis A. Khatypov¹

¹ Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation

² Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russian Federation

Abstract. This review focuses on the pressing issue of developing and using biodegradable flame retardants as an environmentally friendly alternative to traditional flame retardants. The main classes of such flame retardants are considered, including biobased polymers (lignin, chitosan, DNA, phytic acid), modified natural compounds, and synthetic biodegradable systems. The mechanisms of their flameretardant action in the condensed and gas phases are described in detail, as well as the importance of synergistic effects when combining various components. Particular attention is paid to methods for assessing biodegradability and ecotoxicity in accordance with international standards (OECD, ISO), and the complexities associated with the influence of the polymer matrix and environmental conditions. The key advantages of biodegradable flame retardants, such as reduced longterm environmental risk and compliance with green chemistry principles, are analyzed, as well as their disadvantages, including comparatively lower efficiency, compatibility issues with polymers, and high cost. Promising applications in construction, textiles, electronics, transportation, and packaging are described. Current development trends, such as intelligent molecular design, nanotechnology, and bioengineering, are highlighted. The need for an interdisciplinary approach is emphasized for the successful development and implementation of these materials, which meet fire safety and sustainable development requirements.

Keywords: biodegradable flame retardants, environmentally friendly fire protection, green flame retardants, fire safety of polymers, renewable raw materials, fire protection mechanisms, flame retardant synergy, ecotoxicity

For citation: Biodegradable flame retardants: classification, mechanisms of action and environmental safety assessment / T. V. Yakubova et al. // Technospheric safety. 2026. No. 1 (50). Pp. 10–26.

Введение

Современная жизнь немыслима без полимерных материалов, которые находят применение в строительстве, электронике, транспорте и упаковке. Однако их повсеместное использование сопряжено с серьезной опасностью — большинство полимеров являются горючими, что создает постоянную угрозу возникновения пожаров [1]. Для повышения пожарной безопасности в материалы вводят антипирены — добавки, подавляющие горение. Традиционные антипирены, такие как галогенированные и некоторые виды

фосфорорганических соединений, доказали свою высокую эффективность. Однако за нее пришлось заплатить высокую экологическую цену: эти вещества обладают высокой стойкостью в окружающей среде, склонны к биоаккумуляции и проявляют потенциальную токсичность для человека и экосистем, включая эндокринные нарушения и канцерогенность [2–5].

В связи с вышеизложенным, ключевой задачей современного материаловедения и химии становится разработка новых поколений антипиренов, сочетающих в себе высокую противопожарную эффективность с пониженной экотоксичностью и способностью

к биоразложению в окружающей среде после окончания срока службы изделия.

Целью данного обзора является систематизация и анализ современных научных разработок в области биоразлагаемых антипиренов. В работе рассматриваются их основные классы и химические принципы конструирования, подробно разбираются механизмы огнезащитного действия, оцениваются методы тестирования биоразлагаемости и экотоксичности. Также в статье обобщены преимущества и недостатки этих материалов, перспективные области их применения и обозначены ключевые тенденции и прогнозы дальнейшего развития данной динамично развивающейся области знаний.

Классификация и типы биоразлагаемых антипиренов

Разработка биоразлагаемых антипиренов ведется по нескольким ключевым направлениям, которые систематизируются в зависимости от их происхождения и химической структуры. Основная классификация подразумевает деление на три крупных класса: антипирены, полученные из возобновляемого сырья, минеральные антипирены с низкой токсичностью и синтетические антипирены, спроектированные для биоразложения [6, 7].

Принципы создания биоразлагаемых антипиренов базируются на нескольких фундаментальных подходах. Первый подход заключается во введении в молекулу антипирена легко гидролизуемых или биоразлагаемых химических связей, неустойчивых к воздействию воды, микроорганизмов или ферментов. Наиболее распространенными являются сложноэфирные, амидные и пептидные связи, которые легко разры-

ваются в природных условиях. Второй принцип предполагает использование природного, возобновляемого сырья в качестве исходных веществ, что снижает зависимость от ископаемых ресурсов. Третий важный аспект — минимизация содержания токсичных элементов, таких как галогены и тяжелые металлы. Кроме того, идеальный антипирен должен распадаться на простые нетоксичные соединения, которые легко ассимилируются в окружающей среде [7, 8].

Среди основных классов биоразлагаемых антипиренов выделяют биополимеры с собственной огнестойкостью. К ним относятся лигнин и его производные, способные при нагревании образовывать прочный пористый углеродный слой. Хитозан и хитин действуют по комбинированному механизму, способствуя образованию угля и выделению негорючих газов. ДНК представляет собой интеллектуальную систему огнезащиты, где фосфатные группы способствуют обугливанию, а азотистые основания выделяют аммиак, ингибирующий пламя. Фитиновые кислоты и фитаты, богатые фосфором, катализируют дегидратацию полимерной матрицы, а танины легко карбонизируются с образованием стабильного углеродного барьера. Крахмал и его производные часто используются как углеродный источник в синергистических системах, а белки способствуют вспучиванию и образованию угля. Классификация биоразлагаемых антипиренов и их основные представители обобщены в табл. 1 [7–11].

Особую группу составляют антипирены на основе модифицированных природных соединений — это соединения, полученные путем химической модификации природных молекул для усиления их огнезащитных свойств [7, 8]. Фосфорсодержащие

антипирены включают производные фосфорной кислоты, синтезированные из биомассы, такие как фосфорилированные полисахариды и липиды. Азотсодержащие антипирены представлены производными аминокислот, гуанидином и его солями.

Минеральные антипирены с низкой токсичностью занимают особое положение. Хотя сами неорганические соединения не являются биоразлагаемыми в классическом понимании, они считаются экологически приемлемыми благодаря низкой токсичности и часто используются в биоразлагаемых полимерных матрицах. Гидроксиды металлов, такие как гидроксид алюминия и гидроксид магния, действуют по эндотермическому механизму, поглощая тепло и выделяя пары воды. Фосфаты аммония и меламин действуют в газовой фазе, выделяя ингибирующие горение газы и способствуя образованию защитного слоя.

Кремнийорганические соединения, включая силиконы и силаны, могут быть спроектированы с улучшенной биоразлагаемостью и образуют стабильный силикатный барьер при нагревании.

Синтетические биоразлагаемые антипирены представляют собой соединения, целенаправленно синтезированные для обеспечения биоразложения. К ним относятся биоразлагаемые полифосфаты на основе молочной кислоты, которые сочетают механизм действия фосфора со способностью к гидролитическому разложению. В состав сложных эфиров фосфорных кислот входят легко гидролизуемые связи, обеспечивающие их распад на нетоксичные компоненты. Синтетические полимеры со встроенными сегментами содержат как биоразлагаемые звенья, так и огнезащитные функциональные группы, что позволяет создавать эффективные и экологически безопасные системы [11].

Таблица 1
Классификация биоразлагаемых антипиренов, их примеры и механизмы действия

Table 1
Classification of biodegradable flame retardants, their examples and mechanisms of action

Класс Class	Примеры Examples	Механизм действия Mechanism of Action
Биополимеры с собственной огнестойкостью Biopolymers with inherent fire resistance	Лигнин и его производные; хитозан, хитин; ДНК; фитиновая кислота и фитаты; танины; крахмал; белки; наноцеллюлоза Lignin and its derivatives; chitosan, chitin; DNA; phytic acid and phytates; tannins; starch; proteins; nanocellulose	Образование углеродного барьера; выделение негорючих газов (H_2O , NH_3 , CO_2); катализ дегидратации; усиление углеобразования за счет наноструктур Formation of a carbon barrier; release of non-combustible gases (H_2O , NH_3 , CO_2); catalysis of dehydration; enhancement of carbon formation due to nanostructures
Модифицированные природные соединения Modified natural compounds	Фосфорилированные полисахариды; липиды; производные аминокислот; гуанидин и его соли; фосфорилированная наноцеллюлоза Phosphorylated polysaccharides; lipids; amino acid derivatives; guanidine and its salts; phosphorylated nanocellulose	Усиление углеобразования и газовой фазы ингибирования; введение фосфор- и азотсодержащих групп; повышение термостабильности Enhancement of carbon formation and gas-phase inhibition; introduction of phosphorus- and nitrogen-containing groups; increase in thermal stability

Окончание таблицы 1

Класс Class	Примеры Examples	Механизм действия Mechanism of Action
Минеральные антипирены с низкой токсичностью Low toxicity mineral fire retardants	Гидроксид алюминия; гидроксид магния; фосфаты аммония и меламина; силиконы и силаны; глины, слоистые силикаты, цеолиты Aluminum hydroxide; magnesium hydroxide; ammonium and melamine phosphates; silicones and silanes; clays, layered silicates, zeolites	Эндотермическое поглощение тепла; выделение воды и негорючих газов; образование силикатного/фосфатного барьера; синергизм с биополимерами Endothermic heat absorption; release of water and non-flammable gases; formation of silicate/phosphate barrier; synergism with biopolymers
Синтетические биоразлагаемые антипирены Synthetic biodegradable flame retardants	Полифосфаты на основе молочной кислоты; сложные эфиры фосфорных кислот; синтетические полимеры с биоразлагаемыми сегментами; био-базирующиеся меламино-фосфатные системы; биофосфонаты Lactic acid-based polyphosphates; phosphoric acid esters; synthetic polymers with biodegradable segments; biobased melamine phosphate systems; biophosphonates	Гидролитическое разложение; выделение фосфорсодержащих ингибиторов пламени; образование вспученного углеродного слоя Hydrolytic decomposition; release of phosphorus-containing flame retardants; formation of an expanded carbon layer

Механизмы огнезащиты биоразлагаемых антипиренов

Механизмы огнезащитного действия биоразлагаемых антипиренов представляют собой сложный комплекс физико-химических процессов, направленных на подавление горения на различных стадиях [12]. По характеру воздействия их традиционно разделяют на механизмы, реализующиеся в конденсированной и газовой фазах, хотя многие биоразлагаемые системы демонстрируют комбинированное действие.

В конденсированной фазе ключевым механизмом является образование стабильного термоизолирующего слоя кокса, угля или золы на поверхности материала. Такой барьер эффективно препятствует проникновению тепла к глубинам материала и затрудняет выход летучих горючих продуктов пиролиза в зону пламени [12]. Например, лигнин, танины и фитаты при термическом разложении карбонизируют

ся, формируя прочный пористый углеродный скелет [13, 14]. ДНК, разлагаясь, выделяет фосфатные группы, которые катализируют реакции дегидратации и структурирования углеродного слоя [15, 16]. Минеральные наполнители, такие как гидроксиды алюминия и магния, также способствуют образованию защитного зольного слоя [12].

Механизмы, реализующиеся в газовой фазе, направлены на ингибирование цепных реакций горения в пламени. Многие биоразлагаемые антипирены при разложении выделяют негорючие газы, такие как водяной пар (H_2O), аммиак (NH_3) или диоксид углерода (CO_2). Эти газы разбавляют концентрацию горючих летучих веществ, поступающих из материала, снижая тем самым скорость горения и тепловыделение. Фосфорсодержащие соединения, включая фитиновую кислоту и различные фосфаты, выделяют в газовую фазу активные радикалы PO и PO_2 , которые эффективно обрывают

цепные реакции окисления, связывая высокоэнергетичные радикалы $H\cdot$ и $OH\cdot$, ответственные за распространение пламени [15–16].

Важную роль играют эндотермические процессы разложения самих антипиренов [12]. Гидроксиды металлов и некоторые гидратированные соединения поглощают значительное количество тепловой энергии в процессе своего разложения, что приводит к охлаждению материала и замедлению его пиролиза. Этот эффект до-

полнительно способствует торможению процесса горения.

Особого внимания заслуживает капля-эффект (*dripping effect*, рис. 1), характерный для кремнийорганических соединений. Некоторые силиконы и силаны [17], имеющие потенциал к биodeградации, при нагревании мигрируют к поверхности полимера, плавятся и образуют сплошной непроницаемый силикатный слой. Этот слой действует как барьер, препятствующий переносу тепла и массы.

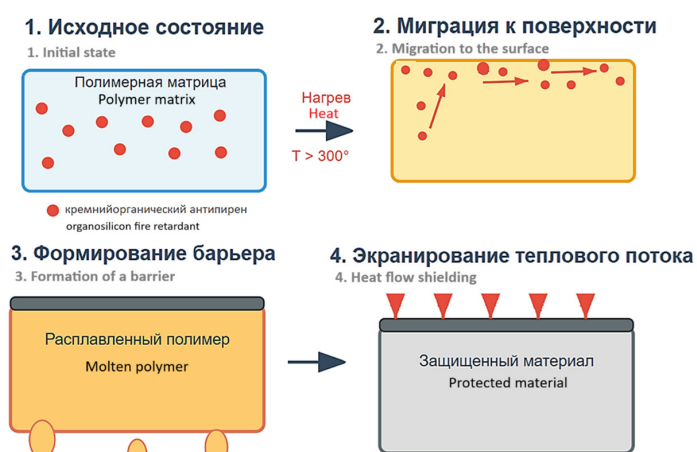


Рис. 1. Схема капля-эффекта, характерного для кремнийорганических антипиренов
Fig. 1. Diagram of the droplet effect characteristic of organosilicon flame-retardants

Критическое значение для эффективности биоразлагаемых антипиренов имеет синергизм — комбинированное использование различных типов добавок, которое приводит к усилению огнезащитного действия, превышающему простую сумму эффектов от каждого компонента в отдельности. Классическими примерами синергичных пар являются комбинации: фосфор — азот и фосфор — кремний. Азотсодержащие соединения (меламин, гуанидин, хитозан) при нагревании выделяют аммиак, который реагирует с фосфорсодержащими компонентами, способствуя вспучиванию образующегося углеродного слоя и формированию более прочного и толстого коксового барьера.

Сочетание биоосновного (*bio-based*) антипирена с минеральным наполнителем часто позволяет значительно снизить общую нагрузку добавок в полимере, сохраняя при этом высокие огнезащитные свойства и улучшая экологический профиль материала. Таким образом, синергизм является мощным инструментом для создания высокоэффективных и экологических огнезащитных систем.

Оценка биоразлагаемости и экотоксичности

Комплексная оценка экологической безопасности биоразлагаемых антипиренов требует проведения двух взаимосвязанных видов исследований: анализа их способности

к разложению в окружающей среде и определения потенциального токсического воздействия на живые организмы [18].

Для определения биоразлагаемости разработан ряд стандартизированных методов тестирования (табл. 2). Международные стандарты OECD серии 301 (A–F) оценивают готовность к биоразложению в водной среде путем измерения потребления кислорода, выделения диоксида углерода или удаления растворенного органического углерода [19]. Стандарты ISO 14851 и 14852 специфицируют методы определения потребления кислорода в закрытом респирометре и анализа выделения углекислого газа соответственно. Для оценки разложения в почве применяются специальные почвенные тесты, моделирующие естественные условия. Ключевыми параметрами при оценке биоразлагаемости являются степень разложения в процентах, время достижения определенного уровня разложения и идентификация промежуточных продуктов распада.

Оценка экотоксичности включает тестирование воздействия на различные уровни водных и наземных экосистем. Стандартные тесты проводятся на дафниях (*Daphnia magna*) для оценки острой и хронической токсичности, на водорослях — для определения ингибирования роста, на рыбах — для анализа токсического воздействия. Для оценки воздействия на почвенные экосистемы используются тесты с дождевыми червями и почвенными микроорганизмами. Особое внимание уделяется оценке генотоксичности с помощью теста Эймса и других методов, выявляющих мутагенные свойства веществ и продуктов их распада [20].

Проведение корректной оценки связано с рядом методологических сложностей. Значительное влияние на результаты тестов

оказывает полимерная матрица, в которую введен антипирен, поскольку она может изменять доступность вещества для микроорганизмов и скорость его высвобождения. Условия окружающей среды, такие как температура, pH и состав микробного сообщества, также существенно влияют на процессы биодеградации. Отдельной проблемой является разработка адекватных методов экстракции антипирена из готового изделия для проведения тестирования, поскольку традиционные методы могут не отражать реальную доступность вещества в окружающей среде [20–21].

Соответствие экологическим стандартам и требованиям является важным аспектом внедрения биоразлагаемых антипиренов. Производители стремятся получить экологические сертификаты и маркировки, такие как *EcoLabel*, *Cradle to Cradle*, которые подтверждают безопасность и экологичность продукции. Однако отсутствие единых стандартов и протоколов, специфических для «зеленых» антипиренов, создает дополнительные вызовы для производителей и исследователей [22].

Таким образом, комплексный подход к оценке биоразлагаемости и экотоксичности является необходимым условием для разработки и успешного внедрения экологически безопасных антипиренов, соответствующих принципам устойчивого развития и «зеленой» химии.

Преимущества и недостатки биоразлагаемых антипиренов

Биоразлагаемые антипирены представляют собой перспективную альтернативу традиционным огнезащитным составам, однако их внедрение сопровождается как значительными преимуществами, так и определенными ограничениями [23].

Таблица 2
Основные стандартизированные методы оценки биоразлагаемости
и экотоксичности биоразлагаемых антипиренов [19–22]

Table 2
 Main standardized methods for assessing the biodegradability
 and ecotoxicity of biodegradable flame retardants [19–22]

Направление оценки Evaluation Direction	Метод/стандарт Method/Standard	Объект тестирования Test Object	Основной параметр Main parameter
Биоразлагаемость в водной среде Biodegradability in aquatic environments	OECD 301 (A–F)	Водная среда, микроорганизмы Aquatic environment, microorganisms	Потребление O ₂ , выделение CO ₂ , снижение содержания DOC ¹ O ₂ consumption, CO ₂ emission, DOC reduction
	ISO 14851	Вода, закрытый респирометр Water, closed respirometer	Потребление кислорода Oxygen consumption
	ISO 14852	Вода, анализ выделившегося газа Water, analysis of released gas	Количество CO ₂ Amount of CO ₂
Биоразлагаемость в почве Biodegradability in soil	OECD 307, ISO 17556	Почвенные микробные сообщества Water, analysis of released gas	Степень минерализации, скорость деградации Degree of mineralization, rate of degradation
Экотоксичность (водные экосистемы) Ecotoxicity (aquatic ecosystems)	OECD 202	Дафнии (<i>Daphnia magna</i>) <i>Daphnia (Daphnia magna)</i>	Острая и хроническая токсичность Acute and chronic toxicity
	OECD 201	Водоросли Seaweed	Ингибирование роста Growth inhibition
	OECD 203	Рыбы Fish	Токсичность, смертность Toxicity, mortality
Экотоксичность (почвенные экосистемы) Ecotoxicity (soil ecosystems)	OECD 207	Дождевые черви Earthworms	Летальность, поведение Lethality, behavior
	ISO 11268	Почвенные микроорганизмы Soil microorganisms	Метаболическая активность Metabolic activity
Генотоксичность Genotoxicity	Тест Эймса Ames test	Бактерии (<i>Salmonella typhimurium</i>) Bacteria (<i>Salmonella typhimurium</i>)	Мутагенный потенциал Mutagenic potential

Ключевым преимуществом биоразлагаемых антипиренов является существенное снижение долгосрочного экологического риска. Способность к разложению в окружающей среде предотвращает их накопление в экосистемах и минимизирует негативное воздействие на природные объекты.

¹ DOC — растворенный органический углерод.

Многие из этих соединений демонстрируют потенциально меньшую токсичность для человека и биоты, особенно при использовании компонентов природного происхождения. Важным аспектом является использование возобновляемого сырья, что снижает зависимость от ископаемых ресурсов и соответ-

ствуется принципам устойчивого развития. Соответствие современным экологическим требованиям и трендам в области «зеленой» химии открывает дополнительные возможности для применения этих материалов в регулируемых отраслях. Кроме того, биоразлагаемые антипирены обладают потенциалом для интеграции в замкнутые производственные циклы, обеспечивая возможность безопасного разложения в конце жизненного цикла изделий [23–26].

Несмотря на экологические преимущества, биоразлагаемые антипирены обладают рядом существенных недостатков. Наиболее значительным ограничением является их эффективность, которая часто уступает традиционным аналогам при одинаковой массовой доле в полимерной матрице, что требует применения более высоких концентраций для достижения сопоставимых показателей огнестойкости. Серьезной проблемой остается совместимость с полимерными материалами, проявляющаяся в трудностях достижения хорошей дисперсности, склонности к миграции на поверхность и негативном влиянии на механические свойства готовых изделий. Стабильность при переработке и эксплуатации представляет еще один вызов, поскольку существует риск преждевременного разложения антипиренов при высоких температурах обработки или под действием УФ-излучения и влаги. Стоимость биоразлагаемых антипиренов часто превышает цену традиционных решений, особенно для сложных многокомпонентных систем, что ограничивает их коммерческое применение [23–25].

Дополнительной сложностью является достижение комплексных требований, включающих одновременное обеспечение высокой огнестойкости, сохранение меха-

нических характеристик, технологичность переработки, гарантированную биоразлагаемость и низкую экотоксичность. Отсутствие единых стандартов для оценки «зеленых» антипиренов создает неопределенность для производителей и затрудняет объективное сравнение различных продуктов. Влияние полимерной матрицы на процесс биоразложения также требует дополнительного изучения, поскольку скорость и механизм разложения могут значительно варьироваться в зависимости от типа основного материала [23–26].

Таким образом, несмотря на очевидные экологические преимущества, широкое внедрение биоразлагаемых антипиренов сдерживается технологическими и экономическими ограничениями, что требует дальнейших исследований и оптимизации их состава и свойств.

Области применения биоразлагаемых антипиренов

Биоразлагаемые антипирены (рис. 2) находят применение в различных отраслях промышленности (рис. 3), где сочетание требований пожарной безопасности и экологической совместимости становится критически важным. Их использование особенно востребовано в секторах, ориентированных на принципы устойчивого развития и экономики замкнутого цикла [11].

В строительной отрасли и производстве изоляционных материалов биоразлагаемые антипирены применяются для повышения огнестойкости пенополиуретановых (ППУ) и пенополиизоциануратных (ПИР) пенопластов, используемых в качестве теплоизоляции. Они также востребованы при производстве древесно-полимерных композитов (ДПК) для наружного

и внутреннего использования, а также для огнезащитной обработки текстильных уте-

плителей и натуральных строительных материалов [12].

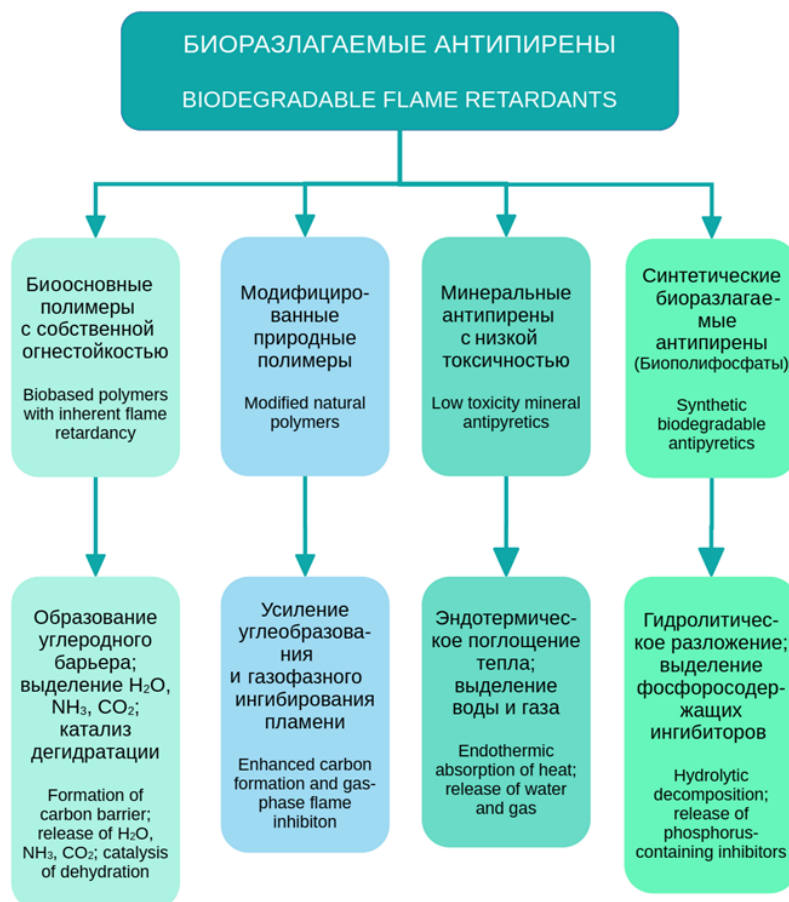


Рис. 2. Классификация биоразлагаемых антипиренов

Fig. 2. Applications of biodegradable flame retardants

Текстильная промышленность представляет значительный потенциал для применения биоразлагаемых антипиренов. Они используются для огнезащитной отделки натуральных тканей на основе хлопка и льна, а также нетканых материалов [27]. Основные области применения включают производство специализированной рабочей одежды для пожароопасных производств, домашнего текстиля (шторы, ковры, мебельные ткани) и интерьерных решений для общественных пространств.

В электронике и электротехнике биоразлагаемые антипирены находят ограниченное, но растущее применение. Они используются при производстве оболочек кабелей и про-

водов, где требования к экологической безопасности особенно важны. Для корпусов электронных устройств их применение сдерживается требованиями термостабильности, но активно исследуется для устройств с невысокими тепловыми нагрузками [11].

Автомобильная промышленность и транспорт в целом демонстрируют растущий интерес к биоразлагаемым антипиренам. Они применяются при производстве деталей интерьера транспортных средств, где особенно ценным является свойство снижения токсичности газов, выделяемых при горении. Это соответствует ужесточающимся требованиям к безопасности пассажиров и экипажа в случае возгорания [24].

Упаковочная отрасль представляет особый интерес для применения биоразлагаемых антипиренов. Производители упаковки сталкиваются с противоречивыми требованиями: с одной стороны, необходимо обеспечить огнестойкость при хранении и транспортировке, с другой — соблюсти требования экологической безопасности и возможности утилизации. Биоразлагаемые антипирены позволяют создавать упаковочные материалы, соответствующие указанным требованиям [9].

Перспективной областью применения является аддитивное производство (3D-печать). Разрабатываются специальные огнезащит-

ные биоразлагаемые филаменты на основе полилактида (ПЛА) и других биополимеров, которые могут использоваться для печати конструкций, требующих определенного уровня огнестойкости. Это направление особенно актуально для прототипирования и производства специализированных изделий [25].

Во всех этих областях применение биоразлагаемых антипиренов не только улучшает экологический профиль продукции, но и соответствует растущему потребительскому спросу на устойчивые и безопасные материалы, а также нормативным требованиям в области охраны окружающей среды и здоровья человека.



Рис. 3. Сферы применения биоразлагаемых антипиренов

Fig. 3. Applications of biodegradable flame retardants

Перспективы биоразлагаемых антипиренов

Развитие биоразлагаемых антипиренов характеризуется динамичным ростом и междисциплинарным подходом, объединяющим достижения химии, материаловедения и биотехнологий. Ключевым трендом становится

интеллектуальный дизайн молекул с заданными свойствами — высокой огнезащитной эффективностью и контролируемой биоразлагаемостью. Исследования в этой области направлены на создание «умных» систем, способных сохранять стабильность в процессе эксплуатации и быстро разлагаться после окончания срока службы изделия [6–11, 21–23].

Значительный потенциал связан с применением нанотехнологий. Наночастицы, такие как слоистые двойные гидроксиды (ЛДГ), наноглина и производные целлюлозы, демонстрируют синергетический эффект в комбинации с органическими антипиренами, позволяя снизить общую нагрузку добавок и улучшить механические свойства композитов. Нановолокна на основе хитина и целлюлозы не только повышают огнестойкость, но и способствуют биоразлагаемости материала.

Биоинженерия открывает новые возможности для получения экологичных антипиренов. Ферментативный синтез позволяет создавать сложные молекулы с высокой селективностью и минимальным образованием побочных продуктов. Использование генетически модифицированных микроорганизмов для производства биологических прекурсоров антипиренов представляет собой перспективное направление, способное снизить стоимость и увеличить доступность этих материалов [10, 23, 24].

Разработка многофункциональных покрытий становится отдельным значимым трендом. Современные исследования направлены на создание систем, сочетающих огнезащитные свойства с антимикробной активностью, гидрофобностью и самоочищающейся способностью. Такие решения особенно востребованы в медицине, строительстве и производстве специализированного текстиля [27].

Особое внимание уделяется разработке систем с управляемым сроком службы и биоразложением. Химически модифицированные антипирены, чувствительные к определенным факторам окружающей среды (рН, температура, наличие специфических ферментов), позволяют контролировать

процесс деградации материала после его вывода из эксплуатации [23, 25, 26].

Рыночные прогнозы указывают на устойчивый рост сегмента биоразлагаемых антипиренов, обусловленный ужесточением экологического законодательства и изменением потребительских предпочтений. Ожидается, что в ближайшие пять лет ежегодный рост этого рынка составит 8–12%. Основной фокус разработок будет сосредоточен на достижении оптимального баланса между эффективностью, стоимостью и экологической безопасностью [25, 26].

Развитие стандартизации и сертификации «зеленых» антипиренов станет определяющим фактором для их широкого внедрения. Международные организации активно работают над созданием единых протоколов тестирования и критериев оценки, что позволит объективно сравнивать различные продукты и технологии.

В перспективе успешное развитие направления биоразлагаемых антипиренов будет определяться междисциплинарными коллаборациями между химиками-синтетиками, специалистами по полимерным материалам, биотехнологами и экологами. Интеграция принципов экономики замкнутого цикла в процесс разработки новых материалов станет ключевым условием для создания действительно устойчивых и безопасных огнезащитных систем.

Заключение

Биоразлагаемые антипирены представляют собой динамично развивающееся направление в области создания современных огнезащитных материалов, соответствующее принципам устойчивого развития и «зеленой» химии. Проведенный

анализ демонстрирует, что, несмотря на существующие технологические вызовы, разработка и внедрение таких систем являются необходимым шагом для снижения экологического следа материалов при обеспечении требуемого уровня пожарной безопасности.

Основные усилия исследователей сосредоточены на создании эффективных синергетических систем на основе возобновляемого сырья, сочетающих различные механизмы огнезащитного действия. Значительный прогресс достигнут в разработке интеллектуальных молекулярных структур с контролируемой биоразлагаемостью, нанокompозитов и многофункциональных покрытий. Однако сохраняются вызовы, связанные с обеспечением баланса между огнезащитной эффективностью, эксплуатационными характеристиками полимерных композитов и их экологической безопасностью.

Перспективы дальнейшего развития направления связаны с применением пе-

редовых подходов, включая компьютерный дизайн молекул, нанотехнологии и биотехнологические методы синтеза. Особое значение приобретает разработка единых стандартов и протоколов оценки, а также создание нормативной базы, регламентирующей использование биоразлагаемых антипиренов в различных отраслях промышленности.

Успешная коммерциализация и широкое внедрение биоразлагаемых антипиренов будут определяться коллаборацией специалистов в области химии, науки о материалах, биологии и экологии. Интеграция таких решений в практику позволит не только повысить пожарную безопасность материалов и изделий, но и обеспечить их соответствие принципам циркулярной экономики и устойчивого развития, что является необходимым для создания безопасной и экологически ответственной технологической среды будущего.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Егоров А. Н., Криволапова Е. В. Проблемы горючести полимерных материалов // В мире научных открытий. 2015. № 2-1 (62). С. 654–659.
2. Курбанова Э. К. Экологическая безопасность антипиренов // Актуальные проблемы безопасности в техносфере. 2025. № 2 (18). С. 16–20. DOI: 10.34987/2712-9233.2025.13.70.003
3. Замедлители горения для полимеров / С. М. Ломакин [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 7. С. 71–86.
4. Production of eco-safe, highly efficient and cheap fire-protective materials of new type / L. Gurchumelia et al. // Kimya Problemleri. 2016. No. 4. Pp. 372–376.
5. Бобрышева С. Н., Подобед Д. Л., Кашлач Л. О. Влияние антипиренов на свойства композитов // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. 2013. Т. 8, № 2. С. 51–57.
6. Chen M., Wang H., Li Z. Bio-based flame retardants for sustainable materials // Polymers. 2025. Vol. 17. No. 2. DOI: 10.3390/polym17020249

7. Flame retardancy of densified wood modified by bio-material based flame retardant / Y. Gao et al. // *Fire Technology*. 2024. Vol. 60. Pp. 3671–3688. DOI: 10.1007/s10694-024-01594-w
8. Malucelli G. Flame-retardant systems based on chitosan and its derivatives: state of the art and perspectives // *Molecules*. 2020. Vol. 25. No. 18. DOI: 10.3390/molecules25184046
9. Maqsood M., Seide G. Biodegradable flame retardants for biodegradable polymer // *Biomolecules*. 2020. Vol. 10. No. 7. DOI: 10.3390/biom10071038
10. Recent advances in biomass phytic acid flame retardants / Y. Liu et al. // *Polymer Testing*. 2023. Vol. 124. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2023.108100
11. Bio-based flame retardants to polymers: a review / M. Wang et al. // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2022. Vol. 6. DOI: 10.1016/j.aiepr.2022.07.003
12. Fu S., Song P., Liu X. Thermal and flame retardancy properties of thermoplastics/natural fiber biocomposites // *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*. Woodhead Publishing, 2017. Pp. 479–508. DOI: 10.1016/B978-0-08-100411-1.00019-4
13. Brebu M., Tamminen T., Spiridon I. Thermal degradation of various lignins by TG-MS/FTIR and Py-GC-MS // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2013. Vol. 104. Pp. 531–539. DOI: 10.1016/j.jaap.2013.05.016
14. Daneluti M., Matos J. Study of thermal behavior of phytic acid // *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2013. Vol. 49. Pp. 275–283. DOI: 10.1590/S1984-82502013000200009
15. Phosphorus–nitrogen interaction in fire retardants and its impact on the chemistry of treated wood / W. Grześkowiak et al. // *Materials*. 2024. Vol. 17. DOI: 10.3390/ma17215283
16. Schartel B. Phosphorus-based flame retardancy mechanisms — old hat or a starting point for future development? // *Materials*. 2010. Vol. 3. No. 10. Pp. 4710–4745. DOI: 10.3390/ma3104710
17. A novel phosphorus-nitrogen-based hyperbranched polysiloxane for improving the fire safety of PA6 / S. Fan et al. // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e22877
18. Toward the future of OECD/ISO biodegradability testing — new approaches and developments / U. Strotmann et al. // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2023. Vol. 107. No. 7–8. Pp. 2073–2095. DOI: 10.1007/s00253-023-12406-6
19. Investigation of OECD 301F ready biodegradability test to evaluate chemical fate in a realistic environment / S. Takekoshi et al. // *Journal of Pesticide Science*. 2021. Vol. 46. No. 2. Pp. 143–151. DOI: 10.1584/jpestics.D20-050
20. Ezechiáš M., Covino S., Cajthaml T. Ecotoxicity and biodegradability of new brominated flame retardants: a review // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2014. Vol. 110. Pp. 153–167. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2014.08.030
21. Multi-laboratory evaluation of the reproducibility of polymer biodegradation assessments applying standardized and modified respirometry methods / K. McDonough et al. // *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 901. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166339
22. Jones L., Arnold K., Allchin O. Evidence on the effects of flame retardant substances at ecologically relevant endpoints: a systematic map protocol // *Evidence-Based Toxicology*. 2024. Vol. 2. DOI: 10.1080/2833373X.2024.2375113
23. Rethinking the pathway to sustainable fire retardants / J. Feng et al. // *Exploration*. 2023. Vol. 3. No. 4. DOI: 10.1002/EXP.20220088

24. Functional additives in automotive polymer matrices: compatibility, mechanisms, and industry challenges / D. Dobrotă et al. // *Polymers*. 2025. Vol. 17. DOI: 10.3390/polym17172328
25. A nimble strategy for enabling bioderived flame retardants with strikingly enhanced interfacial compatibility in poly (lactic acid) composites / L. Yi et al. // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 270. Pt. 1. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.132260
26. Eco-conscious flame retardants for enhanced fire resistance in natural fiber reinforced polymers composite: a review / A. Morsy et al. // *Chemosphere*. 2025. Vol. 377. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2025.144360
27. The gas- and condensed-phase efficacy of functionalized phosphorus flame retardants for cotton fabric: phenyl vs. phenoxy groups / R. Otto et al. // *Polymers*. 2025. Vol. 17. No. 7. DOI: 10.3390/polym17070924

REFERENCES

1. Egorov A. N., Krivolapova E. V. Problems of flammability of polymeric materials // *In the world of scientific discoveries*. 2015. No. 2-1 (62). Pp. 654–659.
2. Kurbanova E. K. Environmental safety of flame retardants // *Actual problems of safety in the technosphere*. 2025. No. 2 (18). Pp. 16–20. DOI 10.34987/2712-9233.2025.13.70.003
3. Flame retardants for polymers / S. M. Lomakin et al. // *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2012. Vol. 15. No. 7. Pp. 71–86.
4. Production of eco-safe, highly efficient and cheap fire-protective materials of new type / L. Gurchumelia et al. // *Kimya Problemleri*. 2016. No. 4. Pp. 372–376.
5. Bobrysheva S. N., Podobed D. L., Kashlach L. O. Reducing the flammability of polymeric materials // *Emergencies: education and science*. 2013. Vol. 8. No. 2. Pp. 51–57.
6. Chen M., Wang H., Li Z. Bio-based flame retardants for sustainable materials // *Polymers*. 2025. Vol. 17. No. 2. DOI: 10.3390/polym17020249
7. Flame retardancy of densified wood modified by bio-material based flame retardant / Y. Gao et al. // *Fire Technology*. 2024. Vol. 60. Pp. 3671–3688. DOI: 10.1007/s10694-024-01594-w
8. Malucelli G. Flame-retardant systems based on chitosan and its derivatives: state of the art and perspectives // *Molecules*. 2020. Vol. 25. No. 18. DOI: 10.3390/molecules25184046
9. Maqsood M., Seide G. Biodegradable flame retardants for biodegradable polymer // *Biomolecules*. 2020. Vol. 10. No. 7. DOI: 10.3390/biom10071038
10. Recent advances in biomass phytic acid flame retardants / Y. Liu et al. // *Polymer Testing*. 2023. Vol. 124. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2023.108100
11. Bio-based flame retardants to polymers: a review / M. Wang et al. // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2022. Vol. 6. DOI: 10.1016/j.aiepr.2022.07.003
12. Fu S., Song P., Liu X. Thermal and flame retardancy properties of thermoplastics/natural fiber biocomposites // *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*. Woodhead Publishing, 2017. Pp. 479–508. DOI: 10.1016/B978-0-08-100411-1.00019-4
13. Brebu M., Tamminen T., Spiridon I. Thermal degradation of various lignins by TG-MS/FTIR and Py-GC-MS // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2013. Vol. 104. Pp. 531–539. DOI: 10.1016/j.jaap.2013.05.016

14. Daneluti M., Matos J. Study of thermal behavior of phytic acid // *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2013. Vol. 49. Pp. 275–283. DOI: 10.1590/S1984-82502013000200009
15. Phosphorus–nitrogen interaction in fire retardants and its impact on the chemistry of treated wood / W. Grzeškowiak et al. // *Materials*. 2024. Vol. 17. DOI: 10.3390/ma17215283
16. Schartel B. Phosphorus-based flame retardancy mechanisms — old hat or a starting point for future development? // *Materials*. 2010. Vol. 3. No. 10. Pp. 4710–4745. DOI: 10.3390/ma3104710
17. A novel phosphorus-nitrogen-based hyperbranched polysiloxane for improving the fire safety of PA6 / S. Fan et al. // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e22877
18. Toward the future of OECD/ISO biodegradability testing — new approaches and developments / U. Strotmann et al. // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2023. Vol. 107. No. 7–8. Pp. 2073–2095. DOI: 10.1007/s00253-023-12406-6
19. Investigation of OECD 301F ready biodegradability test to evaluate chemical fate in a realistic environment / S. Takekoshi et al. // *Journal of Pesticide Science*. 2021. Vol. 46. No. 2. Pp. 143–151. DOI: 10.1584/jpestics.D20-050
20. Ezechiáš M., Covino S., Cajthaml T. Ecotoxicity and biodegradability of new brominated flame retardants: a review // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2014. Vol. 110. Pp. 153–167. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2014.08.030
21. Multi-laboratory evaluation of the reproducibility of polymer biodegradation assessments applying standardized and modified respirometry methods / K. McDonough et al. // *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 901. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166339
22. Jones L., Arnold K., Allchin O. Evidence on the effects of flame retardant substances at ecologically relevant endpoints: a systematic map protocol // *Evidence-Based Toxicology*. 2024. Vol. 2. DOI: 10.1080/2833373X.2024.2375113
23. Rethinking the pathway to sustainable fire retardants / J. Feng et al. // *Exploration*. 2023. Vol. 3. No. 4. DOI: 10.1002/EXP.20220088
24. Functional additives in automotive polymer matrices: compatibility, mechanisms, and industry challenges / D. Dobrotá et al. // *Polymers*. 2025. Vol. 17. DOI: 10.3390/polym17172328
25. A nimble strategy for enabling bioderived flame retardants with strikingly enhanced interfacial compatibility in poly (lactic acid) composites / L. Yi et al. // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 270. Pt. 1. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.132260
26. Eco-conscious flame retardants for enhanced fire resistance in natural fiber reinforced polymers composite: a review / A. Morsy et al. // *Chemosphere*. 2025. Vol. 377. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2025.144360
27. The gas- and condensed-phase efficacy of functionalized phosphorus flame retardants for cotton fabric: phenyl vs. phenoxy groups / R. Otto et al. // *Polymers*. 2025. Vol. 17. No. 7. DOI: 10.3390/polym17070924

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Якубова Татьяна Валерьевна, канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры химии и процессов горения Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург,

ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 488997; ORCID: 0009-0006-1880-8368; e-mail: tatanaakubova71723@gmail.com

Шкуро Алексей Евгеньевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры технологий ЦБП и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета (620100, Российская Федерация, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, д. 37); РИНЦ ID: 652044; Scopus AuthorID: 56151722700; ResearcherID: A-2772-2014; ORCID: 000-0002-0469-2601; e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru

Плюснин Григорий Александрович, преподаватель кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); e-mail: reno499@yandex.ru

Хатыпов Денис Акрамович, преподаватель кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); e-mail: den-xatypov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatyana V. Yakubova, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry and Combustion Processes, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Yekaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 488997; ORCID: 0009-0006-1880-8368; e-mail: tatanaakubova71723@gmail.com

Aleksey E. Shkuro, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Pulp and Paper Industry Technologies and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University (37 Sibirsky Tract, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation); ID RSCI: 652044; Scopus AuthorID: 56151722700; ResearcherID: A-2772-2014; ORCID: 000-0002-0469-2601; e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru

Grigory A. Plyusnin, Lecturer of the Department of Fire, Emergency rescue equipment and special technical means, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Yekaterinburg, 620062, Russian Federation); e-mail: reno499@yandex.ru

Denis A. Khatypov, Lecturer of the Department of Fire, Emergency rescue equipment and special technical means, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Yekaterinburg, 620062, Russian Federation); e-mail: den-xatypov@mail.ru

УДК 53.089.6+352/354-1

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОЙ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МЕТОДИКИ ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ В МЧС РОССИИ

Гарелина Светлана Александровна, Любкин Роман Николаевич
Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена практическому применению комплексной риск-ориентированной методики обоснования рациональных параметров системы организации поверки средств измерений в МЧС России. На примере двадцати территориальных органов и учреждений МЧС России показано последовательное использование модулей методики, включающих приоритизацию объектов, оптимизацию маршрутов подвижных метрологических лабораторий, рациональное распределение средств измерений между стационарными и коммерческими каналами поверки, а также оценку эффективности использования дополнительного бюджета. Методика базируется на учете уровня риска ЧС, пространственного распределения объектов и существующих ресурсных ограничений. Предложенные модели обеспечивают согласование метрологических, логистических и экономических аспектов планирования в рамках единой системы управления. Результаты применения подтверждают возможность повышения эффективности метрологического обеспечения без увеличения затрат и создания инструментов для научно обоснованного распределения поверочных мощностей. Реализация подхода способствует формированию адаптивных схем обслуживания, устойчивых к изменению внешних условий и приоритетов. Представленный подход может служить инструментом для научно обоснованного распределения поверочных ресурсов и адаптации действующих схем поверки к меняющимся условиям функционирования системы МЧС России, а также применяться при планировании метрологического обеспечения в других ведомственных и региональных структурах.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, риск-ориентированный подход, поверка, оптимизация, радиационный мониторинг, подвижная метрологическая лаборатория, бюджетная эффективность

Для цитирования: Гарелина С. А., Любкин Р. Н. Практическая реализация комплексной риск-ориентированной методики обоснования рациональных параметров системы организации поверки средств измерений в МЧС России // Техносферная безопасность. 2026. № 1 (50). С. 27–46.

PRACTICAL IMPLEMENTATION OF A COMPREHENSIVE RISK-BASED METHODOLOGY FOR SUBSTANTIATING THE RATIONAL PARAMETERS OF THE SYSTEM FOR ORGANIZING THE VERIFICATION OF MEASURING INSTRUMENTS IN THE MINISTRY OF EMERGENCY SITUATIONS OF RUSSIA

Svetlana A. Garelina, Roman N. Lyubkin

Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the practical application of a comprehensive risk-based methodology for substantiating the rational parameters of the system for organizing the verification of measuring instruments in the Ministry of Emergency Situations of Russia. Using the example of twenty territorial bodies and institutions of the Ministry of Emergency Situations of Russia, the consistent use of methodology modules is shown, including prioritization of facilities, optimization of routes for mobile metrological laboratories, rational distribution of measuring instruments between stationary and commercial verification channels, as well as an assessment of the effectiveness of using an additional budget. The methodology is based on the level of emergency risk, the spatial distribution of facilities and existing resource constraints. The proposed models ensure the coordination of metrological, logistical and economic aspects of planning within a single management system. The results of the application confirm the possibility of increasing the efficiency of metrological support without increasing costs and creating tools for a scientifically based distribution of testing capacities. The implementation of the approach contributes to the formation of adaptive service schemes that are resistant to changing external conditions and priorities. The presented approach can serve as a tool for the scientifically based allocation of verification resources and the adaptation of existing verification schemes to the changing operating conditions of the EMERCOM of Russia system, as well as be used in the planning of metrological support in other departmental and regional structures.

Keywords: metrological support, risk-based approach, verification, optimization, radiation monitoring, mobile metrological laboratory, budgetary efficiency

For citation: Garelina S. A., Lyubkin R. N. Practical implementation of a comprehensive risk-based methodology for substantiating the rational parameters of the system for organizing the verification of measuring instruments in the Ministry of Emergency Situations of Russia // Technospheric safety. 2026. No. 1 (50). Pp. 27–46.

Введение

Система организации поверки средств измерений (далее — СИ) — это управляемая совокупность технических, организационных, ресурсных и нормативных компонентов, обеспечивающих проведение поверочных

мероприятий в подразделениях МЧС России с учетом вероятности и последствий ЧС.

Данная система включает:

1. Технические компоненты.
2. Организационные компоненты.
3. Ресурсные компоненты.
4. Нормативные компоненты.

Под системой организации поверки понимается не просто процесс поверки, а вся совокупность условий, средств и решений, влияющих на своевременность, приоритетность и эффективность поверки СИ, в том числе в условиях риска возникновения ЧС.

Для обеспечения эффективного функционирования данной системы необходимо рациональное распределение ее параметров, влияющих на ее работоспособность, в результате чего и была построена комплексная риск-ориентированная методика (рис. 1).

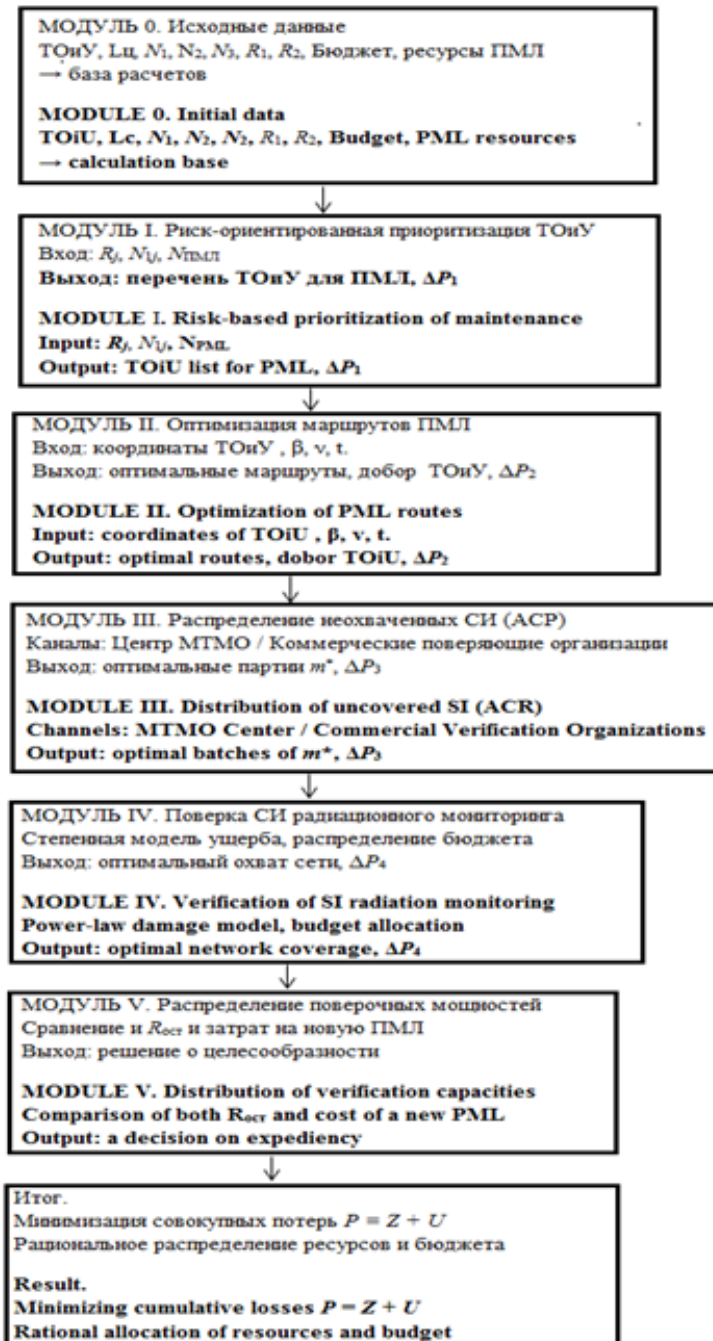


Рис. 1. Комплексная риск-ориентированная методика обоснования рациональных параметров системы организации поверки средств измерений в МЧС России. ТОиУ — территориальные органы и учреждения МЧС России; ПМЛ — подвижная метрологическая лаборатория

Fig. 1. A comprehensive risk-based methodology for substantiating the rational parameters of the system for the organization of verification of measuring instruments in the EMERCOM of Russia. TOIU — territorial bodies and institutions of the Ministry of Emergency Situations of Russia; PML — mobile metrological laboratory

Математический аппарат комплексной риск-ориентированной методики представлен в научной статье [1].

Для демонстрации реализации комплексной риск-ориентированной методики обоснования рациональных параметров системы организации поверки СИ в МЧС России использован укрупненный пример (табл. 1), включающий двадцать территориальных органов и учреждений (далее — ТОиУ), распределенных по удаленности от Центра МТМО и коммерческих структур. В реальных условиях количество ТОиУ превышает 365, однако проведение детализированных расчетов по всей совокупности объектов в рамках данного этапа нецелесообразно. Представленный массив данных служит исключительно для иллюстрации работоспособности предлагаемой методики и анализа ее преимуществ в части оптимизации распределения СИ и минимизации совокупных потерь.

Для каждого ТОиУ заданы пространственные и функциональные характери-

стики. Расстояние до Центра МТМО $L_{ц}$ варьирует от 30 до 400 км, а до ближайшей коммерческой лаборатории $L_{к}$ — от 20 до 100 км, что отражает типичную зависимость: чем ближе ТОиУ к центру, тем меньше расстояние до коммерческих пунктов поверки. Дополнительно для каждого ТОиУ определен угол φ ориентации относительно оси «восток» (от 0 до 360°) в условной полярной системе координат, что позволяет моделировать их пространственное распределение при построении маршрутных схем и оптимизационных карт.

В структуре СИ выделены две группы: N_1 — СИ давления и вакуума (от 100 до 300 шт. на одно ТОиУ); N_2 — СИ радиационного мониторинга (от 20 до 50 шт. на одно ТОиУ). Для каждой группы установлены соответствующие показатели риска ЧС R_1 и R_2 , характеризующие совокупный годовой риск возникновения ЧС, связанный с эксплуатацией данного типа СИ на территории конкретного ТОиУ.

Таблица 1
Исходные данные для реализации комплексной методики
риск-ориентированного планирования поверки СИ

Table 1
Initial data for the implementation of a comprehensive methodology
for risk-based planning of SI verification

ТОиУ TOiU	$L_{ц}$, км $L_{ц}$, km	φ , град φ , degrees	$L_{к}$, км $L_{к}$, km	N_1 , шт. N_1 , pc	N_2 , шт. N_2 , pc	R_1 , тыс. руб./год R_1 , thousand rubles/ year	R_2 , тыс. руб./год R_2 , thousand rubles/ year
ТОиУ_07 TOiU_07	50	212	20	108	0	3 192	0
ТОиУ_05 TOiU_05	101	177	36	159	0	3 948	0
ТОиУ_12 TOiU_12	117	325	35	191	0	2 472	0
ТОиУ_13 TOiU_13	129	60	46	210	0	768	0
ТОиУ_01 TOiU_01	132	360	41	266	33	3 432	450 126

Окончание таблицы 1

ТОиУ TOiU	$L_{ц}, км$ $L_{ц}, km$	$\varphi, град$ $\varphi,$ degrees	$L_{к}, км$ $L_{к}, km$	$N_1, шт.$ N_1, pc	$N_2, шт.$ N_2, pc	$R_1, тыс. руб./год$ $R_1, thousand rubles/$ year	$R_2, тыс. руб./год$ $R_2, thousand rubles/$ year
ТОиУ_08 TOiU_08	132	17	40	189	40	3 612	140 982
ТОиУ_04 TOiU_04	136	86	42	188	27	1 224	423 133
ТОиУ_09 TOiU_09	151	125	43	152	35	2 844	171 626
ТОиУ_16 TOiU_16	160	306	44	271	0	4 728	0
ТОиУ_17 TOiU_17	179	234	51	107	0	4 512	0
ТОиУ_15 TOiU_15	181	15	53	298	0	3 368	0
ТОиУ_06 TOiU_06	218	96	55	113	0	5 508	0
ТОиУ_10 TOiU_10	244	246	67	229	0	5 148	0
ТОиУ_19 TOiU_19	287	169	72	134	0	4 716	0
ТОиУ_03 TOiU_03	300	53	77	231	0	4 992	0
ТОиУ_18 TOiU_18	338	117	87	274	0	696	0
ТОиУ_11 TOiU_11	360	295	89	183	0	1 080	0
ТОиУ_20 TOiU_20	373	260	95	180	0	2 136	0
ТОиУ_02 TOiU_02	378	223	97	117	0	4 644	0
ТОиУ_14 TOiU_14	389	30	97	289	0	4 200	0

С учетом реальных ограничений по кадровым и техническим ресурсам потенциал подвижной метрологической лаборатории (далее — ПМЛ) $N_{пмл}$ принят на уровне 70 % от общего количества СИ типа N_1 , что соответствует около 2 700 единицам [2]. Такой подход отражает практическую ситуацию, при которой часть оборудования направляется на поверку в коммерческие лабора-

тории, обеспечивая баланс между загрузкой ПМЛ и поддержанием непрерывности контроля.

Этапы практической реализации комплексной методики

Модуль I. Риск-ориентированная приоритизация ТОиУ для обслуживания ПМЛ.

По исходным данным для двадцати ТОиУ выполнены ранжирование по интегральному риску R_j и отбор объектов для обслуживания ПМЛ.

Минимальное и максимальное значения риска: $R_{\min} = 696$ тыс. руб./год (ТОиУ_18), $R_{\max} = 5\,508$ тыс. руб./год (ТОиУ_06). Шаг ранжирования $\Delta R = (R_{\max} - R_{\min}) / 3 =$

$= 1\,604$ тыс. руб./год. Границы рангов: $P_3 < 2\,300$; $P_2 = 2\,300 / 3\,904$; $P_1 > 3\,904$ (тыс. руб./год).

Результаты представлены в табл. 2 и 3. В план включены все ТОиУ высокого риска P_1 , основная часть среднего P_2 и один низкого P_3 , что обеспечило полное использование ресурса ПМЛ.

Таблица 2
Результаты применения Модуля I (отбор ТОиУ для обслуживания ПМЛ)

Table 2

The results of the module I application (selection of TOiU for the maintenance of PML)

ТОиУ TOiU	Ранг Rank	N_1 , шт. N_1 , pc	R_1 , тыс. руб./год R_1 , thousand rubles/year	Входит в план ПМЛ Included in the PML plan
ТОиУ_06 TOiU_06	P_1	113	5 508	Да Yes
ТОиУ_10 TOiU_10	P_1	229	5 148	Да Yes
ТОиУ_03 TOiU_03	P_1	231	4 992	Да Yes
ТОиУ_16 TOiU_16	P_1	271	4 728	Да Yes
ТОиУ_19 TOiU_19	P_1	134	4 716	Да Yes
ТОиУ_02 TOiU_02	P_1	117	4 644	Да Yes
ТОиУ_17 TOiU_17	P_1	107	4 512	Да Yes
ТОиУ_14 TOiU_14	P_1	287	4 200	Да Yes
ТОиУ_05 TOiU_05	P_1	159	3 948	Да Yes
ТОиУ_08 TOiU_08	P_2	189	3 612	Да Yes
ТОиУ_01 TOiU_01	P_2	266	3 432	Да Yes
ТОиУ_07 TOiU_07	P_2	108	3 192	Да Yes
ТОиУ_12 TOiU_12	P_2	191	2 472	Да Yes
ТОиУ_15 TOiU_15	P_3	298	1 368	Да (добор) Yes (get it)
ТОиУ_20 TOiU_20	P_3	180	2 136	Нет No

Окончание таблицы 2

ТОиУ TOiU	Ранг Rank	N_1 , шт. N_1 , pcs	R_1 , тыс. руб./год R_1 , thousand rubles/year	Входит в план ПМЛ Included in the PML plan
ТОиУ_04 TOiU_04	P_3	188	1 224	Нет No
ТОиУ_11 TOiU_11	P_3	183	1 080	Нет No
ТОиУ_13 TOiU_13	P_3	20	768	Нет No
ТОиУ_18 TOiU_18	P_3	274	696	Нет No
ТОиУ_09 TOiU_09	P_3	152	2 844	Нет (заменен) No (replaced)

Таблица 3

Сводные результаты распределения ТОиУ по рангам риска и включения в план обслуживания ПМЛ

Table 3

Summary results of the distribution of TOiU by risk grades and inclusion in the PML maintenance plan

Ранг Rank	Всего ТОиУ Total TOiU	ΣN_1 , шт. ΣN_1 , pcs	Вошло ТОиУ TOiU has entered	ΣN_1 , шт. ΣN_1 , pcs
P_1	9	1 648	9	1 648
P_2	5	906	4	754
P_3	6	1 333	1	298
Итого Total	20	3 887	14	2 700

На рис. 2 представлено условное размещение ТОиУ в полярной системе координат, где расстояние от центра (от 50 до 400 км с шагом в 50 км) соответствует удаленности, а цвет точек отражает ранг риска. Визуализация наглядно показывает распределение приоритетных зон поверки и территориальные ограничения, влияющие на эффективность использования ресурса ПМЛ.

Для количественного сопоставления результатов риск-ориентированного планирования и традиционного подхода выполнено моделирование двух маршрутов ПМЛ.

Вариант А (риск-ориентированный) реализует результаты Модуля I: в план включены четырнадцать ТОиУ (табл. 2), а порядок их обслуживания определяется по принципу минимизации расстояния между последовательными пунктами. Таким образом, маршрут строился методом «ближайшего соседа», при котором каждая следующая точка выбирается как ближайшая по евклидову расстоянию к текущему положению ПМЛ: $L_{ij} = ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)^{0,5}$, где $x = L_{ц} \cos \varphi$, $y = L_{ц} \sin \varphi$. Суммарный пробег маршрута определялся как сумма последовательных переходов от центра к первому объекту и далее между всеми выбранными пунктами.

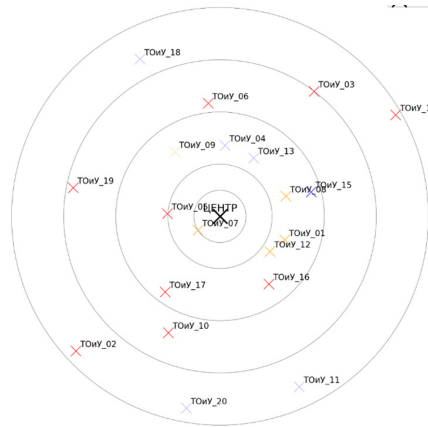


Рис. 2. Условное размещение ТОиУ по рангам риска и результатам отбора ПМЛ: цветовая дифференциация отражает ранги P_1 (красный), P_2 (оранжевый), P_3 (синий); прозрачность указывает на включение объекта в план обслуживания ПМЛ (яркие точки — объекты, вошедшие в план, полупрозрачные — оставшиеся вне его)
 Fig. 2. Conditional placement of TOiU by risk grades and results of PML selection: color differentiation reflects ranks P_1 (red), P_2 (orange), P_3 (blue); transparency indicates the inclusion of the object in the PML maintenance plan (bright dots — objects included in the plan, translucent — remaining outside it)

Вариант В (территориальный, географический) формировался по тому же принципу минимизации расстояния, но без учета приоритета по риску. В маршруте участвовали все двадцать ТОиУ (табл. 1), из которых последовательно выбирались ближайшие к текущему положению ПМЛ, пока суммарное количество поверяемых СИ не достигало 2 700. При достижении лимита, если добавление очередного ТОиУ приводило к его

превышению, данный объект пропускался, и в маршрут включался следующий по близости (метод «ближайшего соседа»).

Для обоих сценариев вычислялись: суммарная длина маршрута L_2 , км; остаточные (непокрытые) потери ΔU_1 (часть потенциального ущерба от ЧС, которая не была предотвращена данным вариантом организации проверки). Результаты расчетов представлены в табл. 4–6.

Таблица 4
Маршрут ПМЛ (вариант А — риск-ориентированный, метод ближайшего соседа)

Table 4
 PML route (option A — risk-based, nearest neighbor method)

№	ТОиУ TOiU	Расстояние от предыдущего, км Distance from the previous one, km	N_1 , шт. N_1 , pc
1	ТОиУ_07 TOiU_07	50,00	108
2	ТОиУ_05 TOiU_05	66,54	159
3	ТОиУ_17 TOiU_17	150,16	107
4	ТОиУ_10 TOiU_10	78,32	229
5	ТОиУ_02 TOiU_02	180,61	117
6	ТОиУ_19 TOiU_19	312,60	134

Окончание таблицы 4

№	ТОиУ TOiU	Расстояние от предыдущего, км Distance from the previous one, km	N_1 , шт. N_1 , pc
7	ТОиУ_06 TOiU_06	305,46	113
8	ТОиУ_03 TOiU_03	204,60	231
9	ТОиУ_14 TOiU_14	162,71	287
10	ТОиУ_15 TOiU_15	291,23	298
11	ТОиУ_08 TOiU_08	49,3	189
12	ТОиУ_01 TOiU_01	87,77	266
13	ТОиУ_12 TOiU_12	35,74	191
14	ТОиУ_16 TOiU_16	62,36	271

Таблица 5
Маршрут ПМЛ (вариант В — территориальный, метод ближайшего соседа)

Table 5
PML route (option B — territorial, nearest neighbor method)

№	ТОиУ TOiU	Расстояние от предыдущего, км Distance from the previous one, km	N_1 , шт. N_1 , pc
1	ТОиУ_07 TOiU_07	50,00	108
2	ТОиУ_05 TOiU_05	66,54	159
3	ТОиУ_09 TOiU_09	119,26	152
4	ТОиУ_04 TOiU_04	96,84	188
5	ТОиУ_13 TOiU_13	60,00	210
6	ТОиУ_08 TOiU_08	95,70	189
7	ТОиУ_15 TOiU_15	49,30	298
8	ТОиУ_01 TOiU_01	105,08	266
9	ТОиУ_12 TOiU_12	35,74	191
10	ТОиУ_16 TOiU_16	62,36	271

Окончание таблицы 5

№	ТОиУ TOiU	Расстояние от предыдущего, км Distance from the previous one, km	N_1 , шт. N_1 , pc
11	ТОиУ_17 TOiU_17	199,85	107
12	ТОиУ_10 TOiU_10	78,32	229
13	ТОиУ_20 TOiU_20	148,49	180
14	ТОиУ_02 TOiU_02	238,34	117

Таблица 6

Сравнение маршрутных стратегий обслуживания ПМЛ

Table 6

Comparison of PML service route strategies

Показатель Indicator	Вариант А Option A	Вариант В Option B	Разница (В-А) Difference (B-A)
L_{Σ} , км L_{Σ} , km	1 961	1 406	-555
N_1	2 700	2 665	-35
ΔU_i , тыс. руб./год ΔU_i , thousand rubles/ year	8 748	21 192	+12 444
Снижение ΔU_i , % Decline ΔU_i , %	—	≈ 59 %	—

На рис. 3 показано сравнение пространственной конфигурации маршрутов ПМЛ для двух сценариев планирования. Риск-ориентированный маршрут (вариант А) охватывает более удаленные и пространственно разобщенные ТОиУ, что приводит к увеличению общей длины пути ($\approx 1\,960$ км против $\approx 1\,400$ км при варианте В). Однако именно в этих зонах сосредоточены объекты с наибольшими значениями риска R_j (ранги P_1, P_2), поэтому их включение в план обеспечивает снижение непокрытого совокупного ущерба более, чем на 59 % при сохранении того же поверочного охвата.

Риск-ориентированная стратегия формирует оптимальное соотношение между транспортными затратами и выигрышем

по предотвращенным потерям ΔP_i , а также служит основой для последующего моделирования маршрутов и распределения ресурсов в рамках модулей II и III.

Применение критерия риска при отборе ТОиУ позволило повысить эффективность использования ресурса ПМЛ: при одинаковом объеме поверяемых СИ N_1 совокупный ущерб снизился почти в 2,5 раза по сравнению с территориальным распределением. Увеличение протяженности маршрута объясняется неравномерным пространственным расположением наиболее рискованных объектов, однако дополнительные транспортные затраты полностью компенсируются снижением потенциального ущерба.

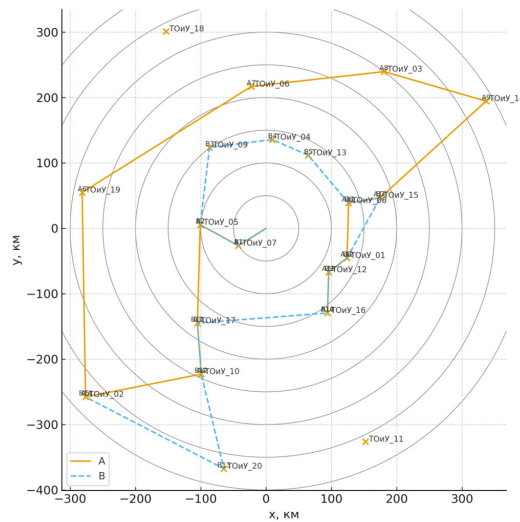


Рис. 3. Схематическое наложение маршрутных стратегий ПМЛ на карту размещения ТОиУ: сплошная линия — вариант А (риск-ориентированный), пунктирная — вариант В (территориальный)

Fig. 3. Schematic superimposition of PML route strategies on the map of the location of the MRT: solid line — option A (risk-oriented), dotted line — option B (territorial)

Модуль II. Оптимизация маршрутов ПМЛ.

Оптимизация маршрутов ПМЛ выполнялась при ограничении длительности каждой командировки $\beta = 7$ сут. при 8-часовом рабочем дне. В модели учитывались затраты времени на переезды и поверку, а также возврат в Центр после каждой командировки.

Нормативы и исходные параметры для расчетов: время на поверку одного СИ: $t = 0,04$ ч; скорость передвижения ПМЛ: $u = 60$ км/ч.

Для маршрута А, сформированного по результатам модуля I (четырнадцать ТОиУ), выполнена временная сегментация. В результате выделено четыре командировки с суммарным пробегом $\approx 2\,886$ км и общим временем ≈ 156 ч (19,5 сут.):

K1: ТОиУ_07 → 05 → 17 → 10 → 02 → 19 → Центр МТМО. $\Sigma N_1 = 854$; пробег $\approx 1\,125,2$ км; переезды 18,75 ч; поверка 34,16 ч. Итого 52,91 ч = 6,61 сут.

K2: ТОиУ_06 → 03 → 14 → Центр МТМО. $\Sigma N_1 = 631$; пробег $\approx 974,3$ км; переезды 16,24 ч; поверка 25,24 ч. Итого 41,48 ч = 5,18 сут.

K3: ТОиУ_15 → 08 → 01 → 12 → Центр МТМО. $\Sigma N_1 = 944$; пробег $\approx 466,8$ км; переезды 7,78 ч; поверка 37,76 ч. Итого 45,54 ч = 5,69 сут.

K4: ТОиУ_16 → Центр МТМО. $\Sigma N_1 = 271$; пробег $\approx 320,0$ км; переезды 5,335 ч; поверка 10,841 ч. Итого 16,17 ч = 2,02 сут.

Для повышения эффективности маршрутизации ПМЛ при сохранении тех же ограничений по времени командировки проведена оптимизация порядка посещения ТОиУ. Подбор параметров осуществлялся экспериментально, обеспечивая устойчивое снижение целевой функции при сохранении ограничений по β . Алгоритм показал сходимость к квазистационарному решению за 6–7 тыс. итераций.

Основные настройки использованной модели

Температура 0,5 выбрана эмпирически — задает требуемый уровень стохастичности на старте, позволяя алгоритму избежать локальных минимумов за счет допуска части невыгодных перестановок (до 10–15 %).

Коэффициент охлаждения 0,999 5 — задает плавное экспоненциальное снижение

температуры (примерно — 40 % за 2 000 итераций), являясь компромиссом между скоростью и точностью сходимости.

Количество итераций — 8 000 для четырнадцати ТОиУ, что обеспечивает достижение стационарного решения.

В результате оптимизации получен улучшенный маршрут, обеспечивающий ком-

пактное географическое распределение ТОиУ и снижение суммарного пробега при том же поверочном охвате (табл. 7). Итоговая последовательность точек имеет вид: ТОиУ_05 → ТОиУ_19 → ТОиУ_02 → ТОиУ_10 → ТОиУ_17 → ТОиУ_07 → ТОиУ_16 → ТОиУ_12 → ТОиУ_01 → ТОиУ_08 → ТОиУ_15 → ТОиУ_14 → ТОиУ_03 → ТОиУ_06.

Таблица 7
Результаты оптимизации маршрута ПМЛ методом имитации отжига

Table 7

Results of optimization of the PML route by simulated annealing

Командировка Business trip	Последовательность ТОиУ The TOiU sequence	ΣN_1	Пробег, км Mileage, km	Перезезды, ч Crossings, hours	Поверка, ч Verification, hours	Итого, ч Total, hours	Итого, дни Total days
1	05 → 19 → 02 → 10 → 17 → 07 → Центр МТМО	854	1 044,0	17,4	34,16	51,56	6,44
2	16 → 12 → 01 → 08 → Центр МТМО	917	473,9	7,90	36,68	44,58	5,57
3	15 → 14 → 03 → 06 → Центр МТМО	929	985,5	16,43	37,16	53,59	6,70

На рис. 4 представлено сравнение пространственной конфигурации маршрутов ПМЛ для двух алгоритмов. Хорошо видно, что при имитации отжига маршруты становятся более компактными, с меньшими пересечениями и рациональными петлями относительно центра.

Таким образом, применение алгоритма имитации отжига [3, 4] позволило: сократить число командировок (с четырех до трех); уменьшить пробег ПМЛ на $\approx 13\%$; снизить совокупное время маршрутизации на $\approx 4\%$; сохранить полный охват без превышения ограничений β .

Таким образом, по сравнению с маршрутом, построенным по методу ближайшего соседа (жадный метод) [5, 6], появилась резервная командировка продолжительностью семь суток, которую можно использовать для

расширения охвата ТОиУ, ранее не вошедших в план ПМЛ.

Для рационального использования высвободившегося ресурса выполнен подбор дополнительных объектов из списка невошедших ТОиУ (табл. 2) по принципу убывания риска R_1 .

Оптимизация добора показала, что включение всех шести оставшихся ТОиУ в одну командировку невозможно — совокупное время (≈ 75 ч) превышает норматив β . При этом моделирование с учетом минимизации пробега выявило оптимальную конфигурацию: в состав дополнительной командировки вошли ТОиУ_04, ТОиУ_09, ТОиУ_20 и ТОиУ_11, обеспечивающие наибольший дополнительный выигрыш по предотвращенным потерям 7 284 тыс. руб./год при соблюдении временных ограничений.

Маршрут добора сформировался в последовательности: ТОиУ_04 → ТОиУ_09 → ТОиУ_20 → ТОиУ_11 → Центр МТМО, что соответствует пробегу ≈ 1 305 км и общему времени маршрутизации ≈ 49,9 ч (6,2 сут.). Тем самым высвобожденная за счет оптимизации командировка используется полностью, не превышая лимит β, и позволяет дополнительно поверить около 700 СИ и предотвратить ущерб порядка 7,3 млн руб./год.

Таким образом, внедрение Модуля II не только обеспечивает сокращение числа командировок и пробега по сравнению с исходным маршрутом, но и создает воз-

можность расширения охвата ТОиУ за счет добора объектов в рамках неизменных ресурсных ограничений, что существенно повышает общую эффективность планирования работы ПМЛ.

Совместное применение модулей I и II позволило снизить непокрытый ущерб с 21,2 до 1,46 млн руб./год и увеличить предотвращенные потери почти в 1,6 раз по сравнению с базовым сценарием. Совокупный эффект оптимизации маршрутов и рационального добора ТОиУ составил ≈ 19,7 млн руб./год при сохранении нормативных ограничений по времени и ресурсам ПМЛ.

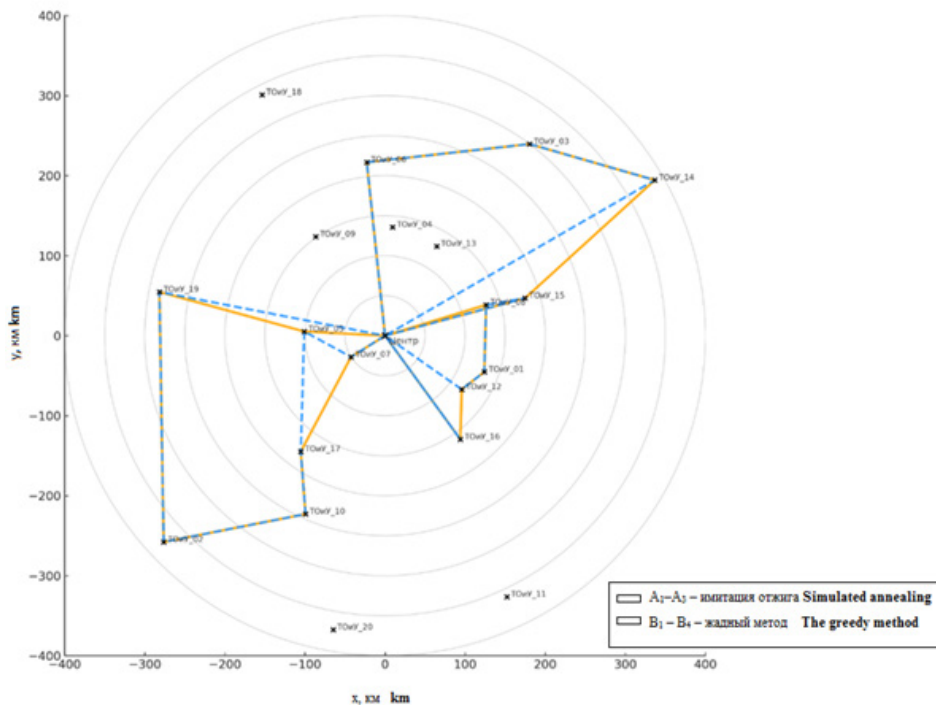


Рис. 4. Сравнение маршрутов ПМЛ при β = 7 сут.: жадный (B1–B4, пунктирные линии) и оптимизированный методом имитации отжига (A1–A3, сплошные линии, с возвратом в Центр МТМО)

Fig. 4. Comparison of PML routes at β = 7 days: greedy (B1–B4, dotted lines) and optimized by simulated annealing (A1–A3, solid lines, with return to the MTMO Center)

Модуль III. Распределение неохваченных ПМЛ СИ между каналами поверки.

Вне плана обслуживания ПМЛ остались два объекта — ТОиУ_13 и ТОиУ_18, их суммарный риск составляет ≈ 1 464 тыс. руб./год. Для этих ТОиУ выполнена оптимизация распределения СИ между стационар-

ными каналами поверки при бюджетных ограничениях.

Для рассматриваемого этапа принято $\Delta Z_{III} = 0$, что исключает использование коммерческих каналов; расчеты выполнены только для Центра с учетом собственных транспортных и временных ресурсов.

Использованы параметры: $\alpha = 0,046 \text{ ч}^{-1}$, $T = 0,33 \text{ ч}$, $Y = 50\,000 \text{ руб.}$, $B = 10,2 \text{ руб./км}$ [5]. Для учета индивидуальных характеристик риска определены частоты ЧС ω_j , пропорциональные годовому риску каждого

объекта: $\omega_j = R_j/Y/12$. Результаты расчета составили: $\omega(\text{ТОиУ}_{13}) = 1,28 \text{ мес.}^{-1}$; $\omega(\text{ТОиУ}_{18}) = 1,16 \text{ мес.}^{-1}$.

Результаты расчета рационального количества партий m^* представлены в табл. 8.

Таблица 8
Результаты расчета рационального количества партий m^*

Table 8

Results of calculating the rational number of batches m^*

ТОиУ TOiU	Z_2 , руб. Z_2 , rub.	m^* ($M = 0,5 \text{ мес.}$) m^* ($M = 0,5 \text{ month}$)	m^* ($M = 1,0 \text{ мес.}$) m^* ($M = 1,0 \text{ month}$)	m^* ($M = 2,0 \text{ мес.}$) m^* ($M = 2,0 \text{ month}$)
ТОиУ_13 TOiU_13	2 632	3	5	7
ТОиУ_18 TOiU_18	6 895	3	4	6

Полученные значения m^* демонстрируют закономерную зависимость: для ближайшего и более рискованного ТОиУ_13 рационально большее дробление партий (3–7 партии в зависимости от M), а для удаленного ТОиУ_18 при более высоких логистических затратах целесообразно ограничиться 3–6 партиями.

Для сопоставления с базовым сценарием ($\Delta Z_{III} = 0$) рассмотрен альтернативный вариант, при котором весь остаток СИ (ТОиУ_13 и ТОиУ_18) направляется в аккредитованные коммерческие лаборатории (табл. 9). Принятые допущения для коммерческого канала: $M = 0,25 \text{ мес.}$; число партий фиксировано $m = 2$; стоимость поверки: $400 \text{ руб./шт.} \times N_1$.

Таблица 9
Сравнение совокупных потерь при поверке неохваченных ПМЛ СИ в Центре МТМО и в коммерческой лаборатории

Table 9

Comparison of cumulative losses during verification of uncovered CML SI at the MTMO Center and in a commercial laboratory

ТОиУ TOiU	Канал поверки Verification channel	M , мес. M , month	m	Z_1 , руб. Z_1 , rub.	Z_2 , руб. Z_2 , rub.	Поверка, руб. Verification, rub.	$P = Z_1 + Z_2 m$, руб. $P = Z_1 + Z_2 m$, rub.
ТОиУ_13 TOiU_13	Центр МТМО MTMO Center	1,0	5	51 229,27	13 158,0	—	64 387,27
	Коммерция Commerce	0,25	2	50 488,13	1 876,8	84 000	136 364,93
ТОиУ_18 TOiU_18	Центр МТМО MTMO Center	1,0	4	51 187,81	27 580,8	—	78 768,61
	Коммерция Commerce	0,25	5	50 442,16	3 549,6	109 600	163 591,76

При реалистичных параметрах стоимости и расстояний совокупные потери P в Центре МТМО остаются значительно ниже, чем в коммерческом канале. Сокращение времени поверки в коммерции уменьшает ущерб Z_1 , но рост денежных затрат превышает этот эффект. Следовательно, при ограниченном бюджете поверка остатка СИ в Центре МТМО остается оптимальной стратегией.

Для оценки эффекта от внедрения рационального дробления m^* рассмотрен

сценарий со средней частотой срабатываний $\omega = 3,2 \text{ мес.}^{-1}$. Результаты (по сравнению с базовым $m = 2$) показаны в табл. 10.

Оптимизация числа партий m^* обеспечивает снижение ожидаемого ущерба на 28–31 % и совокупных потерь на 16–24 %. Таким образом, рациональное дробление поверочных партий является эффективным инструментом снижения интегрального риска и повышения результативности поверочного планирования в условиях ограниченных ресурсов.

Таблица 10

Снижение совокупных потерь при рациональном дроблении партий поверки

Table 10

Reduction of total losses during rational splitting of verification batches

ТОиУ TOiU	$m = 2 \rightarrow m^*$	$Z_1(m = 2)$, руб. $Z_1(m = 2)$, rub.	$Z_1(m^*)$, руб. $Z_1(m^*)$, rub.	ΔZ_1 , %	$P(m = 2)$, руб. $P(m = 2)$, rub.	$P(m^*)$, руб. $P(m^*)$, rub.	ΔP , %
ТОиУ_13 TOiU_13	2 → 5	132 098	91 764	-30,5 %	137 361	104 922	-23,6 %
ТОиУ_18 TOiU_18	2 → 4	132 098	95 555	-27,7 %	145 888	123 136	-15,6 %

Модуль IV. Оптимизация поверки СИ радиационного мониторинга.

На данном этапе выполняется распределение общего бюджета на поверку СИ радиационного мониторинга между каналами поверки — Центр МТМО и ком-

мерческими лабораториями. Принят совокупный лимит $\Delta Z_{IV} = 1\,000\,000$ руб., распределяемый пропорционально годовому риску R_2 (табл. 11) каждого ТОиУ. Стоимость поверки в коммерческих лабораториях — 14 000 руб./СИ.

Таблица 11

Распределение бюджета и объема поверки между каналами

Table 11

Distribution of budget and volume of verification between channels

ТОиУ TOiU	R_2 , тыс. руб./год R_2 , thousand rubles/year	Доля риска The share of risk	Доля бюджета, руб. Budget share, rub.	Кол-во СИ, поверенных в коммерческих лабораториях Number of SI attorneys in commercial laboratories	Партии СИ Batches of measuring instruments	Стоимость поверки, руб. Cost of verification, rub.	Затраты на транспорт, руб. Transportation costs, rub.	Итого, руб. Total, rub.
ТОиУ_01 TOiU_01	450 126	38 %	379 575	25	5 × 5	350 000	4 182	354 182

Окончание таблицы 11

ТОиУ TOiU	R_2 тыс. руб./год R_2 , thousand rubles/ year	Доля риска The share of risk	Доля бюд- жета, руб. Budget share, rub.	Кол-во СИ, поверенных в коммерческих лабораториях Number of SI attorneys in commercial laboratories	Партии СИ Batches of measuring instruments	Стоимость поверки, руб. Cost of verification, rub.	Затраты на транспорт, руб. Transportation costs, rub.	Итого, руб. Total, rub.
ТОиУ_04 TOiU_04	423 133	36 %	356 813	25	5 × 5	350 000	4 284	354 284
ТОиУ_08 TOiU_08	140 982	12 %	118 885	8	2 × 4	112 000	1 632	113 632
ТОиУ_09 TOiU_09	171 626	14 %	114 726	10	2 × 5	140 000	1 754	141 754
Итого Total	—	—	1 000 000	68	—	952 000	11 852	963 852

Бюджет использован на 96,4 %, при этом поверено 68 СИ радиационного мониторинга в коммерции.

Остаток СИ направляется в Центр МТМО, где оптимальные значения m^* опреде-

ляются по степенной модели (при $\gamma = 1,8$; $B_{\max} = R_2$) с ограничением по размеру партии (≈ 5 СИ). Расчет выполнен для двух режимов длительности поверочного цикла — $M = 1$ и $M = 2$ мес. (табл. 12).

Таблица 12
Оптимальные партии в Центр МТМО (после распределения бюджета)

Table 12
Optimal shipments to the MTMO Center (after budget allocation)

ТОиУ TOiU	В Центр МТМО To the MTMO Center	m^* ($M = 1, 2$ мес.) m^* ($M = 1, 2$ month)	План партии The party plan	Затраты на транспорт, руб. Transportation costs, rub.	Z_1 , руб. ($M = 1$ мес.) Z_1 , rub. ($M = 1$ month)	Z_2 , руб. ($M = 2$ мес.) Z_2 , rub. ($M = 2$ month)
ТОиУ_01 TOiU_01	8	1	1 × 8	2 692,8	37 540 000	75 080 000
ТОиУ_04 TOiU_04	2	1	1 × 2	2 774,4	35 267 000	70 534 000
ТОиУ_08 TOiU_08	32	6	6 × 5–6	16 156,8	2 804 000	5 608 000
ТОиУ_09 TOiU_09	25	5	5 × 5	15 402,0	3 949 000	7 898 000
Итого Total	67	—	—	36 026,0	79 560 000	159 120 000

Таким образом, из 135 СИ радиационного мониторинга 68 единиц ($\approx 50\%$) поверяются в аккредитованных коммерческих лабораториях при $M = 0,25$ мес.,

а оставшиеся 67 — в Центре МТМО (при $M = 1–2$ мес.).

Для количественной оценки эффекта от внедрения риск-ориентированной схемы

распределения СИ радиационного мониторинга между каналами поверки (Центр МТМО и аккредитованные коммерческие лаборатории) проведено сравнение двух сценариев (табл. 13):

- 1) базовый сценарий — все СИ поверяются только в Центре МТМО;
- 2) оптимизированный сценарий — часть СИ направляется в аккредитованные коммерческие лаборатории согласно рассчитанному бюджетному распределению (табл. 11, 12).

Таким образом, предотвращенный ущерб от использования коммерческих каналов по-

верки составляет $\approx 26,3$ млн руб./год (если альтернативой был бы Центр МТМО с $M = 1$ мес.); $\approx 61,4$ млн руб./год (если альтернативой был бы Центр МТМО с $M = 2$ мес.). Эти величины уже сопоставимы по масштабу с принятыми рисками R_2 и отражают реальную экономию от ускоренной поверки в коммерческих лабораториях. При бюджете 1 000 000 руб. и цене поверки 14 000 руб./СИ оптимально поверить 68 СИ в коммерции.

Таким образом, рациональное распределение СИ между каналами поверки является действенным механизмом снижения интегрального риска при ограниченном бюджете.

Таблица 13

Проигрыш в потенциальном ущербе при отсутствии коммерческих каналов поверки

Table 13

Loss in potential damage in the absence of commercial verification channels

ТОиУ TOiU	m	Z_1 , руб. ($M = 1$ мес.) Z_1 , rub. ($M = 1$ month)	Z_1 , руб. ($M = 2$ мес.) Z_1 , rub. ($M = 2$ month)
ТОиУ_01 TOiU_01	5	7 762 000	17 204 000
ТОиУ_04 TOiU_04	5	7 298 000	16 228 000
ТОиУ_08 TOiU_08	2	5 061 000	15 217 000
ТОиУ_09 TOiU_09	2	6 158 000	12 707 000
Итог Total	—	26 279 000	61 356 000

Модуль V. Расширение поверочных мощностей.

На заключительном этапе оценивалась экономическая целесообразность расширения поверочных мощностей за счет приобретения второй ПМЛ.

Даже при максимально благоприятном сценарии, когда предполагается, что дополнительная ПМЛ полностью устраняет ущерб для непокрытых объектов (ТОиУ_13 и ТОиУ_18), годовой предотвращенный эф-

фект составляет лишь 0,10–0,11 млн руб./год. Эта величина на два порядка меньше ежегодных затрат на владение одной ПМЛ, оцениваемых в 12 млн руб./год.

При корректном учете лишь дополнительного ущерба, возникающего из-за изъятия СИ на поверку, предотвращенный эффект снижается до $\approx 2,4$ тыс. руб./год, что делает инвестицию экономически неоправданной.

Таким образом, условие целесообразности не выполняется: при заданных

параметрах системы расширение парка ПМЛ до двух единиц нецелесообразно. Оптимальным остается вариант эксплуатации одной лаборатории с реализацией риск-ориентированных модулей I–III, обеспечивающих минимизацию совокупных потерь при сохранении установленных ограничений по времени и ресурсам.

Итоговое распределение дополнительного бюджета между модулями I–V

Для оценки приоритетов дальнейшего развития системы выполнено распределение дополнительного бюджета ΔB между модулями I–V на основе критерия максимальной предотвращенной потери $\Delta P_i/\Delta Z_i$.

Приоритет финансирования принадлежит Модулю IV, поскольку предотвращенный ущерб при переводе СИ радиационного мониторинга в коммерческие лаборатории имеет наибольшее соотношение «эффект — затраты». По расчетам, перевод 68 СИ обеспечивает снижение совокупного ущерба на $\approx 26,3$ млн руб./год; для остатка из 67 СИ эффект составит $\approx 25,9$ млн руб./год при затратах 0,94 млн руб., что соответствует исключительно высокой эффективности.

Модуль II обеспечивает устойчивое снижение совокупных потерь по всей сети за счет масштабирования алгоритмов оптимизации маршрутов ПМЛ при относительно низкой стоимости внедрения.

Модули I и III требуют минимальных вложений и направлены на поддержание и развитие риск-ориентированной аналитики и рациональных поверочных календарей m^* , обеспечивая дополнительное снижение остаточного риска в Центр МТМО.

Модуль V финансируется только в части НИОКР без приобретения новой ПМЛ, поскольку расчеты показали экономическую

нецелесообразность ее покупки при текущем профиле загрузки.

Такое распределение средств обеспечивает максимальное снижение интегрального риска при фиксированном дополнительном бюджете и соответствует результатам модели потерь, полученным в модулях III–IV.

Заключение

Разработанная и реализованная комплексная риск-ориентированная методика обеспечивает научно обоснованное принятие решений при планировании поверки средств измерений в системе МЧС России. Ее модульная структура позволяет учитывать пространственные, метрологические и экономические ограничения, а также уровень риска ЧС на каждом объекте.

Модуль I продемонстрировал, что применение критерия риска при отборе территориальных органов и учреждений для обслуживания подвижной метрологической лабораторией позволяет снизить совокупный ущерб почти в 2,5 раза по сравнению с территориальным принципом планирования без увеличения ресурсных затрат.

Модуль II показал, что оптимизация маршрутов подвижной метрологической лаборатории методом имитации отжига позволяет сократить количество командировок с четырех до трех, уменьшить суммарный пробег примерно на 13 %, при этом сохранить полный объем поверки. Совместное применение первого и второго модулей обеспечило снижение непокрытого ущерба с 21,2 до 1,46 млн руб. в год и совокупный выигрыш порядка 19,7 млн руб. в год.

Модуль III подтвердил эффективность рационального дробления партий поверки

в Центр МТМО: при ограниченных ресурсах снижение ожидаемого ущерба достигает 28–31 %, а совокупных потерь — до 24 %. Такой подход обеспечивает гибкое управление ресурсами и адаптацию к индивидуальным характеристикам риска каждого территориального объекта.

Модуль IV доказал высокую экономическую результативность распределения средств измерений радиационного мониторинга между Центром МТМО и аккредитованными коммерческими лабораториями. При бюджете 1 млн рублей предотвращенный ущерб составляет 26–61 млн руб. в год, что делает этот модуль наиболее эффективным по показателю соотношения «эффект — затраты».

Модуль V показал, что расширение парка подвижных метрологических лабораторий нецелесообразно при существующем объеме работ: предотвращенный ущерб на два порядка меньше годовых эксплуатационных расходов. Оптимальным остае-

тся использование одной лаборатории с применением риск-ориентированных решений, разработанных в предыдущих модулях.

Итоговое распределение дополнительного бюджета между модулями I–V по критерию максимальной предотвращенной потери подтвердило приоритет четвертого модуля (около 25,9 млн руб. предотвращенного ущерба в год при затратах 0,94 млн руб.) и высокую эффективность модулей I–III при умеренных вложениях.

Практическая реализация методики обеспечивает согласование метрологических, логистических и экономических факторов в единой системе управления поверочными ресурсами МЧС России. Применение риск-ориентированных принципов позволяет достигать значительного снижения совокупного риска без увеличения бюджета и создает основу для дальнейшего развития адаптивных моделей организации метрологического обеспечения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гарелина С. А., Любкин Р. Н. Формирование логики риск-ориентированного планирования поверки средств измерений в МЧС России // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 183–193.
2. Метрологическая лаборатория на шасси FORD TRANS // АВТОМАСТЕР. Производство автомобилей малых серий. URL: <https://clck.ru/3RshAu> (дата обращения: 13.01.2026).
3. Метод отжига // Алгоритмика. URL: <https://clck.ru/3RshGi> (дата обращения: 24.03.2025).
4. Delahaye D., Chaimatanan S., Mongeau M. Simulated annealing: From basics to applications // Handbook of Metaheuristics. 3rd ed. Cham, 2019. Pp. 1–35.
5. Совершенный алгоритм. Жадные алгоритмы и динамическое программирование. СПб., 2020. 256 с.
6. A Comparison of Greedy Algorithm and Dynamic Programming Algorithm // Web of Conferences SHS. URL: <https://clck.ru/3RsgWr> (дата обращения: 15.11.2025).

REFERENCES

1. Garelina S. A., Lyubkin R. N. Formation of the logic of risk-oriented planning of metrological testing in the Russian Ministry of Emergency Situations // *Technospheric safety*. 2025. № 4 (49). Pp. 183–193.
2. Metrological laboratory on FORD TRANSIT chassis // AUTO REPAIR SHOP. Production of small-series cars. URL: <https://clck.ru/3RshAu> (accessed 13.01.2026).
3. Annealing method // *Algorithmics*. URL: <https://clck.ru/3RshGi> (accessed 24.03.2025).
4. Delahaye D., Chaimatanan S., Mongeau M. Simulated annealing: From basics to applications // *Handbook of Metaheuristics*. 3rd ed. Cham, 2019. Pp. 1–35.
5. Perfect algorithm. Greedy algorithms and dynamic programming. St. Petersburg, 2020. 256 p.
6. A Comparison of Greedy Algorithm and Dynamic Programming Algorithm // *Web of Conferences SHS*. URL: <https://clck.ru/3RsgWr> (accessed 15.11.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гарелина Светлана Александровна, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры механики и инженерной графики Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код: 8591-0495; AuthorID: 163638; e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Любкин Роман Николаевич, преподаватель кафедры эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код: 9786-4862; AuthorID: 1119833; e-mail: r.lyubkin@agz.50.mchs.gov.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Svetlana A. Garelina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1A Sokolovskaya St., Khimki, md. Novogorsk, 141435, Russian Federation); SPIN-code: 8591-0495; AuthorID 163638; e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Roman N. Lyubkin, Lecturer of the Department of the Exploitation of Transport-technological Machines and Complexes Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1A Sokolovskaya St., Khimki, md. Novogorsk, 141435, Russian Federation); SPIN-code: 9786-4862; AuthorID: 1119833; e-mail: r.lyubkin@agz.50.mchs.gov.ru

УДК 614.84

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ПОЖАРНОЙ АВТОМАТИКИ

Штерензон Вера Анатольевна^{1,2}, Худякова Светлана Александровна², Али Елена Борисовна³, Шпаньков Андрей Владимирович²

¹ Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

² Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

³ Ижевский государственный технический университет, г. Ижевск, Российская Федерация

Аннотация. В данной работе рассматриваются результаты комплексных исследований статистических показателей обстановки с пожарами применительно к системам пожарной автоматики за 2004–2023 гг. (по данным ВНИИПО МЧС России). Актуальность данного исследования определяется важностью оценки эффективности работы довольно дорогостоящих систем пожарной автоматики в контексте предотвращения пожаров и их негативных последствий. Исследовано влияние различных вариантов функционирования систем пожарной автоматики на количество погибших и травмированных и объем материального ущерба и спасенных материальных ценностей. Выявлена средняя и сильная корреляционная связь между материальным ущербом, количеством погибших и травмированных, спасенными материальными ценностями и количеством пожаров для тех ситуаций, когда система пожарной автоматики сработала и выполнила свою задачу. Исследование показало, что на объектах с установленными системами пожарной автоматики количество погибших/травмированных не превышало 2–3 % от общего количества погибших/травмированных, а вот материальный ущерб в отдельные годы даже при использовании систем пожарной автоматики достигал 30 % от общего материального ущерба. Для сравнения различных типов систем пожарной автоматики предложены критерий «относительная сохраненность ресурсов» и формула расчета указанного критерия. Сравнительный анализ различных типов систем пожарной автоматики по критерию «относительная сохраненность ресурсов» показал, что применение систем оповещения и управления эвакуацией способствует большему сохранению материальных и человеческих ресурсов.

Ключевые слова: пожар, показатели обстановки с пожарами, системы пожарной автоматики, статистический анализ, комплексное исследование

Для цитирования: Анализ результатов работы систем пожарной автоматики / В. А. Штерензон [и др.] // Техносферная безопасность. 2026. № 1 (50). С. 47–61.

ANALYSIS OF THE RESULTS OF THE FIRE ALARM SYSTEMS OPERATION

Vera A. Shterenzon^{1,2}, Svetlana A. Khudyakova², Elena B. Ali³, Andrey V. Shpankov²

¹ Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation

² UISFS of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation

³ Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

Abstract. This paper examines the results of a comprehensive statistical study of fire safety indicators related to fire alarm systems for the period 2004–2023 (based on data from the VNIPO EMERCOM of Russia). The relevance of this study is determined by the importance of assessing the effectiveness of relatively expensive fire alarm systems in the context of fire prevention and their negative consequences. The impact of various fire alarm system operating options on the number of fatalities and injuries, the amount of material damage, and the amount of salvaged material assets is studied. A moderate to strong correlation was found between material damage, the number of fatalities and injuries, the amount of salvaged material assets, and the number of fires for those situations where the fire alarm system was activated and fulfilled its purpose. The study showed that at facilities with fire alarm systems installed, the number of fatalities and injuries did not exceed 2–3 % of the total number of fatalities and injuries, while material damage in some years, even with the use of fire alarm systems, reached 30 % of the total material damage. To compare different types of fire alarm systems, a "relative resource conservation" criterion and a calculation formula for this criterion are proposed. A comparative analysis of different types of fire alarm systems based on the "relative resource conservation" criterion revealed that the use of warning and evacuation management systems contributes to greater conservation of material and human resources.

Keywords: fire, fire situation indicators, fire automation systems, statistical analysis, comprehensive research

For citation: Analysis of the results of the fire alarm systems operation / V. A. Shterenzon et al. // Technospheric safety. 2026. No. 1 (50). Pp. 47–61.

Введение

Современные промышленные, логистические и социальные объекты, которые возводятся для длительной надежной эксплуатации, очень ресурсозатратны при создании и эксплуатации и, к сожалению, в значительной степени уязвимы с точки зрения пожарной опасности. Часто факторы, которые инициируют пожары, по своей «стоимости» несопоставимы с последствиями пожаров. Данные сайта Международной ассоциации пожарно-спасательных служб [1] свидетельствуют о том, что, несмотря на колоссальные финансовые и организационные усилия, даже в странах с высокотехнологичной экономикой [2] задачи обеспечения пожарной и тех-

носферной безопасности далеки от своего окончательного решения: в среднем за год в мире происходит более двух миллионов пожаров, погибают десятки тысяч человек, остаются травмированными сотни тысяч человек, совокупный материальный ущерб составляет десятки и сотни миллиардов денежных единиц. Именно поэтому уже на этапе создания любых инфраструктурных проектов параллельно решается вопрос их обеспечения наиболее эффективными системами и средствами пожарной безопасности — пожары в значительной степени влияют на стабильность, стоимость, инвестиционную привлекательность и перспективы инфраструктурных проектов, производственных и логистических процессов и систем.

Данная работа посвящена исследованию результатов работы систем пожарной автоматики. Исходными данными для исследования были статистические данные, опубликованные на сайте МЧС России [3] и в информационно-аналитических сборниках ВНИИПО «Статистика пожаров и их последствий» [4], конкретно — результаты работы пожарной автоматики при пожарах в 2004–2023 гг.

Анализ статистических данных ВНИИПО показал, что в течение рассмотренного периода:

- доля *пожаров* на объектах, оснащенных системами пожарной автоматики, не превышала 2 % от общего количества пожаров в Российской Федерации;
- доля *погибших* на объектах, оснащенных системами пожарной автоматики, не превышала 1,5 % от общего количества погибших на пожарах;
- доля *травмированных* на объектах, оснащенных системами пожарной автоматики, не превышала 3 % от общего количества травмированных на пожарах;
- доля *материального ущерба* на объектах, оснащенных системами пожарной автоматики, доходила до 30 % от общего материального ущерба от пожаров.

Эти данные (особенно доля материального ущерба) показывают, насколько важен вопрос изучения последствий функционирования систем пожарной автоматики. Системный анализ опубликованных результатов научно-прикладных изысканий в вопросе эффективности и последствий работы систем пожарной автоматики показал, что подобных исследований недостаточно и они чаще всего очень узко направлены на анализ функционирования конкретного вида систем пожарной автоматики в конкретных условиях эксплуатации [5–10].

Стоимость современных систем пожарной автоматики (с учетом проектирования, изготовления, монтажа, контроля и т. д.) составляет (в зависимости от типа и особенностей объекта, на котором устанавливается система пожарной автоматики, от ее целевого функционального назначения) от сотен тысяч до миллионов рублей. Последствия их успешного или неуспешного функционирования оцениваются в миллионы рублей и затрагивают десятки и сотни человеческих судеб. Эти два фактора делают актуальность исследования результатов и последствий работы систем пожарной автоматики очевидной.

Объект исследования — системы пожарной автоматики.

Предмет исследования — результаты работы и последствия функционирования систем пожарной автоматики.

Цель исследования — выявить особенности и закономерности влияния систем пожарной автоматики на показатели обстановки с пожарами.

Методы исследования — системный анализ статистических данных и результатов их обработки, математическое моделирование (методы регрессионного, корреляционного, дисперсионного анализа), методы сравнительного анализа.

Авторы статьи полагают, что полученные результаты исследования имеют определенную теоретическую и практическую ценность относительно более глубокого понимания результатов и последствий функционирования систем пожарной автоматики и могут быть использованы как в учебном процессе для обучающихся по специальности «Пожарная безопасность» и направлению подготовки «Техносферная безопасность», так и в последующих научно-практических

исследованиях эффективности применения конкретных систем пожарной автоматики.

Результаты исследований

Согласно СП 484.1311500.2020 «Системы противопожарной защиты. Системы пожарной сигнализации и автоматизация систем противопожарной защиты. Нормы и правила проектирования», система пожарной автоматики (далее — система ПА) — это совокупность взаимодействующих систем пожарной сигнализации, передачи извещений о пожаре, оповещения и управления эвакуацией людей, противодымной вентиляции, установок автоматического пожаротушения и иного оборудования автоматической противопожарной защиты, предназначенных для обеспечения пожарной безопасности объекта [11]. Соответственно, основное назначение систем ПА состоит в своевременном (т. е. как можно более раннем) обнаружении места возникновения пожара и оповещении людей, формировании регламентированных управляющих сигналов для систем оповещения с целью ускоренной эвакуации людей, формировании управляющих сигналов для систем автоматического тушения возникшего пожара и управления противопожарным оборудованием. Сама система ПА, ее архитектура, техническое и программное обеспечение, состав и расположение компонентов, интеграция с другими системами безопасности проектируются индивидуально под конкретный охраняемый объект и особенности его структуры и жизнедеятельности.

Вопросы проектирования, монтажа, эксплуатации систем ПА в Российской Федерации регламентируются ГОСТ Р 59638–2021 «Системы пожарной сигнализации.

Руководство по проектированию, монтажу, техническому обслуживанию и ремонту. Методы испытаний на работоспособность» [12]. Анализ вопроса оценки эффективности функционирования систем ПА позволяет выделить три группы количественных показателей:

- группа А: показатели функциональной надежности (показатели безотказности, долговечности, восстанавливаемости, сохраняемости, комплексные показатели);
- группа В: временные показатели (время обнаружения возгорания, время передачи управляющих сигналов, время срабатывания компонентов систем ПА);
- группа С: показатели, связанные с ложными срабатываниями систем ПА и их последствиями (количество ложных срабатываний в единицу времени, ущерб от порчи производственных, торговых, транспортных и т. д. систем, прерывания производственных процессов, неоправданной эвакуации людей).

Помимо своих естественных (физических) единиц измерения все перечисленные характеристики имеют еще и финансовое измерение. В связи с тем, что стратегической целью создания и использования систем ПА является максимальное снижение показателей обстановки с пожарами (количество погибших и травмированных, материальный ущерб и т. д.), авторы исследования полагают, что эти количественные показатели также можно использовать как косвенные показатели для анализа последствий функционирования систем ПА.

В соответствии с Федеральным законом № 69-ФЗ от 21.12.1994 «О пожарной безопасности» пожар — это неконтролируемое горение вне специального очага, распространяющееся во времени и пространстве

и причиняющее вред материальным ценностям. Пожар представляет собой развивающийся сложным образом во времени и в пространстве случайный процесс, в котором параллельно-последовательно протекают несколько физико-химических процессов. Факторы, которые приводят к пожару и способствуют его развитию, можно разделить на случайные и детерминированные.

К детерминированным факторам можно отнести: геометрические параметры помещений объектов возгорания (площадь, объем, высота помещения, наличие и количество окон и дверей, количество и расположение горючих материалов); наличие и характеристики систем противопожарной защиты (виды, марки, количество, характеристики, расположение) и др. Условно детерминированными можно считать физико-химические свойства горючих материалов и строительных материалов.

К случайным факторам можно отнести: место и время возникновения пожара, наличие или отсутствие горючих материалов в месте возникновения пожара, наличие (количество, тип, характеристики) горючих материалов в месте возникновения пожара, скорость ветра и направление воздушных потоков, влажность воздуха, отказы оборудования (тип и время возникновения отказа), действия людей (своевременные или несвоевременные, профессиональные или непрофессиональные) и т. д. Случайные факторы определяют возникновение и начальную стадию развития пожара, а детерминированные факторы определяют закономерности дальнейшего распространения огня и дыма, поэтому и показатели обстановки с пожарами носят случайный характер.

Сравнение случаев пожаров, в которых были задействованы системы ПА, с инцидентами, где такие системы отсутствовали

Исследование статистики пожаров за выбранный период 2004–2023 гг. показало следующие результаты.

- С начала 2000-х годов *материальный ущерб* на один пожар в случаях, когда была задействована ПА (независимо от результата ее функционирования), увеличился почти в десять раз. В то же время в ситуациях без установленной ПА материальный ущерб на один пожар изменялся в пределах одного порядка и значительно уступал показателям, связанным с наличием ПА.
- Число *погибших* на один пожар (в пересчете на 1 000 человек) для ситуаций, когда функционировала ПА, за исследуемый период уменьшилось на 25 %, но все равно значительно превышало число погибших на один пожар (в пересчете на 1 000 человек) для ситуаций без установленной ПА.
- Количество *травмированных* на один пожар (в расчете на 1 000 человек) в условиях, когда была предусмотрена ПА, за 2004–2023 гг. увеличивалось и варьировалось в значительных пределах, составляя в среднем от 40 до 120 человек. В то же время число травмированных на один пожар (в расчете на 1 000 человек) в условиях отсутствия ПА возрастало медленно и колебалось в более узком диапазоне: от 60 до 80 человек на пожар.

Системы ПА устанавливаются на объектах, подверженных высоким рискам катастрофических последствий от пожаров. Приведенные данные свидетельствуют о том,

что в течение исследуемого периода развитие и внедрение систем ПА способствовало снижению числа погибших в результате пожаров, «переведя» их в категорию травмированных, однако задача по уменьшению материального ущерба от пожаров не была успешно решена.

Анализ последствий пожаров по результатам функционирования систем ПА (без кластеризации по типам)

Результаты работы и последствия функционирования систем ПА зависят от двух интегративных по своей природе факторов:

- объект защиты: многоуровневость архитектуры, интенсивность и опасность протекающих внутри процессов, безопасность конструкции и строительных материалов, количество одновременно находящихся людей и т. д., каждый объект защиты относится к определенному классу функциональной пожарной опасности;
- система ПА: качество проектирования, изготовления, контроля и сборки, качество монтажа и технического обслуживания, тип, характеристики и качество огнетушащего вещества, профессиональная компетентность обслуживающего персонала и сотрудников противопожарной службы.

Анализ пожарных ситуаций, когда была задействована система ПА, за период 2004–2023 гг. показал следующее.

- В начале 2000-х годов доля пожаров, когда ПА срабатывала и выполняла свои функции, составляла менее 50 %. К 2021–2023 гг. этот показатель возрос до более чем 85 %. Это связано с тем, что за прошедшие два десятилетия возводимые объекты инфраструктуры

стали более сложными как в функциональном, так и в архитектурном плане, что, в свою очередь, привело к повышению их стоимости. На таких объектах, безусловно, устанавливается современная и более надежная ПА.

- В начале 2000-х гг. доля материального ущерба от случаев пожаров, когда ПА срабатывала и выполняла свои функции, составляла менее 40 %. К 2021–2023 гг. этот показатель вырос до 80–90 %. Причина в том, что появилось и появляется много новых сложных объектов инфраструктуры, стоимость которых кратно (а где-то и многократно) выросла.
- В начале 2000-х гг. доля травмированных людей на пожарах, когда ПА срабатывала и выполняла свои функции, составляла 40–50 %. К 2021–2023 гг. этот показатель повысился до 75–85 %. Это связано с укрупнением объектов инфраструктуры и повышением концентрации работающих или находящихся там людей.
- В начале 2000-х гг. доля погибших людей на пожарах, когда ПА срабатывала и выполнила свои функции, составляла 30–40 %. К 2021–2023 гг. этот показатель вырос до 60–70 %.

В исследуемый период наблюдалось снижение доли пожаров, при которых ПА срабатывала, но не выполняла функции: с 4,5 % до 1,5 %. Также зафиксировано уменьшение случаев полного отказа ПА (от 40 % до 10 %) и ситуаций, когда система не была включена вовсе (с 10 % до 4 %).

Доля материального ущерба от пожаров, в которых системы ПА не были включены, не сработали или не выполнили свою задачу, за исследуемый период 2004–2023 гг. в общем тренде уменьшалась, но по годам

и результатам ситуация проявлялась очень разнонаправленно без какой-то ярко выраженной достоверной закономерности.

Общий тренд для доли *погибших* от пожаров, в которых ПА сработала, но свою задачу не выполнила, не сработала или не была включена, — уменьшение, но не кардинальное. Более заметно за исследуемый период уменьшалась доля погибших от пожаров, в которых система ПА сработала, но свою задачу не выполнила (от 30 % до 3–5 %). Что касается доли погибших в ситуациях, когда ПА не была включена или не сработала, то тут наличие разнонаправленной статистики не позволило выявить достоверную временную закономерность.

За исследуемый период доля *травмированных* на пожарах, в которых ПА сработала, но свою задачу не выполнила, не сработала или не была включена, имела тенденцию к уменьшению в основном за счет ситуаций, когда ПА сработала, но свою задачу не выполнила. Для случаев, когда система ПА была не включена или не сработала, также наблюдается отсутствие более или менее выраженной временной закономерности.

Исследование последствий срабатывания систем ПА

Ранее было отмечено, что пожар как процесс во времени и в пространстве носит случайный характер; показатели обстановки с пожарами являются случайными величинами. При попытке найти взаимосвязь между показателями пожарной опасности речь не идет о функциональной связи между ними (в явном виде ее нет), поэтому для исследования этих величин были использованы методы статистического анализа. Показатели обстановки с пожарами были проверены на нормальность распределе-

ния, на наличие корреляционной связи. Были получены следующие результаты:

- в ситуациях пожаров, когда ПА не была подключена, корреляционной связи (даже средней) между материальным ущербом, количеством погибших и травмированных, спасенными материальными ценностями и количеством пожаров не выявлено;
- в ситуациях пожаров, когда ПА присутствовала, но не сработала, корреляционной связи между указанными показателями пожарной опасности не установлено;
- в ситуациях пожаров, когда ПА сработала, но свою задачу не выполнила, средняя корреляционная связь (коэффициент парной корреляции $r > 0,6$) выявлена только для зависимости числа погибших и травмированных от количества пожаров; между материальным ущербом, спасенными материальными ценностями и количеством пожаров корреляционной связи не выявлено;
- в ситуациях пожаров, когда ПА присутствовала, сработала, выполнила свою задачу, выявлена средняя и сильная корреляционная связь (коэффициент парной корреляции $r > 0,6$) между материальным ущербом, количеством погибших и травмированных, спасенными материальными ценностями и количеством пожаров; полученные математические модели можно использовать для решения предиктивных задач.

Детальный анализ временных трендов статистических показателей обстановки с пожарами по всем видам срабатывания ПА и всем объектам, на которых была установлена ПА, в период 2004–2023 гг. позволил сформулировать следующие выводы.

- При количестве пожаров менее 100–120 наибольшее количество *погибших* выявлено в ситуациях, где ПА не сработала, а наименьшее число погибших (как это следует из статистики ВНИИПО) — в ситуациях, когда ПА не была включена; с увеличением количества пожаров более 100–120 значительная доля погибших выявлена в ситуациях, когда ПА сработала, но свою задачу не выполнила.
- При количестве пожаров менее 100–120 наибольший *материальный ущерб* пришелся на те пожары, в которых ПА не сработала. С увеличением количества пожаров более 100–120 значительная часть материального ущерба приходилась на пожары, в которых ПА сработала, но свою задачу не выполнила. При значительном увеличении числа пожаров (более 1 000) основной материальный ущерб был при пожарах, в которых ПА сработала и свою задачу выполнила.
- При количестве пожаров менее 100–120 наибольший объем *спасенных материальных ценностей* выявлен в ситуациях, когда ПА не сработала. С увеличением количества пожаров более 100–120 эта величина уменьшается и при количестве пожаров более 1 000 основную роль в спасении материальных ценностей играют случаи, когда ПА сработала и свою задачу выполнила.
- При количестве пожаров менее 100–120 наибольшее количество *травмированных* выявлено в ситуациях, когда ПА не сработала. С увеличением количества пожаров более 100–120 наибольшее количество травмированных выявлено в ситуациях, когда ПА сработала, но не выполнила свою задачу.

Исследование последствий срабатывания различных систем ПА

В данном исследовании были рассмотрены следующие системы ПА, для которых в сборниках ВНИИПО [13] опубликованы статистические данные: системы охранно-пожарной и пожарной сигнализации, установки или модули пожаротушения, системы противодымной защиты, системы оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре (СОУЭ), системы передачи извещений (СПИ).

Анализ статистических данных относительно обстановки с пожарами, приведенных в сборниках ВНИИПО, по указанным выше типам систем ПА позволил выделить следующие закономерности для исследуемого периода 2004–2023 гг.

- Доля *пожаров* (от общего количества пожаров с наличием систем ПА), в которых были задействованы установки пожарной сигнализации (независимо от результата срабатывания), всегда была больше по отношению к остальным видам ПА, возрастая от 30 % до 60 %. Доля пожаров, в которых были задействованы установки и модули пожаротушения, была наименьшей в пределах 5 %. До 2015 г. росла доля пожаров с установками охранно-пожарной сигнализации (от 28 % до 40 %), но далее она уменьшилась до 25 %. Доля пожаров с системами оповещения и управления эвакуацией не превышала 10 %.
- Показатели *материального ущерба*, приходящиеся на рассматриваемые типы систем ПА, изменялись хаотично, временных закономерностей не выявлено. Доля материального ущерба в ситуациях с работой систем противодымной защиты чаще всего была наи-

меньшей: наибольший материальный ущерб чаще всего был в ситуациях с установками пожарной сигнализации.

- Наибольшая доля *погибших* была выявлена в ситуациях с присутствием установок пожарной сигнализации. Эта величина в течение исследуемого периода возрастала от 30 % до 70 %. Влияние остальных видов систем ПА хаотичен и не имеет временных закономерностей.
- Наибольшая доля *травмированных* была также выявлена в ситуациях с присутствием установок пожарной сигнализации. Эта величина в течение исследуемого периода возрастала от 50 % до 75 %. Наибольшее количество травмированных зафиксировано в тех случаях, когда функционировали системы пожарной сигнализации совместно с противодымной защитой.

Если проанализировать общие и усредненные значения показателей обстановки с пожарами в ситуациях, где были задействованы рассматриваемые типы систем ПА (независимо от результата срабатывания) за исследуемый период 2004–2023 гг., то можно отметить, что за указанный период более 80 % пожаров, более 80 % материального ущерба, более 60 % спасенных материальных ценностей, более 75 % погибших и более 75 % травмированных были в ситуациях, когда работали установки охранно-пожарной сигнализации и установки пожарной сигнализации. Наибольшая доля пожаров, материального ущерба, спасенных материальных ценностей, погибших и травмированных в ситуациях применения систем пожарной автоматики приходилась на установки пожарной сигнализации; наименьшая доля пожаров, погибших, травмированных приходилась на системы

оповещения и управления эвакуацией, а наименьшая доля материального ущерба и спасенных материальных ценностей приходилась на системы противодымной защиты.

Исследование влияния количества пожаров на материальный ущерб, спасенные материальные ценности, количество погибших и травмированных на основании статистических данных ВНИИПО позволило сделать следующие выводы.

- При количестве пожаров менее 100–120 больше всего *погибших* (в среднем 40 человек в год независимо от числа пожаров) выявлено в ситуациях с присутствием установок охранно-пожарных сигнализаций; в ситуациях пожаров, где были задействованы остальные типы рассматриваемых систем пожарной автоматики, погибших в 4–5 раз меньше; с увеличением количества пожаров более 100–120 начинает возрастать количество погибших в ситуациях, где задействованы установки и модули пожаротушения (коэффициент парной корреляции $>0,6$). Влияние установок пожарно-охранной сигнализации уменьшается, в то время как роль других систем пожарной автоматики остается незначительной.
- При количестве пожаров менее 100–120 наибольший *материальный ущерб* присутствовал в тех случаях, когда использовались установки и модули пожаротушения; при этом *материальный ущерб* постепенно снижался; влияние остальных видов систем ПА на материальный ущерб меньше. При количестве пожаров более 100–120 с увеличением количества пожаров резко возрастает материальный ущерб в случаях применения систем оповещения и управления

эвакуацией (коэффициент парной корреляции $>0,5$). При количестве пожаров более 500 начинает возрастать материальный ущерб при установках пожарной сигнализации (коэффициент парной корреляции $>0,7$). При количестве пожаров более 1 200 наибольший материальный ущерб возникает в ситуациях с установками пожарной сигнализации (коэффициент парной корреляции $>0,6$).

- При количестве пожаров менее 100–120 больше всего *материальных ценностей* было спасено в случаях, связанных с установками охранно-пожарной сигнализации, а также системами и модулями пожаротушения. Когда количество пожаров превышает 100–120, наибольшее количество спасенных ценностей наблюдается при использовании установок и модулей пожаротушения, в то время как системы оповещения и управления эвакуацией показали менее эффективные результаты. Остальные типы систем ПА обеспечили гораздо меньшую сохранность материальных ценностей.
- При количестве пожаров менее 100–120 большее количество *травмированных* было зафиксировано в ситуациях с установками пожарной сигнализации (пожарная сигнализация) и системами противодымной защиты. При количестве пожаров более 100–120 больше всего травмированных было зафиксировано в ситуациях с установками пожарной сигнализации (коэффициент парной корреляции $>0,5$), в ситуациях с установками и модулями пожаротушения и системами оповещения и управления эвакуацией, меньшее количество травмированных — в ситуациях с системами оповещения и управления эвакуацией.

Сравнение систем ПА по показателю «количество погибших на один пожар (на 1 000 человек)» в ситуациях, когда система сработала и выполнила свою функцию, продемонстрировало, что наибольшее количество погибших наблюдается в случаях функционирования систем противодымной защиты и систем оповещения и управления эвакуацией. Наименьшее число жертв зафиксировано при работе установок пожарно-охранной сигнализации.

Сравнение систем ПА по критерию «количество травмированных на один пожар (на 1 000 человек)» в ситуациях, когда система сработала и выполнила свою функцию, показало, что больше всего на один пожар травмировалось также в случаях работы систем противодымной защиты и систем оповещения и управления эвакуацией, а меньше всего — при работе установок пожарно-охранной сигнализации.

Сравнение систем ПА по критерию «материальный ущерб» на один пожар в ситуациях, когда система сработала и выполнила свою функцию, показало, что больше всего материального ущерба на один пожар было получено также в случаях работы систем оповещения и управления эвакуацией, а меньше всего — при работе установок пожарной сигнализации и систем противодымной защиты.

Сравнение систем ПА по критерию «спасенные материальные ценности» на один пожар в ситуациях, когда система сработала и выполнила свою функцию, показало, что больше всего на один пожар было спасено также в случаях работы систем оповещения и управления эвакуацией и установок и модулей пожаротушения, а меньше всего — при работе установок пожарной сигнализации и систем противодымной защиты.

Ранее было отмечено, что стратегическая цель разработки и применения систем пожарной автоматики — снижение количества пострадавших от пожара (погибших и травмированных) и снижение материального ущерба. Изложенные выше результаты не совсем однозначны (и где-то даже противоположны), так как функционирование систем пожарной автоматики может иметь как потенциально негативные, так и положительные послед-

ствия; мы имеем дело со случайными процессами и случайными значениями показателей обстановки с пожарами. Поэтому в качестве критерия эффективности выполнения системой ПА заложенного в нее функционала предлагается критерий «относительная сохраненность ресурсов». Тогда для сравнения систем ПА можно предложить следующий безразмерный коэффициент K «относительная сохраненность ресурсов»:

$$K = \frac{SM \ Nt}{MD \ Nd} ,$$

где:

SM — спасенные материальные ценности, тыс. руб.;

MD — материальный ущерб, тыс. руб.;

Nt — количество травмированных, чел.;

Nd — количество погибших, чел.

Фактически коэффициент K отражает, как соотносятся спасенные во время ликвидации пожара ресурсы (люди и материальные ценности) с «потерями» этих ресурсов от пожара. Коэффициент K может принимать только положительные значения. Если материальный ущерб больше спасенных материальных ценностей и количество погибших больше количества травмированных, то это означает, что потери от результатов работы системы ПА больше сохраненных человеческих жизней и материальных ресурсов. В этом случае можно говорить, что система ПА недостаточно эффективно справилась со своим функциональным назначением. Чем больше по значению коэффициент K , тем меньше материальный ущерб по отношению к спасенным материальным ценностям и количество погибших меньше по отношению к травмированным (но живым). В этом случае можно говорить о более эффективной работе системы ПА.

В данном исследовании был выполнен расчет коэффициента K для рассматриваемых

типов систем ПА (установки охранно-пожарной сигнализации, установки пожарной сигнализации, установки и модули пожаротушения, системы противодымной защиты, системы оповещения и управления эвакуацией) за исследуемый период 2004–2023 гг. Чаще всего максимальные значения коэффициента K соответствовали системам оповещения и управления эвакуацией, причем с 2004 г. до 2015 г. наблюдалось уменьшение этого коэффициента (т. е. эффективность этих систем тоже уменьшалась), но в последующие годы ситуация восстановилась. На втором месте — системы противодымной защиты. Остальные типы систем ПА были менее эффективны с точки зрения рассматриваемого критерия, хуже всего показатели у систем охранно-пожарной сигнализации.

Также был выполнен расчет коэффициента K для случаев пожаров 2004–2023 гг., когда каждая из рассматриваемых систем ПА сработала и выполнила свою функцию. В данном исследовании эффективность

систем оповещения и управления эвакуацией по отношению к другим системам ПА также оказалась выше. На втором месте — установки и модули пожаротушения. Хуже всего по введенному критерию относительной сохраненности ресурсов показатели у систем охранно-пожарной сигнализации.

Выводы и заключение

Актуальность исследования последствий срабатывания систем ПА связана с ключевыми аспектами их успешного функционирования: технологический аспект (интеграция с современными цифровыми системами управления обнаружением и тушением пожаров, обеспечение безопасности уникальных объектов, снижение ложных срабатываний), нормативный правовой аспект (согласование с международными нормативными правовыми документами), экономический аспект (повышение эффективности систем пожарной автоматики позволяет значительно сократить потери от пожаров), социальный аспект (повышение культуры безопасности и психологического комфорта людей), научно-прикладной аспект (разработка математических моделей для прогнозирования развития пожара и оценки рисков, моделирование влияния человеческого фактора на эффективность пожарной автоматики).

Статистический анализ данных функционирования различных типов систем ПА в период 2004–2023 гг. выявил их крайне неоднородное влияние на показатели обстановки с пожарами. Результаты сравнительного анализа последствий функционирования различных типов систем автоматики по предложенному критерию относительной сохраненности ресурсов показали, что системы

оповещения и управления эвакуацией больше способствуют сохранению материальных и человеческих ресурсов.

Авторы статьи полагают, что полученные результаты анализа последствий функционирования различных типов систем ПА можно использовать для углубления знаний и для развития исследовательских и системно-аналитических компетенций у курсантов и слушателей вузов МЧС по рассмотренному вопросу. Полученные в исследовании результаты расширяют понимание последствий возникновения пожаров при различных вариантах срабатывания рассмотренных систем ПА.

По данным Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕСМИИС) [14] в 2024 г. объем сегмента ПА вырос на 12 % и достиг почти 55 млрд руб., рынок практически полностью занят российскими экосистемами пожарной безопасности. Их конкурентное преимущество — высокие скорости работы алгоритмов управления компонентов систем и устойчивость при масштабировании. Традиционно доминирующее место в структуре распределения систем пожарной безопасности занимают инфраструктурные объекты социального назначения (жилые здания, образовательные и медицинские организации и т. д.). Значительную группу также составляют производственные, складские, логистические объекты. В связи с расширением производственных кластеров, наращиванием логистической инфраструктуры, а также импортозамещением потребность в современных высокотехнологичных системах пожарной безопасности будет только возрастать. Вопрос экономической целесообразности производства системы ПА напрямую определяется надежностью и качеством

системы, затратами на ее производство, востребованностью и ценами на рынке. Решение этого вопроса невозможно без системных научно-прикладных изысканий и оценки влияния различных типов систем ПА и результатов их функционирования на показатели пожарной опасности. Авторы

полагают, что полученные результаты создают обоснованные предпосылки для дальнейших исследований влияния технико-технологических и экономических показателей систем ПА различных производителей на показатели обстановки с пожарами в случаях применения этих систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. The International Association of Fire Services. URL: <https://www.ctif.org/> (дата обращения: 25.09.2025).
2. Брушлинский Н. Н., Соколов С. В., Григорьева М. П. Анализ обстановки с пожарами в США // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2023. № 3. С. 98–104. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54796914> (дата обращения: 25.09.2025). DOI 10.25257/FE.2023.3.98-104
3. Итоги деятельности МЧС России. URL: <https://clck.ru/3RuqhQ> (дата обращения: 25.09.2025).
4. Сайт ФГБУ ВНИИПО МЧС России. URL: <https://www.vniipo.ru/> (дата обращения: 25.09.2025).
5. Демехин Ф. В. Методологические основы совершенствования автоматизированных систем противопожарной защиты предприятий нефтеперерабатывающего комплекса с применением видеотехнологий : автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. СПб., 2009. 43 с.
6. Зубарева В. А., Пашкевич Н. А., Апальков А. С. Анализ эффективности использования систем обнаружения и предотвращения пожара на промышленных предприятиях // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2012. № 2. С. 157–162. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17993898> (дата обращения: 25.09.2025).
7. Перец Н. А. Анализ эффективности систем автоматической пожарной сигнализации в условиях массового скопления людей // Вестник науки. 2025. Т. 4. № 7 (88). С. 397–402.
8. Порошин А. А., Кондашов А. А., Сибирко В. И. Оценка работоспособности систем пожарной сигнализации на объектах жилого фонда за период с 2016 по 2020 гг. // Технологии техносферной безопасности. 2021. № 1 (91). С. 19–29. DOI: 10.25257/TTS.2021.1.91.19-32
9. Обстановка с пожарами и эффективность срабатывания систем пожарной сигнализации на объектах судоходства / А. А. Порошин [и др.] // Безопасность техногенных и природных систем. 2022. № 3. С. 37–47. URL: <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-37-47> (дата обращения: 25.09.2025).
- 10 Соколов С. В., Костюченко Д. В. Эффективность средств пожарной автоматики на пожарах в жилых домах // Пожарная автоматика. Взрывобезопасность. 2014. № 6, Т. 23. С. 70–75. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22018782> (дата обращения: 25.09.2025).

11. СП 484.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Системы пожарной сигнализации и автоматизация систем противопожарной защиты. Нормы и правила проектирования. М., 2020. 23 с.
12. ГОСТ Р 59638–2021. Системы пожарной сигнализации. Руководство по проектированию, монтажу, техническому обслуживанию и ремонту. Методы испытаний на работоспособность. М., 2021. 19 с.
13. Пожары и пожарная безопасность в 2023 г. : информационно-аналитический сборник. Балашиха, 2024. 110 с.
14. Чудакова И., Воронин Д. Пожарная отрасль — в огне реформ // Рубеж : информационно-аналитический журнал. URL: <https://ru-bezh.ru/infografika/pozharnaya-otrasl-v-ogne-reform> (дата обращения: 25.09.2025).

REFERENCES

1. The International Association of Fire Services. URL: <https://www.ctif.org/> (accessed 25.09.2025).
2. Brushlinsky N. N., Sokolov S. V., Grigorieva M. P. Analysis of the fire situation in the USA // Fires and emergencies: prevention, liquidation. 2023. No. 3. Pp. 98–104. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54796914> (accessed 25.09.2025). DOI 10.25257/FE.2023.3.98-104
3. Results of the activities of the Ministry of Emergency Situations of Russia. URL: <https://clck.ru/3RuqhQ> (accessed 25.09.2025).
4. Website of the Federal State Budgetary Institution VNIPO of the Ministry of Emergency Situations of Russia. URL: <https://www.vniipo.ru/> (accessed 25.09.2025).
5. Demehin F. V. Methodological foundations for improving automated fire protection systems at oil refining enterprises using video technologies : Abstract of a Doctor of Technical Sciences dissertation. St. Petersburg. 2009. 43 p.
6. Zubareva V. A., Pashkevich N. A., Apalkov A. S. Analysis of the efficiency of using fire detection and prevention systems at industrial enterprises // Bulletin of the Scientific Center for Safety in the Coal Industry. 2012. No. 2. Pp. 157–162. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17993898> (accessed 25.09.2025).
7. Perets N. A. Analysis of the efficiency of automatic fire alarm systems in conditions of mass gatherings of people // Bulletin of Science. 2025. Vol. 4. No. 7 (88). Pp. 397–402.
8. Poroshin A. A., Kondashov A. A., Sibirko V. I. Assessment of the performance of fire alarm systems at residential buildings for the period from 2016 to 2020 // Technologies of technosphere safety. 2021. No. 1 (91). Pp. 19–29. DOI: 10.25257/TTS.2021.1.91.19-32
9. Fire situation and efficiency of fire alarm systems at shipping facilities / A. A. Poroshin et al. // Safety of man-made and natural systems. 2022. No. 3. Pp. 37–47. URL: <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-37-47> (accessed 25.09.2025).
10. Sokolov S. V., Kostyuchenko D. V. Efficiency of fire automatic systems during fires in residential buildings // Fire automatics. Explosion safety. 2014. No. 6. Vol. 23. Pp. 70–75. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22018782> (accessed 25.09.2025).
11. SP 484.1311500.2020. Fire Protection Systems. Fire Alarm Systems and Automation of Fire Protection Systems. Design Standards and Rules. Moscow, 2020. 23 p.

12. GOST R 59638–2021. Fire Alarm Systems. Guidelines for Design, Installation, Maintenance, and Repair. Performance Test Methods. Moscow, 2021. 19 p.
13. Fires and Fire Safety in 2023 : Information and Analytical Collection. Balashikha, 2024. 110 p.
14. Chudakova I., Voronin D. The Fire Industry — in the Fire of Reform // Rubezh. URL: <https://ru-bezh.ru/infografika/pozharnaya-otrasl-v-ogne-reform> (accessed 25.09.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Штерензон Вера Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, доцент Уральского федерального университета (620002, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19); доцент Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 660374; ORCID 0000-0001-5265-9489; e-mail: v.a.shterenzon@urfu.ru

Худякова Светлана Александровна, канд. пед. наук, доцент, начальник кафедры математики и информатики Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 788349; e-mail: hudyakovac@mail.ru

Али Елена Борисовна, канд. техн. наук, доцент, доцент Ижевского государственного технического университета (426069, Российская Федерация, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7); РИНЦ ID: 368391; ORCID 0000-0001-8380-8248; e-mail: Leb06@mail.ru

Шпаньков Андрей Владимирович, старший преподаватель кафедры математики и информатики Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 851206; e-mail: shpankov_andrey@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vera A. Shterenzon, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Ural Federal University (19 Mira St., Yekaterinburg, 620022, Russian Federation), Associate Professor of UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Yekaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 660374; ORCID 0000-0001-5265-9489; e-mail: v.a.shterenzon@urfu.ru

Svetlana A. Khudyakova, Cand. Sci. (Ped.), Associate Professor, Head of Department, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Yekaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 788349; e-mail: hudyakovac@mail.ru

Elena B. Ali, Cand. Sci (Eng), Associate Professor, Izhevsk State Technical University (7 Studencheskaya St., Izhevsk, 426069, Russian Federation); ID RSCI: 368391; ORCID: 0000-0001-8380-8248; e-mail: Leb06@mail.ru

Andrey V. Shpankov, Senior lecturer, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Yekaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 851206; e-mail: shpankov_andrey@mail.ru

УДК 614.842.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ВЕЛИЧИН ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

Молодоженцев Павел Владимирович

Специальное управление ФПС № 10 МЧС России, г. Трехгорный, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрена пожарная опасность объектов энергетики Российской Федерации. Разработана методика проведения экспериментов с горючими веществами и материалами в замкнутых объемах, изготовлена необходимая материальная база, подобраны оборудование и средства фиксации. Испытаниям подвергалось пространство внутри изготовленной огневой камеры. Исследования в замкнутом объеме проводились в условиях, максимально приближенных к реальным, при воздействиях опасных факторов пожара. Определяемые характеристики опасных факторов пожара и другие параметры измерялись непосредственно поверенными контрольно-измерительными приборами, дополнительно использован математический аппарат статистической обработки экспериментальных данных.

При помощи полевой модели с использованием программы FDS (Fire Dynamic Simulator), разработанной Национальным институтом стандартов и технологии (NIST), проведено моделирование сценариев пожара по параметрам, полученным в результате натурных испытаний. В программе реализована вычислительная гидродинамическая модель теплопереноса при горении, которая использует уравнение Навье — Стокса для низкоскоростных температурно-зависимых потоков.

Анализ полученных результатов определил расхождения и зависимости между экспериментальным и программным методом исследования. Как следствие, вычислены величины, применяемые для корректировки расчетов с учетом определенных факторов. Намечены задачи дальнейшего совершенствования исследований по данному направлению.

Ключевые слова: безопасность, методика, эксперимент, огневая камера, чашечная горелка, компьютерная модель

Для цитирования: Молодоженцев П. В. Определение расчетных величин опасных факторов пожара для объектов энергетики // Техносферная безопасность. 2026. № 1 (50). С. 62–72.

DETERMINATION OF CALCULATED VALUES OF FIRE HAZARDS FOR ENERGY FACILITIES

Pavel V. Molodozhentsev

Special FPS Department No. 10 of the Russian Ministry of Emergency Situations, Trekhgornyy, Russian Federation

Abstract. The fire danger of energy facilities in the Russian Federation is considered. A method of conducting experiments with combustible substances and materials in closed volumes has been developed, the necessary material base has been manufactured, equipment and fixation devices have been selected. The space inside the manufactured firing chamber was subjected to tests. The research in a closed volume was carried out in conditions as close as possible to real conditions under the influence of fire hazards. The determined characteristics of fire hazards and other parameters were measured directly by certified control and measuring devices, and a mathematical apparatus for statistical processing of experimental data was additionally used.

Using a field model using the FDS (Fire Dynamic Simulator) program developed by the National Institute of Standards and Technology NIST/NIST, fire scenarios were simulated using parameters obtained as a result of field tests. The program implements a computational hydrodynamic model of heat and mass transfer in gorenje, which uses the Navier-Stokes equation for low-velocity temperature-dependent flows.

The final analysis of the results revealed discrepancies and dependencies between the experimental and programmatic research method. As a result, the values used to adjust calculations taking into account certain factors are calculated. The tasks of further improvement of research in this area are outlined.

Keywords: safety, methodology, experiment, fire chamber, cup burner, computer model

For citation: Molodozhentsev P. V. Determination of calculated values of fire hazards for energy facilities // Technospheric safety. 2026. No. 1 (50). Pp. 62–72.

Введение

Энергетические ресурсы в современном обществе обладают исключительной ценностью. По этой причине противопожарной защите объекта энергетики необходимо уделять особое внимание, в том числе совершенствовать методы прогнозирования пожара, огнетушащие вещества и способы их подачи.

Общая статистика пожаров, произошедших на энергетических объектах страны за последние 10 лет, демонстрирует стабильный рост. Причиной является износ технологического оборудования и систем противопожарной защиты. Наибольший материальный ущерб экономике наносят крупные пожары, которые составляют лишь 3 % от общего числа; на долю пожаров, про-

изошедших в замкнутых объемах, приходится 73 % случаев. В частности в машинных отделениях происходит 72 % пожаров, в котельных отделениях — 23 %, в кабельных тоннелях — 5 % [1].

Предупредить или свести к минимуму ущерб от пожара — перспективная задача в рамках обеспечения национальной безопасности Российской Федерации [2].

В настоящее время в числовом выражении не определены расхождения и зависимости между экспериментальным и программным методом исследования при прогнозировании пожаров в замкнутых объемах на объектах энергетики. В рамках решения данной проблемы необходимо:

- переоценить горючую нагрузку объектов энергетики;

- составить программу исследований;
- спланировать, изготовить и подобрать необходимое оборудование;
- провести программное моделирование сценариев пожаров, так как помещения объектов энергетики имеют большие объемы и проведение натуральных испытаний в большинстве случаев затруднительно;
- найти расхождения и зависимости экспериментального и программного методов исследования.

Найденные в работе решения дадут возможность создать методику, которая заменит дорогостоящие эксперименты компьютерной моделью. Математическое моделирование с определенными поправками позволит получить достаточно точные данные, необходимые для анализа [3].

Таким образом, использование полученных в результате физического эксперимента поправочных коэффициентов в динамических компьютерных моделях позволит более точно вычислить значения опасных факторов пожара, сосредоточенных в ограниченном

пространстве, и оценить их влияние на прекращение горения в различных зонах исследуемого объема.

Результаты исследований и их обсуждение

Горючую нагрузку закрытых объемов объектов энергетики составляют: уголь, мазут, дизельное топливо, водород, горючие фильтрующие материалы, изоляция электрических кабелей, конструкционные материалы на основе пластмасс, различные масла, другие вещества, материалы [4].

В результате анализа статистики пожаров из всего спектра горючего стоит выделить трансформаторное масло и изоляцию электрических кабелей, подвергающихся горению чаще других. На предприятиях нефтепереработки чаще происходит горение бензинов, мазутов, горючих газов.

Сведения о пожарной опасности перечисленных веществ и материалов, а также значения интенсивности подачи огнетушащих веществ представлены в табл. 1 [5].

Таблица 1
Пожарная опасность веществ, материалов и параметры подачи воды

Table 1

Fire hazard of substances, materials and water supply parameters

Вещество, материал Substance, material	Скорость распространения огня, м/мин The speed of fire propagation, m/min	Интенсивность подачи воды, л/с·м ² Intensity of water supply, l/s·m ²
Трансформаторное масло Transformer oil	1	0,2
Бензин Gasoline	3	0,15
Дизельное топливо Diesel fuel	3	0,15
Изоляция кабелей в кабельных полуэтажах — под напряжением Insulation of cables in cable semi-floors — under voltage	0,2–0,8	0,2

Окончание таблицы 1

Вещество, материал Substance, material	Скорость распространения огня, м/мин The speed of fire propagation, m/min	Интенсивность подачи воды, л/с·м ² Intensity of water supply, l/s·m ²
Изоляция кабелей в горизонтальных кабельных туннелях — при снятом напряжении Insulation of cables in horizontal cable tunnels — with the voltage removed	0,15–0,3	0,2

Анализ данных табл. 1 показывает: наибольшая скорость распространения огня является свойством бензинов и дизельного топлива. Согласно руководству по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарах и резервуарных парках интенсивность подачи огнетушащих веществ на тушение пожаров в машинных залах при горении продуктов нефтепереработки равна: водой 0,1–0,2 л/с·м², пенными составами 0,05–0,2 л/с·м² [6]. При длительном горении продуктов нефтепереработки распространение пожара происходит в геометрической прогрессии, возможно, их вскипание и последующий выброс. Все перечисленные факторы негативно влияют на процесс ликвидации пожара и минимизацию последствий.

В целях решения данной задачи на первом этапе составлена программа испытаний. Основные условия проведения испытаний определены в соответствии с требованиями ГОСТ Р 53280.3–2009 «Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Часть 3. Газовые огнетушащие вещества. Методы испытаний» [7].

Для проведения экспериментальных испытаний изготовлены огневая камера, чашечные горелки, подобраны средства измерения и фиксации результатов эксперимента. Основные контрольно-измерительные приборы: четырехканальный программный регулятор температуры «ТЕРМОДАТ-19Е6», термогигрометр CENTER 310, тепловизионная

камера Dräger UCF 9000, весы товарные CAS PB-150, газоанализатор «АГМ-505», напоромер «ДГ-СВ-УЗ».

Огневая камера представляет собой замкнутый объем из негорючих материалов с параметром негерметичности не более 0,001 м⁻¹, объемом 2,5 м³, высотой 1,36 м, с отношением длины к ширине и высоте в пределах 1:1:1. Огневая камера оборудована отверстиями для подачи огнетушащих веществ и размещения измерительных датчиков согласно схеме, приведенной на рис. 1 [7].

В качестве модельных очагов используются цилиндрические горелки (4 шт.) из нержавеющей стали или стали по ГОСТ 5632–2014 любой марки толщиной стенки 5 ± 1 мм с внутренним диаметром 80 ± 5 мм и высотой 110 ± 2 мм, которые имеют защитные экраны. Схема горелки приведена на рис. 2.

Для проведения испытаний на огневой камере две горелки размещают в углах огневой камеры относительно пола на уровне 10 % и по одной горелке на уровнях 50 % и 90 % от высоты камеры. Каждая горелка должна быть размещена на расстоянии 50 ± 5 м от стены камеры.

Заливают в горелки горючую жидкость (бензин марки АИ-92) так, чтобы ее уровень был на 50 ± 3 мм ниже верхнего среза горелки. Поджигают горючее и дают выдержку 30 ± 3 с, обеспечивая доступ воздуха в камеру.

По истечении времени свободного горения прекращают доступ воздуха, герметизируют камеру до степени, указанной в условиях проведения испытаний, и начинают фиксировать измерения. Фиксируют время

затухания горючей жидкости в чашечных горелках, определяют количество выгоревшей жидкости, проводят еще два определения. Огневая камера и необходимое оборудование представлены на рис. 3.

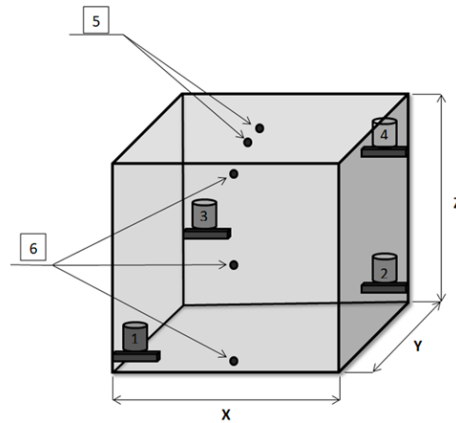


Рис. 1. Схема расположения чашечных горелок и технологических отверстий в огневой камере:
1–4 — чашечные горелки; 5, 6 — технологические отверстия

Fig. 1. Arrangement of cup burners and process openings in the fire chamber:
1–4 — cup burners; 5, 6 — process holes

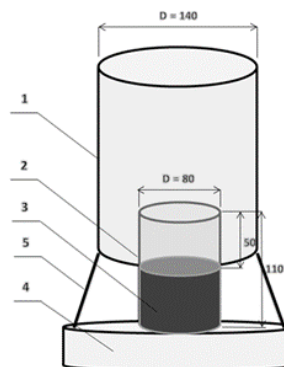


Рис. 2. Схема чашечной горелки:

1 — защитный кожух; 2 — горелка; 3 — горючая жидкость; 4 — полка; 5 — соединительные стержни

Fig. 2. Diagram of the cup burner:

1 — protective casing; 2 — burner; 3 — flammable liquid; 4 — shelf; 5 — connecting rods

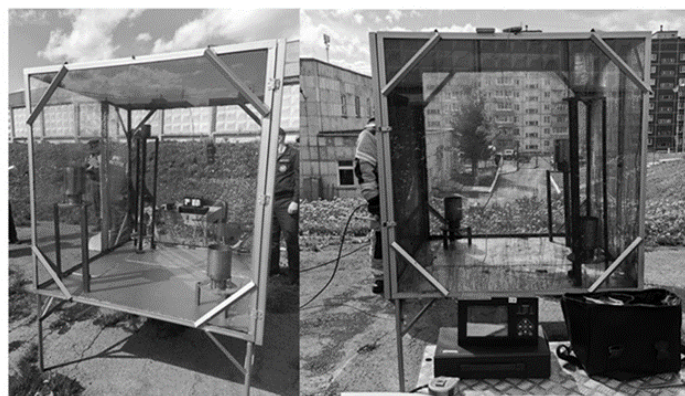


Рис. 3. Огневая камера и оборудование

Fig. 3. Firing chamber and equipment

При планировании эксперимента основными фиксируемыми параметрами выбраны: время и вес сгораемого топлива, динамика изменения температур на уровне защитного кожуха горелки, на уровне 1,3 м от пола огневой камеры, значения других опасных факторов пожара.

Погодные условия до начала эксперимента: температура воздуха в огневой камере до начала эксперимента — 24 °С, ветер и осадки отсутствуют, влажность воздуха — 44 %, атмосферное давление — 100,65 кПа.

После проведения трех исследований зафиксированы следующие средние временные показатели самозатухания горелок: № 3 — 8 мин 00 с; № 1 — 9 мин 00 с; № 2 — 9 мин 50 с; № 4 — 14 мин 55 с. Порядок самозатухания горелок не изменялся, максимальный временной интервал расхождения составил 19 с. В результате наблюдений объем камеры заполнился плотной массой дыма после 4 мин свободного горения, далее видимость снижалась, наиболее плотный дым наблюдался после затухания горелки № 2. Максимальное температурное значение на уровне защитного кожуха горелки составило 312 °С, в центре камеры на уровне 1,3 м от уровня пола — 105 °С, минимальное содержание O_2 — 10,5 %, максимальное значение

CO — 3 840 мг/м³, итоговая влажность — 65,0 %. Повторного возгорания после завершения всех исследований не зафиксировано.

В современных исследованиях применяются программные методы изучения природы происходящих процессов. Достоверность получаемых в результате таких моделирований данных требует подтверждения.

Моделирование развития пожара, в основу которого положены параметры проведения натурного эксперимента, проводилось по полевой модели с помощью программы FDS (Fire Dynamic Simulator), разработанной Национальным институтом стандартов и технологий (США), с использованием методики расчета оценки пожарного риска, выполненной в соответствии с приложением к приказу МЧС России 26 июня 2024 г. № 533 «Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» [8].

На рис. 4–7 представлены результаты моделирования, показана динамика развития опасных факторов пожара. Критическое время по каждому из опасных факторов пожара определялось как время достижения этим фактором предельно допустимого значения на высоте 1,3 м от пола (на графиках обозначено прямой линией).

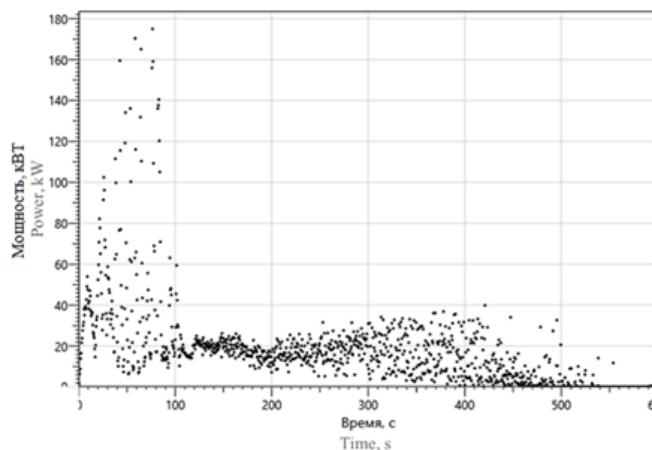


Рис. 4. Мощность пожара

Fig. 4. Fire power

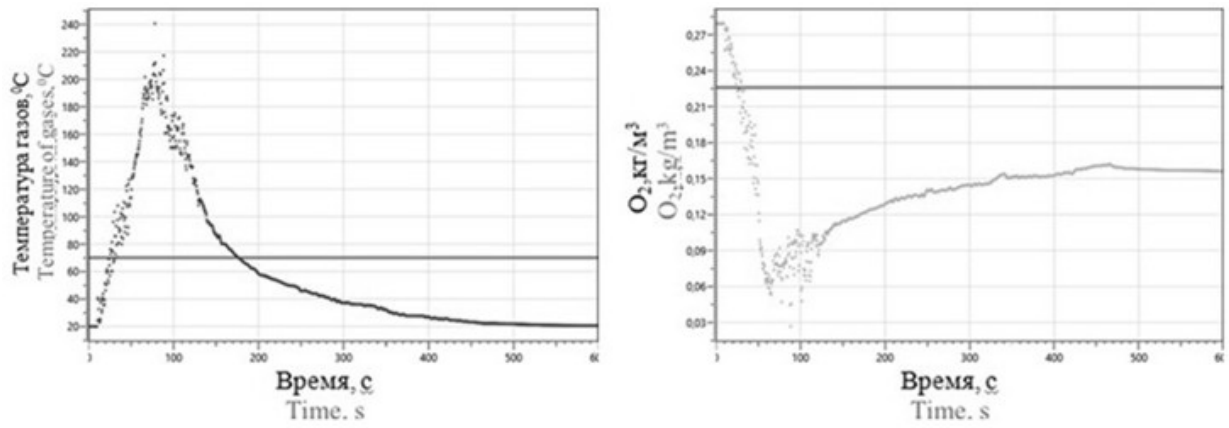


Рис. 5. График изменения температуры и кислорода в сравнении с предельно допустимыми значениями
 Fig. 5. Graph of temperature and oxygen changes in comparison with the maximum permissible values

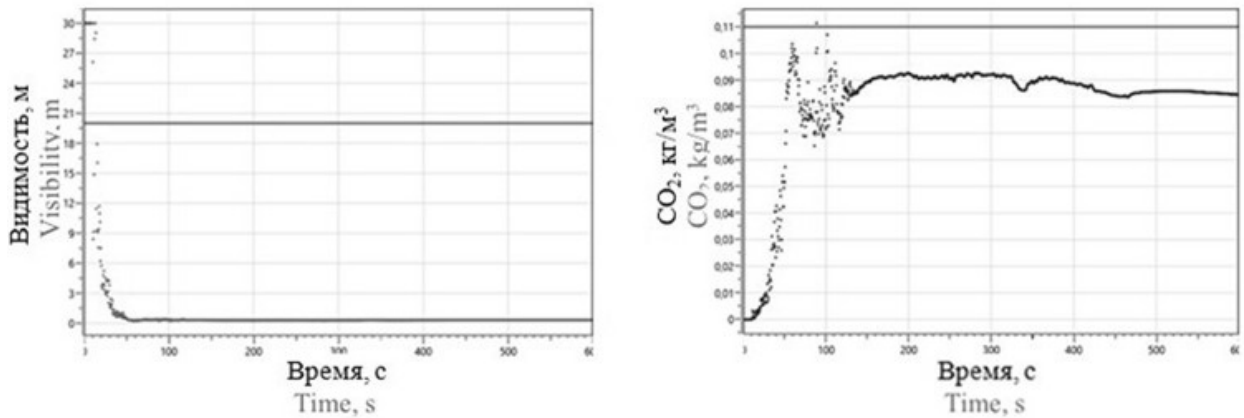


Рис. 6. График изменения и видимости и углекислого газа в сравнении с предельно допустимыми значениями
 Fig. 6. Graph of changes in both visibility and carbon dioxide in comparison with the maximum permissible values

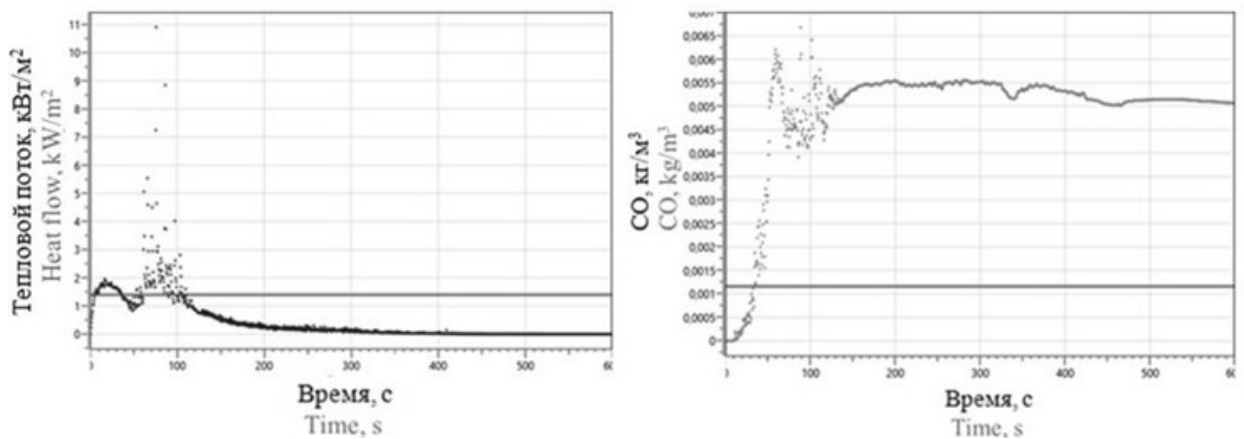


Рис. 7. График изменения теплового потока и оксида углерода в сравнении с предельно допустимыми значениями
 Fig. 7. Graph of changes in heat flow and carbon monoxide in comparison with the maximum permissible values

В результате проведения натурального эксперимента и моделирования пожара появилась возможность сравнения некоторых измеренных параметров, представленных в табл. 2.

Установим наличие статистически значимой взаимосвязи между данными, полученными в результате натурального эксперимента, и данными моделирования пожара.

Таблица 2
Сравнительные показатели исследований
Table 2
Comparative research indicators

Параметр пожара, ед. изм. Fire parameter, units	Эксперимент Experiment	Моделирование Simulation	Процентная разница, % Percentage difference, %	
			от меньшего к большему from less to more	от большего к меньшему from more to less
Время горения, с Gorenje time, s	837	556	57,01	-36,31
Температура, °C Foamed PE	105	218	107,62	-51,83
Содержание O ₂ , % O ₂ Content, %	10,5	6	75	-42,86
Содержание CO, мг/м ₃ CO content, mg/m ₃	3 840	5 500	43,23	-30,18

Среднее значение процентной разницы от большего к меньшему составило 40 %, от меньшего к большему — 71 %. Из данных табл. 2 видно, что два параметра моделирования значительно выше экспериментальных данных (температура и содержание CO, средняя процентная разница 75,5 %), два параметра ниже экспериментальных данных (время горения и содержание O₂, средняя процентная разница 66 %). Полученные средние процентные разницы позволяют ввести поправочные коэффициенты для адаптации результатов исследования.

Таким образом, в целях получения достоверных данных при использовании программы FDS для моделирования сценария пожара на объекте энергетики требуется введение поправочных коэффициентов: время горения — 0,64, температура — 2, содержание O₂ — 0,6, содержание CO — 1,4.

Потенциальные расхождения полученных данных скрыты в невозможности задать в программе точные данные, касающиеся материалов ограждающих конструкций, примененных в экспериментальной огневой

камере, дополнительную трудность вносит достоверное измерение коэффициента негерметичности камеры, а также шаг установки высоты регистратора параметров опасных факторов пожара, равный 0,1 м [9].

Установим различия в средних значениях методом дисперсионного анализа. В качестве нулевой гипотезы принимается утверждение: «средние параметры экспериментальных данных не зависят от параметров моделирования». Дисперсионный анализ проведен с помощью пакета анализа данных в MS Excel. Результаты дисперсионного анализа, проведенного по строкам данных, представлены в табл. 3, 4.

В табл. 4 фактическое отношение Фишера ($F = 27,203\ 45$) больше критического ($F_{\text{крит}} = 6,591\ 382$), следовательно, средние классы градации отличаются друг от друга, значит, исследуемый фактор существенно влияет на изменение данных. Учитывая полученную вероятность достоверности (P -Значение) нулевой гипотезы ниже предельного значения допустимой ошибки (0,05), нулевая гипотеза не принимается.

Значение F -статистики больше критического значения, соответствующего выбранному уровню значимости, дисперсии случай-

ных величин признаются неодинаковыми. Следовательно, различия в средних показателях являются статистически значимыми [10].

Таблица 3
Однофакторный дисперсионный анализ, 1-я группа данных

Table 3

One-factor analysis of variance, the first group of data

Группы Groups	Счет Account	Сумма The amount	Среднее Average	Дисперсия Variance
Время горения, с Gorenje time, s	2	1 429	714,5	50 244,5
Температура, °C Foamed PE	2	323	161,5	6 384,5
Содержание O ₂ , % O ₂ Content, %	2	16,5	8,25	10,125
Содержание CO, мг/м ₃ CO content, mg/m ₃	2	9 340	4 670	1 377 800

Таблица 4
Однофакторный дисперсионный анализ, 2-я группа данных

Table 4

One-factor analysis of variance, the second group of data

Источник вариации The source of the variation	SS	df	MS	F	Среднее Average	Дисперсия Variance
Между группами Between groups	29 266 275	3	9 755 425	27,203 45	0,004 029	6,591 382
Внутри групп Within groups	1 434 439	4	358 609,8	—	—	—
Итого Total	30 700 714	7	—	—	—	—

Заключение

В результате исследования подтверждена гипотеза о возможности моделирования сценариев развития опасных факторов пожара, в замкнутых объемах на объектах энергетики с помощью программы FDS при условии применения найденных поправочных коэффициентов.

Задачами дальнейшего совершенствования исследований по данному направлению

являются разработка программы эксперимента и создание огневой камеры большего объема, предусмотренного ГОСТ Р 53280.3–2009 «Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Часть 3. Газовые огнетушащие вещества. Методы испытаний».

Наиболее сложной задачей продолжения исследований может стать совмещение модели пожара в замкнутых объемах и факторов воздействия огнетушащих веществ на происходящие процессы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Молодоженцев П. В., Ищенко А. Д. Тушение пожаров на объектах энергетики в начальной стадии // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 2 (51). С. 74–84. URL: <https://ntp.edufire37.ru/uploads/2024/06/СПГЗ-251-2024.pdf> (дата обращения: 09.01.2026).
2. О Стратегии в области развития гражданской обороны, защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, обеспечения пожарной безопасности и безопасности людей на водных объектах на период до 2030 года : указ Президента РФ от 16.10.2019 № 501. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72771784/> (дата обращения: 09.01.2026).
3. Маркелов Г. Е. Основные принципы построения математических моделей // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2020. № 4. URL: <https://clck.ru/3SE2Ao> (дата обращения: 13.02.2026).
4. Собурь С. В. Пожарная безопасность объектов электроэнергетики // Инфра-Инженерия. 2023. С. 123. URL: <https://znanium.ru/catalog/document?id=475320> (дата обращения: 13.02.2026).
5. Об особенностях применения автоматических установок сдерживания пожара / А. И. Бондар [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2019. № 6 (28). С. 73–76. URL: <https://clck.ru/3SE2WV> (дата обращения: 12.01.2026).
6. Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарах и резервуарных парках, утвержденное ГУГПС МВД РФ 12.12.1999. URL: <https://vzrk.ru/public/images/31.pdf> (дата обращения: 12.01.2026).
7. ГОСТ Р 53280.3–2009. Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Часть 3. Газовые огнетушащие вещества. Методы испытаний. М., 2009. 8 с.
8. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : приказ МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533. URL: https://base.garant.ru/409615151/#block_21 (дата обращения: 12.02.2026).
9. Fenix+ 3 // MST : сайт. URL: <https://mst.su/fenix3/features/> (дата обращения: 02.02.2026).
10. Семенов М. Е. Статистическое моделирование и прогнозирование. Лекция 5. Дисперсионный анализ. URL: <https://clck.ru/3SE6Fm> (дата обращения: 17.01.2025).

REFERENCES

1. Molodozhentsev P. V., Ishchenko A. D. Fire Extinguishing at Energy Facilities in the Initial Stage // Modern Problems of Civil Defense. 2024. No. 2 (51). Pp. 74–84. URL: <https://ntp.edufire37.ru/uploads/2024/06/СПГЗ-251-2024.pdf> (accessed 09.01.2026).
2. On the Strategy for the Development of Civil Defense, Protection of the Population and Territories from Emergencies, Ensuring Fire Safety and the Safety of People on Water Bodies for the Period up to 2030 : Decree of the President of the Russian Federation of 16.10.2019 No. 501. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72771784/> (accessed 09.01.2026).
3. Markelov G. E. Basic principles of constructing mathematical models // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. 2020. No. 4. URL: <https://clck.ru/3SE2Ao> (accessed 13.02.2026).
4. Sobur S. V. Fire safety of electric power facilities // Infra-Engineering. 2023. P. 123. URL: <https://znanium.ru/catalog/document?id=475320> (accessed 13.02.2026).

5. On the features of the use of automatic fire containment systems / A. I. Bondar [et al.] // Pozharovzryvobezopasnost. 2019. No. 6 (28). Pp. 73–76. URL: <https://clck.ru/3SE2WV> (accessed 12.01.2026).

6. Guidelines for extinguishing oil and petroleum products in tanks and tank farms, approved by the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation on 12.12.1999. URL: <https://vzrk.ru/public/images/31.pdf> (accessed 12.01.2026).

7. GOST R 53280.3–2009. Automatic fire extinguishing systems. Fire Extinguishing Agents. Part 3. Gaseous Fire Extinguishing Agents. Test Methods. Moscow, 2009. 8 p.

8. On Approval of the Methodology for Determining the Estimated Values of Fire Risk at Industrial Facilities : Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 26.06.2024 No. 533. URL: https://base.garant.ru/409615151/#block_21 (accessed 12.02.2026).

9. Fenix+ 3 // MST. URL: <https://mst.su/fenix3/features/> (accessed 02.02.2026).

10. Semenov M. E. Statistical modeling and forecasting. Lecture 5. Analysis of variance. URL: <https://clck.ru/3SE6Fm> (accessed 17.01.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Молодоженцев Павел Владимирович, начальник Специального управления ФПС № 10 МЧС России (456080, Российская Федерация, Челябинская область, г. Трехгорный, ул. Заречная, д. 13); РИНЦ ID: 1186021; SPIN-код 7232-7677; e-mail: ugps6okvr@yandex.ru

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Pavel V. Molodozhentsev, Head of the Department, Special FPS Department No. 10 of the Ministry of Emergency Situations of Russia (13 Zarechnaya St., Trekhgorny, Chelyabinsk region, 456080, Russian Federation); ID RSCI: 1186021; SPIN-code 7232-7677; e-mail: ugps6okvr@yandex.ru

УДК 614.8

ПРИРОДНЫЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОБЪЕКТАХ ТЕХНОСФЕРЫ

Петрова Елена Геннадиевна

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. Объекты техносферы могут подвергаться различным негативным внешним воздействиям, в том числе и со стороны опасностей природного характера. Опасные и неблагоприятные природные процессы и явления способны стать как прямой, так и косвенной причиной чрезвычайных ситуаций (ЧС) на технологических или инфраструктурных объектах. В обоих случаях это приводит к авариям на них или нарушению режима их нормального функционирования. Возникающие ЧС характеризуются как природно-техногенные. Цель данного исследования — проанализировать особенности природных воздействий на техносферу, проследить их возможные последствия, приводящие к формированию ЧС. Это важно для планирования мероприятий по повышению защищенности техносферных объектов от таких внешних воздействий и предотвращению нежелательных последствий. Основным методом исследования является мониторинг природно-техногенных ЧС, происходящих на территории России, путем фиксации этих событий в авторской электронной базе данных с последующим их анализом. Более 90 % всех зарегистрированных в БД природно-техногенных событий было обусловлено воздействием опасных гидрометеорологических процессов и явлений. Проведена группировка субъектов РФ по уровню риска возникновения природно-техногенных ЧС, выделены регионы наибольшего риска.

Работа выполнена по теме 1.7 «Опасность и риск природных процессов и явлений» государственного задания Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова № АААА-А21-121051300175-4.

Ключевые слова: опасные природные процессы, неблагоприятные природные явления, техносферная авария, чрезвычайные ситуации, база данных, природно-техногенный риск

Для цитирования: Петрова Е. Г. Природные факторы формирования чрезвычайных ситуаций на объектах техносферы // Техносферная безопасность. 2026. № 1 (50). С. 73–82.

NATURAL FACTORS CAUSING EMERGENCY SITUATIONS AT TECHNOSPHERE FACILITIES

Elena G. Petrova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Abstract. Technosphere objects can be exposed to various negative external influences, including those from natural hazards. Dangerous and unfavorable natural processes and phenomena can become both a direct and indirect cause of emergency situations (ES) at technological and infrastructure facilities. In both cases, this leads to accidents or disruptions to their normal functioning. These emergencies are characterized as natural and man-made.

The purpose of this study is to analyze the characteristics of natural impacts on the technosphere and track their potential consequences leading to emergency situations. This is important for planning measures to improve the security of technosphere facilities from such external impacts and prevent undesirable consequences. The primary research method is monitoring natural and man-made emergencies occurring in Russia by recording these events in the author's electronic database and subsequently analyzing them. More than 90 % of all natural-technological events registered in the database were caused by the impact of hazardous processes and phenomena of hydrometeorological nature. Russian regions were grouped by risk level for natural and man-made emergencies, and the regions with the highest risk were identified.

This work was completed under Topic 1.7 "Danger and risk of natural processes and phenomena" of the state assignment of Lomonosov Moscow State University named after M.V. Lomonosov No. AAAA-A21-121051300175-4.

Keywords: hazardous natural processes, adverse natural phenomena, technospheric accidents, emergencies, database, natural and man-made risks

For citation: Petrova E. G. Natural factors causing emergency situations at technosphere facilities // Technospheric safety. 2026. No. 1 (50). Pp. 73–82.

Введение

В числе факторов, которые могут приводить к формированию чрезвычайных ситуаций (далее — ЧС) на различных техносферных объектах, можно выделить не только экономические, технические, социальные, но и природные. К экономическим факторам техносферной аварийности можно отнести высокую степень физического износа производственных фондов и оборудования, нехватку финансовых и других ресурсов на их замену и обновление, неправильное распределение материальных средств и другие. Технические причины аварий включают в себя целый комплекс, охватывающий качественные характеристики применяемых

технологий, используемых материалов, защитных сооружений и других составляющих. Факторы социального характера связаны с нарушениями трудовой дисциплины, правил техники безопасности, преднамеренными негативными действиями различных лиц, ошибками персонала. Наряду с этим важную роль играют природные факторы.

Разного рода процессы и явления природного характера опасны не только своим разрушительным воздействием, иногда приводящим к жертвам или пострадавшим среди населения, экологическому и экономическому ущербу, но и тем, что они способны становиться прямой или косвенной причиной аварии или нарушения в работе на промышленных предприятиях, в сельском

хозяйстве, сфере транспорта, связи, рекреации и туризма и других техногенных системах. Кроме того, они могут вызывать различные сбои штатного функционирования автоматики и электроники. В первом случае, если речь идет о прямых механических воздействиях, их могут оказывать опасные природные процессы таких типов, которые обычно имеют в виду, говоря о стихийных бедствиях. К ним относятся опасные геологические, гидрологические, атмосферные или биологические процессы и явления. Во втором случае отмечается влияние различных процессов волнового характера (магнитных бурь или других возмущений геофизических полей), под воздействием которых могут выходить из строя автоматические и электронные системы. Помимо этого, природные факторы как первого, механического, так и второго, волнового типа могут оказывать влияние на физическое и психологическое состояние людей, что также может стать причиной аварии. К особенно разрушительным последствиям приводят опасные стихийные процессы катастрофических масштабов.

Любые аварийные события и ЧС в техносфере, которые происходят под воздействием природных опасностей того или иного характера и генезиса, мы рассматриваем как природно-техногенные. Этот термин используется также в работах других авторов, хотя они трактуют его по-разному [1–3]. Общим свойством всех природно-техногенных событий является то, что они отличаются своим комплексным характером, являясь одновременно как природными — по источнику негативного воздействия и исходящей опасности, так и техногенными — по реципиенту такого воздействия и месту возникновения аварии. Такой комплексный характер природно-тех-

ногенных ЧС создает значительные трудности при планировании и осуществлении превентивных защитных мер и ликвидации возникающих последствий.

Настоящая работа направлена на исследование именно таких аварий и ЧС природно-техногенного характера. Рассматривается и анализируется их природная составляющая, и выделяются техносферные объекты, которые могут подвергаться воздействиям со стороны опасных и неблагоприятных природных процессов и явлений.

Материалы и методы

Для решения поставленных задач использовалась информация, собранная автором за 1991–2024 гг. в электронной базе данных (далее — БД) по ЧС в техносфере, обусловленным различными причинами и факторами. В БД аккумулируется информация обо всех типах ЧС техногенного и природно-техногенного характера, происходящих на территории РФ. В связи с достаточно широким диапазоном ее охвата как в региональном, временном, так и в отраслевом разрезе, БД является важным универсальным и многофункциональным инструментом, который может применяться в качестве основного рабочего материала для проведения разных тематических исследований в рамках общей проблематики техногенных и природно-техногенных опасностей и риска. События природного характера фиксируются в рассматриваемой БД только тогда, когда они выступают триггером для возникновения дальнейших аварий на объектах техносферы или нарушают штатный режим их функционирования.

Более детально структура и функциональные особенности авторской БД обсуждаются

в работах [4, 5]. Преобладающими источниками исходных данных для пополнения БД являются оперативные сводки МЧС России и его региональных управлений. Дополнительными источниками информации служат сообщения ведущих российских информационных агентств (ТАСС, РИА «Новости», Интерфакс). Вся используемая информация является открытой. Это относится в том числе и к оперативным сводкам МЧС России, которые публикуются на сайте ведомства в интернете в открытом доступе в круглосуточном режиме.

Собираемая в БД информация определенным образом структурируется. Это позволяет в дальнейшем производить необходимую компьютерную обработку данных в соответствии с решаемыми целями и задачами, в зависимости от направления конкретных исследований. Вся информация проходит предварительный авторский отбор, оценивается и анализируется. Данные накапливаются и хранятся в БД в табличной форме. По каждому регистрируемому событию указывается его порядковый номер в базе, время и место возникновения и последствия (число погибших и пострадавших, материальный ущерб). Проводится авторская оценка, к какому типу по классификации МЧС может быть отнесена произошедшая ЧС, выделяются основные условия, причины и факторы ее формирования. Обязательно приводится источник информации о регистрируемом событии.

Главными рабочими инструментами БД для дальнейшей обработки и анализа накопленного массива данных являются поисковые запросы (по ключевым словам или параметрам) и сортировка данных. С их помощью в БД была проведена выборка информации о природно-техногенных ЧС (далее — ПТЧС) всех возможных типов.

Затем для анализа отобранных данных были использованы методы математической статистики. Вычислены доли ПТЧС, обусловленных отдельными типами опасных природных процессов и явлений, в общем количестве ПТЧС. Аналогичные расчеты были произведены и по отдельным типам объектов техносферы и типам ЧС, определены доли ПТЧС различных типов в их общем числе. По каждому из регионов России были рассчитаны суммарные количества событий всех типов природно-техногенных ЧС в целом, а также вычислены средние арифметические значения (μ) и стандартные отклонения (σ) по всей выборке. Результаты проведенного анализа обсуждаются в следующем разделе.

Обсуждение результатов

Для того чтобы оценить вклад отдельных типов неблагоприятных и опасных природных процессов и явлений в возникновение природно-техногенных ЧС, среди всего массива накопленной в БД информации (около 30 тыс. единиц хранения) были проведены соответствующие поисковые запросы. В каждом из таких запросов использовались различные ключевые слова (или неизменяемые части слов, чтобы исключить влияние их морфологических изменений), набор которых корректировался в процессе, чтобы не допустить случайного попадания в выборку ошибочной информации из-за встречающихся в описании событий однокоренных слов, не отвечающих теме запроса.

Как показал анализ результатов, полученных в ходе выполнения поисковых запросов, в общей сложности в БД было зафиксировано 3 426 событий природно-техногенного характера. Наибольшая их доля (около половины)

была обусловлена одновременным воздействием на те или иные объекты техносферы целого комплекса опасных процессов и явлений гидрометеорологического характера (рис. 1). К ним чаще всего относились воздействия сильных порывистых ветров в сочетании с экстремальными атмосферными осад-

ками различных типов. Такая комбинация природных факторов наиболее опасна для воздушных линий электропередачи (ЛЭП). Обрыв проводов ЛЭП, повреждение их опор в результате таких природных воздействий — наиболее часто повторяющийся тип ПТЧС практически во всех регионах России [6, 7].

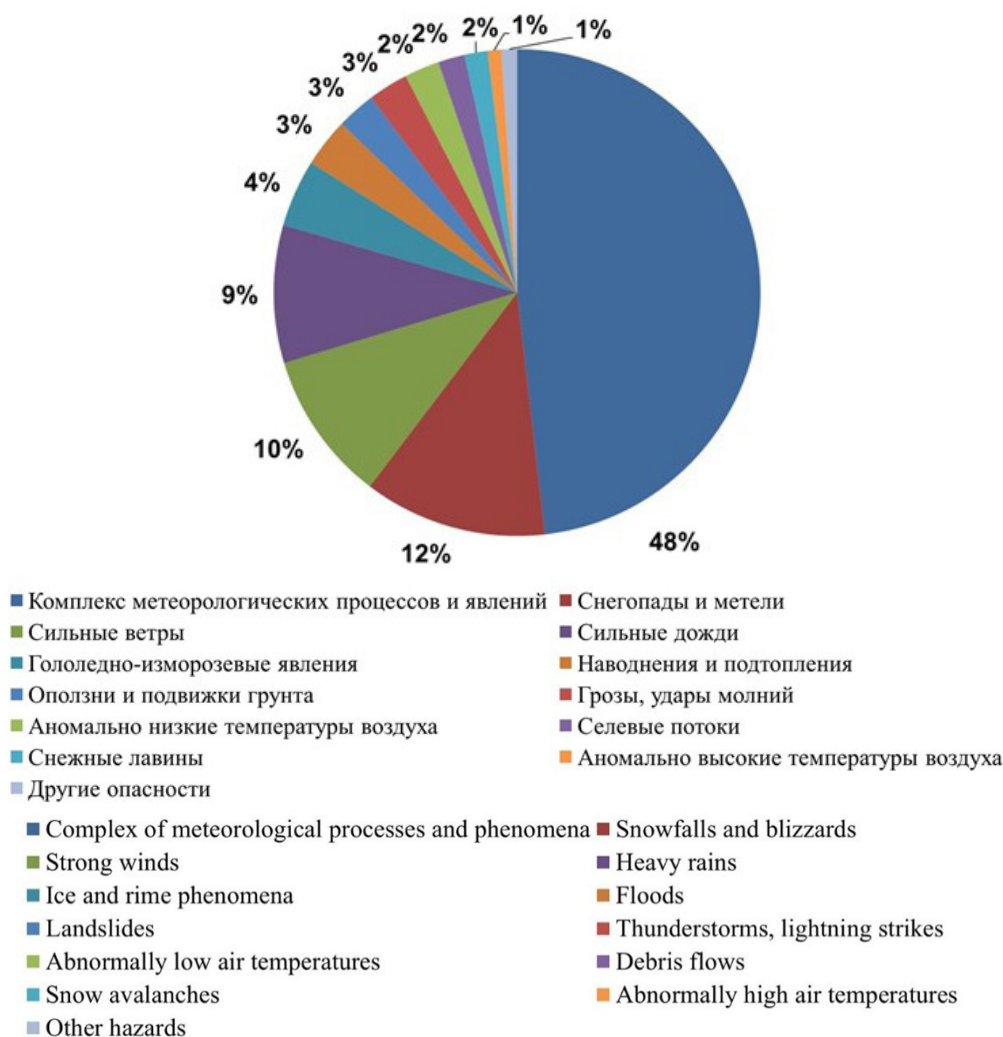


Рис. 1. Соотношение основных природных факторов ЧС в техносфере России за 1991–2024 гг.
 Fig. 1. The ratio of the main natural factors of emergencies in the technosphere of Russia for 1991–2024

Помимо этого, был выявлен дополнительный вклад в возникновение ПТЧС отдельных типов гидрологических и метеорологических процессов и явлений, в том числе:

- 12 % от общего числа ПТЧС было обусловлено сильными снегопадами, метелями, снежными заносами или снеговыми нагрузками;
- 10 % — различными ветровыми явлениями;
- 9 % — сильными дождями, ливнями и градом;
- 4 % — гололедно-изморозевыми явлениями;
- по 3 % — наводнениями/подтоплениями и грозами/ударами молний;

- 2 % — аномально низкими и 1 % — аномально высокими температурами воздуха.

Таким образом, в целом природными факторами гидрометеорологического характера было спровоцировано более 90 % всех зафиксированных в БД природно-техногенных ЧС. Если говорить о природных факторах другого генезиса, то 3 % всех зафиксированных ПТЧС было вызвано такими склоновыми процессами, как оползни, подвижки или просадки грунта, по 2 % — снежными лавинами и селевыми потоками; на долю остальных опасных природных процессов, в число которых входят, например, землетрясения и вулканические извержения, пришлось немногим более 1 % от всех ПТЧС, зарегистрированных в базе данных (см. рис. 1).

Следующий комплекс поисковых запросов был осуществлен для того, чтобы определить, на каких типах техносферных объектов ПТЧС повторяются наиболее часто. Выяснилось, что наиболее уязвимы к природным воздействиям системы электро-, теплоснабжения и связи (главным образом воздушные линии): на этих объектах происходит более половины от общего количества зарегистрированных в базе ПТЧС. Основными природными опасностями для данных типов объектов являются сильный ветер, особенно сопровождающийся выпадением твердых или жидких атмосферных осадков (снега, мокрого снега, дождя, града), а также по отдельности перечисленные типы атмосферных осадков большой интенсивности, образование наледи на проводах, грозовые явления, сход снежных лавин и селевых потоков. Более детально эти вопросы рассматриваются в работе [7]. На втором месте по степени уязвимости оказалась транспортная инфраструктура и объекты

транспорта: более 20 % всех зарегистрированных в БД ПТЧС были отмечены на автомобильном транспорте — к ним относятся ДТП и нарушения автомобильного сообщения из-за действия различных природных факторов. В числе основных природных факторов аварийности и нарушений движения на автомобильных дорогах можно выделить сильные снегопады и метели, приводящие к снежным заносам, гололедные явления, сильные дожди, приводящие к подтоплениям дорог, туманы, а также сход снежных лавин и селевых потоков. Примерно по 2 % от общего числа ПТЧС пришлось на долю транспортных объектов других типов: авиационного, водного, железнодорожного и трубопроводного транспорта.

На рис. 2 показано распределение всех зафиксированных ПТЧС по типам объектов техносферы и типам техносферных аварий, которые были спровоцированы за рассматриваемый период воздействием тех или иных опасных природных процессов и неблагоприятных природных явлений.

Расчет суммарного количества ПТЧС, отмеченных в каждом из субъектов РФ за весь исследуемый период, позволил провести географический анализ распределения природно-техногенных событий по территории России. Все регионы России (субъекты РФ) были проранжированы по этому показателю. Наибольшее количество ПТЧС — число событий больше значения $(\mu + 2\sigma)$ — было отмечено в следующих субъектах РФ (регионы упоминаются в порядке убывания показателя): Сахалинская область, Краснодарский край, Республика Дагестан, Красноярский, Хабаровский и Приморский края, Республика Северная Осетия (Алания), Ставропольский край, Новгородская область и Камчатский край. Перечисленные регионы отличаются

наиболее высоким уровнем природно-техногенного риска. Именно в этих регионах ПТЧС различных типов повторяются наиболее часто. Это обусловлено частотой и интенсивностью проявления воздействия на объекты техносферы различных природных факторов, прежде всего опасных природных процессов гидрологического и метеорологического характера. В группу повышенного уровня риска были выделены регионы, в которых повторяемость ПТЧС колебалась в интервале между величинами от $(\mu + \sigma)$

до $(\mu + 2\sigma)$. В эту группу вошли следующие субъекты РФ (в порядке убывания показателя): Ленинградская, Мурманская, Тверская, Нижегородская, Ростовская, Иркутская области, Алтайский край, Оренбургская и Челябинская области. К группе среднего уровня риска были отнесены регионы, где повторяемость ПТЧС оставалась в промежутке $(\mu \pm \sigma)$. Наконец, в группу низкого уровня риска попали регионы, в которых повторяемость ПТЧС была ниже значения $(\mu - \sigma)$.

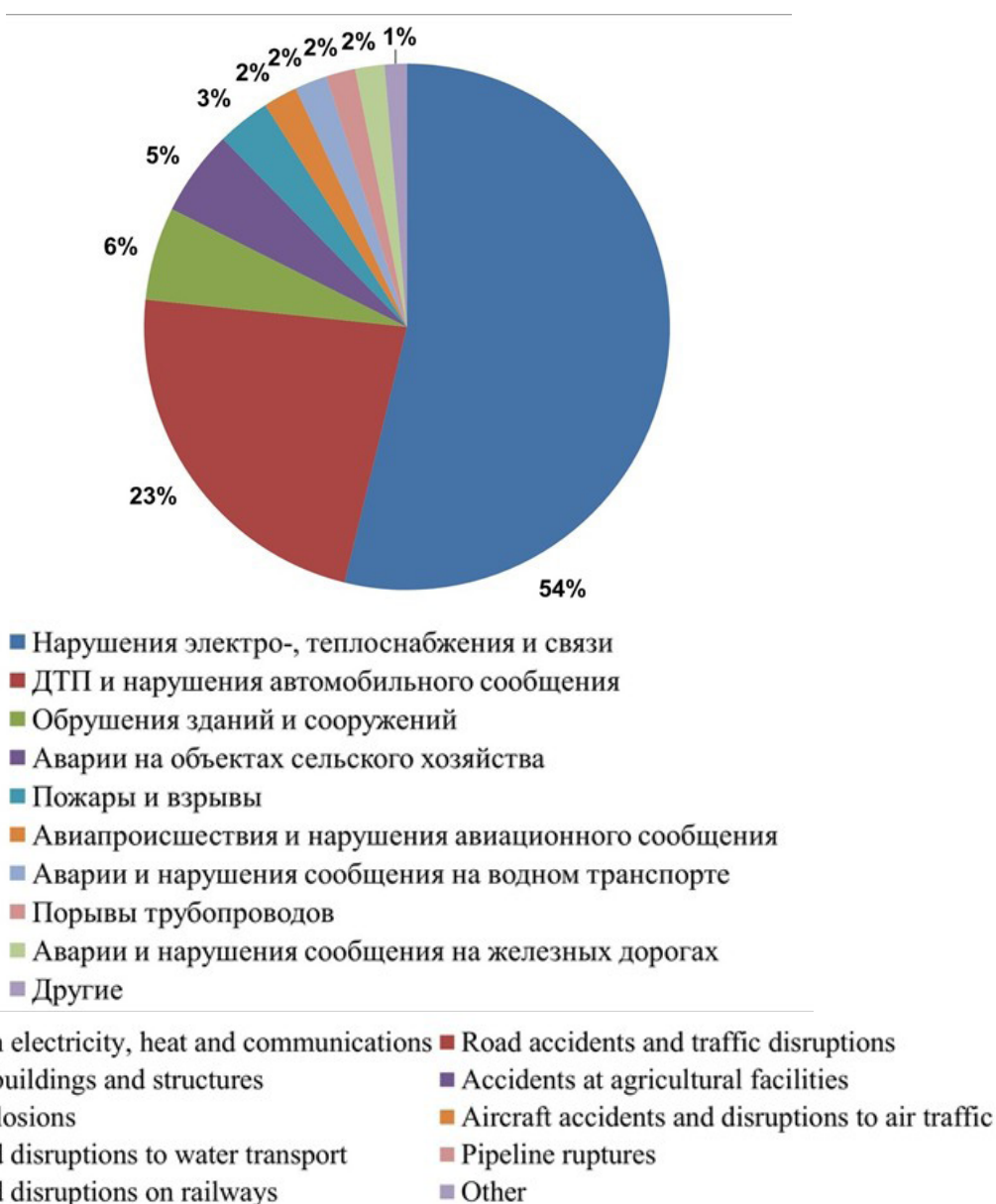


Рис. 2. Соотношение ПТЧС по типам объектов техносферы за 1991–2024 гг.

Fig. 2. Ratio of natural-technological emergencies by types of technosphere facilities for 1991–2024

Выводы

Опасные природные процессы и неблагоприятные природные явления могут выступать в качестве важных факторов техносферной аварийности, наряду с экономическими, техническими и социальными причинами возникновения ЧС. Проявления природных факторов могут приводить к авариям на подверженных их воздействиям объектах техносферы или нарушать штатный режим их функционирования.

Проведенный анализ информации авторской базы данных по ЧС в техносфере показал, что самая большая доля ПТЧС была вызвана комплексным воздействием опасных процессов и явлений гидрометеорологического характера. Среди отдельных типов природных опасностей по уровню воздействия на инфраструктуру и другие технологические системы выделяются сильные снегопады, метели, снежные заносы, снеговые нагрузки, ветровые явления, сильные дожди, ливни и град.

Более половины от общего количества зарегистрированных в базе данных ПТЧС произошло в системах электро-, теплоснабжения и связи. Наиболее уязвимы к природным воздействиям воздушные ЛЭП. Более 20 % от всех ПТЧС составляют автомобильные аварии и нарушения автотранспортного сообщения.

Наиболее часто ПТЧС повторяются в Сахалинской области, Краснодарском крае, Республике Дагестан, Красноярском, Хабаровском и Приморском краях, Республике Северная Осетия (Алания), Ставропольском крае, Новгородской области и Камчатском крае.

Из-за наблюдающихся климатических изменений на территории России прогнозируется увеличение интенсивности и повторяемости опасных природных процессов гидрометеорологического характера [8–10]. Это повышает актуальность исследования опасных природных воздействий на техносферу и проблем анализа и оценки природно-техногенного риска.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мягков С. М. География природного риска. М., 1995. 224 с.
2. Оценка природно-техногенного риска на основе динамических моделей / В. А. Минаев [и др.] // Технологии техносферной безопасности. 2020. Вып. 2 (88). С. 8–21. URL: <https://elibrary.ru/hgchdl> (дата обращения: 12.09.2025).
3. Ноженкова Л. Ф., Ничепорчук В. В. Технологии комплексной поддержки управления природно-техногенной безопасностью // Вычислительные технологии. 2023. № 28 (4). С. 109–121. URL: <https://elibrary.ru/iriynk> (дата обращения: 12.09.2025).
4. Петрова Е. Г. Особенности мониторинга опасных природных воздействий с использованием базы данных // Экологические системы и приборы. 2021. № 7. С. 11–16. URL: <https://elibrary.ru/mdbdjs> (дата обращения: 22.10.2025).

5. Петрова Е. Г. Опасные природные воздействия на транспорт: опыт анализа базы данных // Экологические системы и приборы. 2019. № 1. С. 8–11. URL: <https://elibrary.ru/vqwxie> (дата обращения: 22.10.2025).
6. Зотов Е. И. Проблемы и возможные направления их решения в области защиты населения при чрезвычайных ситуациях, вызванных авариями на объектах электроэнергетики // Техносферная безопасность. 2024. № 4 (45). С. 106–114. URL: <https://elibrary.ru/iiebuk> (дата обращения: 15.10.2025).
7. Петрова Е. Г. Исследование опасных метеорологических воздействий на воздушные линии электропередачи в России // Геориск. 2021. Т. 15, № 2. С. 26–36. URL: <https://elibrary.ru/smiiei> (дата обращения: 15.10.2025).
8. Природно-антропогенные процессы и экологический риск. Т. 4 / отв. ред. С. А. Добролюбов, Н. С. Касимов, С. М. Малхазова // География, общество, окружающая среда : колл. монография / Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. М., 2004. 616 с.
9. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века : монография / А. В. Кислов [и др.]. М., 2008. 292 с.
10. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова. СПб., 2017. 106 с.

REFERENCES

1. Myagkov S. M. Geography of natural risk. Moscow, 1995. 224 p.
2. Natural and technogenic risks assessment based on dynamic model / V. A. Minaev et al. // Technology of technosphere safety. 2020. No. 2 (88). Pp. 8–21. URL: <https://elibrary.ru/hgchdl> (accessed 12.09.2025).
3. Nozhenkova L. F., Nicheporchuk V. V. Technologies for integrated support of natural and man-made safety management // Computational technologies. 2023. No. 8 (4). Pp. 109–121. URL: <https://elibrary.ru/iriynk> (accessed 12.09.2025).
4. Petrova E. G. Features of monitoring hazardous natural impacts using database // Ecological Systems and Devices. 2021. No. 7. Pp. 11–16. URL: <https://elibrary.ru/vqwxie> (accessed 22.10.2025).
5. Petrova E. G. Natural hazard impacts on transportation: experience of the database analysis // Ecological Systems and Devices. 2019. No. 1. Pp. 8–11. URL: <https://elibrary.ru/vqwxie> (accessed 22.10.2025).
6. Zotov E. I. Problems and possible solutions in the field of public protection in emergency situations caused by accidents at electric power facilities // Technospheric safety. 2024. No. 4 (45). Pp. 106–114. URL: <https://elibrary.ru/iiebuk> (accessed 15.10.2025).
7. Petrova E. G. Study of hazardous meteorological impacts on overhead power lines in Russia // Georisk. 2021. Vol. 15, No. 2. Pp. 26–36. URL: <https://elibrary.ru/smiiei> (accessed 15.10.2025).
8. Natural-anthropogenic processes and environmental risk. Vol. 4 / ed. by S. A. Dobrolubov, N. S. Kasimov, S. M. Malkhazova // Geography, society, environment : collective monograph / Lomonosov Moscow State University. Moscow, 2004. 616 p.

9. Forecast of climatic resource availability of the East European Plain under warming conditions of the 21st century : monograph / A. V. Kislov et al. Moscow, 2008. 292 p.

10. Report on climate risks in the Russian Federation / ed. by V. M. Katzov. St. Petersburg, 2017. 106 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Петрова Елена Геннадиевна, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории снежных лавин и селей Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (119991, Российская Федерация, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1); РИНЦ ID: 74575; Scopus AuthorID: 7103034855; ResearcherID: A-8341-2011; ORCID: 0000-0003-0620-2060; e-mail: epgeo@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Elena G. Petrova, Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher of Research Laboratory of Snow Avalanches and Debris flows of the faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (1 Leninskie Gory St., Moscow, GSP-1, 119991, Russian Federation); ID RISC: 74575; Scopus AuthorID: 7103034855; ResearcherID: A-8341-2011; ORCID: 0000-0003-0620-2060; e-mail: epgeo@mail.ru

УДК 504.06:330.13

АПРОБАЦИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ СТРАТЕГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ И МОНИТОРИНГА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

Гарелина Светлана Александровна

Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена апробации многопараметрической модели, предназначенной для оптимизации стратегий переработки отходов и организации мониторинга на промышленных объектах. Модель объединяет показатели остаточного ущерба, затраты на переработку отходов и мониторинг полигонов, а также возможную прибыль от утилизации в единую целевую функцию совокупных потерь. Ее применение направлено на формализацию выбора управленческих решений в условиях ограниченного бюджета. В качестве примеров рассмотрены твердые коммунальные отходы и органическая составляющая отходов металлургических предприятий, для которых исходные параметры заданы по литературным источникам и экспертным данным. Проведенные расчеты позволили определить оптимальную долю переработки отходов для различных технологий, а также оценить влияние объема выделяемого бюджета на распределение ресурсов между переработкой и мониторингом. Модель продемонстрировала способность количественно оценивать совокупные потери, остаточный ущерб и эффективность альтернативных стратегий управления. Результаты показывают, что интеграция переработки и мониторинга в рамках риск-ориентированного подхода позволяет минимизировать общий ущерб и повысить устойчивость производственных систем. Практическая значимость работы заключается в возможности использования модели при технико-экономическом обосновании решений и разработке программ управления техногенной безопасностью промышленных предприятий.

Ключевые слова: стратегия обращения с отходами, промышленный объект, переработка отходов, мониторинг производственного процесса, стратегия переработки и контроля отходов, многопараметрическая модель управления отходами

Для цитирования: Гарелина С. А. Апробация многопараметрической модели оптимизации стратегии переработки отходов и мониторинга на промышленных объектах // Техносферная безопасность. 2026. № 1 (50). С. 83–99.

APPROBATION OF A MULTIPARAMETRIC MODEL FOR OPTIMIZING WASTE RECYCLING AND MONITORING STRATEGIES AT INDUSTRIAL FACILITIES

Svetlana A. Garelina

Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

Abstract. The article presents the approbation of a multiparametric model designed to optimize waste recycling strategies and organize monitoring at industrial facilities. The model integrates indicators of residual damage, the costs of waste recycling and landfill monitoring, as well as potential profits from utilization into a single objective function of total losses. Its application is aimed at formalizing the selection of management strategies under conditions of limited budgets. Case studies include municipal solid waste and the organic fraction of metallurgical waste, with initial parameters determined from literature sources and expert assessments. The calculations made it possible to determine the optimal share of waste recycling for different technologies and to evaluate the influence of the available budget on the allocation of resources between recycling and monitoring. The model demonstrated the ability to quantitatively assess total losses, residual damage, and the efficiency of alternative management strategies. The results show that integrating recycling and monitoring within a risk-oriented approach makes it possible to minimize overall losses and increase the resilience of industrial systems. The practical significance of the study lies in the model's applicability for techno-economic justification of decisions and for developing industrial safety management programs.

Keywords: waste treatment strategy, industrial facility, waste treatment, process monitoring, waste treatment and control strategies, multiparametric waste management model

For citation: Garelina S. A. Approbation of a multiparametric model for optimizing waste recycling and monitoring strategies at industrial facilities // *Technospheric safety*. 2026. No. 1 (50). Pp. 83–99.

Введение

Обращение с отходами остается одной из основных проблем экологической и промышленной безопасности Российской Федерации. Масштабы их образования на протяжении последнего десятилетия демонстрируют устойчивую тенденцию к росту, что подтверждается результатами многочисленных исследований российских авторов (например, [1, 2]). Увеличение объемов отходов и их накопление при ограниченных возможностях переработки и мониторинга делают данное направление одним из наиболее актуальных в современной научной и практической повестке экологической безопасности. Особую актуальность приобретает проблема накопленного вреда и длитель-

ного воздействия на окружающую среду от объектов хранения и размещения отходов [3]. Многие такие объекты характеризуются износом инженерных конструкций, нарушением регламентов эксплуатации, отсутствием постоянного мониторинга и т. п., что повышает вероятность аварийных ситуаций и вторичных загрязнений.

Согласно аналитическим обзорам, реализация государственных программ и федеральных проектов в области обращения с отходами пока не обеспечивает требуемой результативности [1]. Рост объемов накопленных отходов свидетельствует о сохраняющемся дисбалансе между их образованием, переработкой и утилизацией, а также о недостаточной эффективности системы экологического мониторинга, что, по данным открытых

источников и сообщений СМИ, уже привело к ЧС техногенного характера.

В работах российских исследователей подчеркивается необходимость комплексного подхода, сочетающего экономические, технологические и экологические аспекты обращения с отходами (например, [1, 2]). Тем не менее большинство существующих моделей ориентировано преимущественно на оптимизацию затрат или оценку эффективности технологий переработки, не учитывая их взаимосвязь с системой управления производственными рисками, которая напрямую влияет на вероятность аварий и величину остаточного ущерба. В результате отсутствует инструмент, позволяющий сбалансировать затраты на переработку и мониторинг как основные меры по предупреждению ЧС в рамках общего бюджета предприятия.

В работе [4] была предложена многопараметрическая модель оптимизации стратегии переработки отходов и мониторинга на промышленных объектах, объединяющая эти направления в единую систему риск-ориентированного управления. Цель настоящей работы — апробация модели на примерах предприятий различного профиля и оценка эффективности стратегий

переработки и мониторинга при ограниченных ресурсах.

Научная значимость работы заключается в том, что она демонстрирует возможности перехода от теоретической постановки к практическому применению модели в условиях ограниченных ресурсов. Практическая ценность заключается в том, что полученные результаты могут использоваться при технико-экономическом обосновании стратегий обращения с отходами, а также при разработке программ управления техногенной безопасностью промышленных объектов.

Основное внимание в данной статье уделено не обоснованию исходных параметров, а демонстрации возможностей практического применения разработанной модели для оценки и сопоставления стратегий переработки отходов и организации мониторинга. Такой ракурс позволяет рассматривать модель не только как теоретическую конструкцию, но и как прикладной инструмент поддержки управленческих решений.

Основная часть

Целевая функция совокупных потерь Z имеет вид

$$Z(x, M_{\text{техн}}, M_{\text{отх}}) = B_{\text{техн}}(M_{\text{техн}}) + B_{\text{отх}}(x, M_{\text{отх}}) + B_{\text{переработка}} + B_{\text{мониторинг}} - P(x), \tag{1}$$

где:

$x \in [0; 1]$ — доля переработанных отходов;

$M_{\text{техн}}, M_{\text{отх}} \in [0; 1]$ — уровень охвата мониторингом соответственно технологического процесса и полигонов;

$B_{\text{техн}}$ — ущерб в технологических процессах, снижающийся с ростом $M_{\text{техн}}$;

$B_{\text{отх}}$ — ущерб на полигонах отходов, снижающийся с ростом $M_{\text{отх}}$ и x ;

$B_{\text{переработка}}$ — затраты на переработку отходов;

$B_{\text{мониторинг}}$ — затраты на мониторинг;

$P(x) = P_{\text{max}} x$ — прибыль от переработки отходов; P_{max} — максимально возможная суммарная прибыль при 100%-й переработке.

$B_{\text{техн}}$ моделируется как линейно убывающая функция от уровня охвата мониторингом

$$V_{\text{техн}}(M_{\text{техн}}) = V_{\text{мактехн}}(1 - \alpha_{\text{техн}}M_{\text{техн}}), \tag{2}$$

а $V_{\text{отх}}$ — мультипликативной зависимостью.

$$V_{\text{отх}}(x, M_{\text{отх}}) = V_{\text{макотх}}(1 - x)(1 - \alpha_{\text{отх}}M_{\text{отх}}), \tag{3}$$

где:

$\alpha_{\text{техн}}, \alpha_{\text{отх}} \in [0; 1]$ — коэффициент эффективности мониторинга, отражающий долю потенциального ущерба, который можно устранить при полном охвате мониторингом;

$V_{\text{мактехн}}, V_{\text{макотх}}$ — максимально возможный ущерб при аварийном развитии событий.

Затраты $V_{\text{мониторинг}}$ от уровня охвата и эффективности систем мониторинга равны

$$V_{\text{мониторинг}} = r(V_{\text{мактехн}}\alpha_{\text{техн}}M_{\text{техн}} + V_{\text{макотх}}\alpha_{\text{отх}}M_{\text{отх}}), \tag{4}$$

где r — нормативный коэффициент.

Затраты $V_{\text{переработка}}$ выражаются в виде аппроксимированной экспоненциальной функции

$$V_{\text{переработка}}(x) = V_{\text{п}}[(\exp(kx) - 1)/(\exp(k) - 1)], \tag{5}$$

где:

$V_{\text{п}}$ — общая (интегральная) стоимость полной переработки всего объема отходов (при $x = 1$);

k — параметр насыщения.

Для объектов без технологического процесса модель упрощается

$$Z(x) = V_{\text{отх}}(x) + V_{\text{переработка}}(x) + V_{\text{мониторинг}}(M_{\text{отх}}) - P(x). \tag{6}$$

$$V_{\text{отх}}(x) = V_{\text{max}} - (V_{\text{max}} - V_{\text{min}})x, \tag{7}$$

где:

$V_{\text{мониторинг}}$ фиксирована, т. е. включается как отдельная постоянная статья затрат;

$V_{\text{max}}, V_{\text{min}}$ — максимальный (при отсутствии утилизации) и минимальный (при полной переработке) ущерб.

Оценка эффективности различных стратегий переработки твердых коммунальных отходов (ТКО)

В рамках моделирования рассматриваются два наиболее применимых подхода к переработке ТКО: термическая обработка (сжигание) и плазмохимическая переработка. Эти технологии широко обсуждаются в контексте снижения объемов захоронения и извлечения энергии из отходов. Термическая обработка характеризуется высокой степенью утилизации, но сопровождается выбросами

и требует дорогостоящих систем очистки. Плазмохимическая переработка обеспечивает более полное разрушение органических компонентов и меньший объем остатков, однако отличается высокой энергоемкостью и капитальными затратами. Для построения многопараметрической модели оптимизации стратегии обращения с ТКО использованы допущения, представленные в табл. 1. Все значения приведены в сопоставимых масштабах в расчете на один типовой объект по обращению с отходами мощностью 50–100 тыс. т/год.

Таблица 1
Допущения для двух стратегий переработки ТКО в рамках
многопараметрической модели

Table 1
Assumptions for two municipal solid waste (MSW) recycling strategies within
the multiparametric model

Показатель Parameter	Принятое значение Assumed value	Обоснование Justification
B_{\max}	1 млрд руб. billion RUB	Средняя величина ущерба при авариях на объектах размещения ТКО, по экспертным оценкам и анализу открытых источников, может составлять порядка 0,8–1,2 млрд руб. Диапазон определен на основе сопоставления с расчетами, приведенными в публичных отчетах и сообщениях о последствиях крупных аварийных ситуаций (в частности, на полигонах «Кучино» и «Ядрово»), и экстраполяции на объекты меньшего масштаба. При этом следует учитывать дополнительные, часто неучтенные расходы, связанные с дегазацией, рекультивацией и компенсационными мерами, которые могут существенно увеличивать общий экономический ущерб The average damage caused by accidents at municipal solid waste disposal facilities, according to expert estimates and analysis of open sources, is approximately 0.8–1.2 billion rubles. This range is determined based on a comparison with calculations presented in publicly available reports and media accounts of major waste management incidents (in particular, at the Kuchino and Yadrovo landfills) and by extrapolation to smaller-scale facilities. It should also be noted that there are additional, often unaccounted-for costs associated with degassing, reclamation, and compensation measures, which may significantly increase the total economic loss
B_{\min}	0,2 млрд руб. billion RUB	Остаточный ущерб в расчетах принят на уровне 20% от максимального возможного ущерба The residual damage in the calculations is assumed at the level of 20% of the maximum possible damage
Затраты на термическую переработку $B_{\text{переработка}}$ Expenditures for thermal waste treatment	0,5 млрд руб. billion RUB	При расчете стоимости переработки использованы усредненные значения, полученные на основе анализа данных, опубликованных перерабатывающими предприятиями и отраслевыми источниками. Согласно открытым сведениям, типичный диапазон затрат на переработку отходов составляет порядка 3–8 тыс. руб./т. Для объекта с годовым объемом 50–100 тыс. т ориентировочная стоимость переработки может быть оценена как $V_{\text{переработка}} = 60\,000\ \text{т} \cdot 6\,000\ \text{руб./т} = 360\ \text{млн руб.}$ In estimating the cost of waste processing, averaged values were used based on data published by processing companies and open industry sources. According to publicly available information, the typical cost range for waste processing is about 3–8 thousand RUB per ton. For a facility with an annual capacity of 50–100 thousand tons, the approximate processing cost can be expressed as $V_{\text{переработка}} = 60\,000\ \text{t} \times 6\,000\ \text{RUB/t} = 360\ \text{million RUB}$
Затраты на плазмохимическую переработку $B_{\text{переработка}}$ Expenditures for plasma-chemical waste treatment	0,75–0,8 млрд руб. billion RUB	Для плазмохимических технологий утилизации характерна существенно более высокая капиталоемкость по сравнению с традиционными термическими методами, что обусловлено сложностью оборудования и повышенными требованиями к энергообеспечению. В структуре себестоимости таких установок значительную долю занимают затраты на реакторы, источники питания, системы охлаждения и защиты, а также техническое обслуживание высокотемпературных узлов. В расчетах принято, что совокупная стоимость переработки при использовании плазмохимических технологий превышает аналогичные показатели для термических методов примерно в 1,5–2 раза

Окончание таблицы 1

Показатель Parameter	Принятое значение Assumed value	Обоснование Justification
Затраты на плазмохимическую переработку $V_{\text{переработка}}$ Expenditures for plasma-chemical waste treatment	0,75–0,8 млрд руб. billion RUB	Plasma-chemical waste treatment technologies are characterized by significantly higher capital intensity compared to conventional thermal methods, which is due to the complexity of the equipment and increased energy requirements. In the cost structure of such facilities, a considerable share is accounted for by expenditures on reactors, power supply systems, cooling and protection units, as well as maintenance of high-temperature components. In the calculations, it is assumed that the total cost of processing using plasma-chemical technologies exceeds the corresponding indicators for thermal methods by approximately 1.5–2 times
P	1. $P(x) = 0,2x$ млрд руб. 2. $P(x) = 0,3x$ млрд руб. billion RUB	Согласно литературным данным [5–7], при плазмохимической переработке ТКО возможен выход водорода в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен граммов на килограмм сырья, что для объекта мощностью около 50–100 тыс. т/год соответствует получению нескольких тонн водорода. Одновременно переработка сопровождается генерацией тепловой и электрической энергии, что позволяет учитывать энергетическую рекуперацию в расчетах совокупного эффекта. При учете средней рыночной стоимости водорода и частичного использования выделяющегося тепла (20–40 % от энергетического потенциала установки) совокупная компенсация эксплуатационных затрат может составлять порядка 0,1–0,25 млрд руб., что частично снижает интегральные издержки переработки According to literature data [5–7], plasma-chemical processing of municipal solid waste can yield hydrogen in the range of several tens to several hundred grams per kilogram of feedstock, which for a facility with an annual capacity of about 50–100 thousand tons corresponds to the production of several tons of hydrogen. At the same time, the process is accompanied by the generation of thermal and electrical energy, allowing for the inclusion of energy recovery in the overall efficiency assessment. Considering the average market price of hydrogen and partial utilization of the released heat (20–40 % of the plant's energy potential), the total compensation of operating costs may reach approximately 0.1–0.25 billion RUB, partially offsetting the integral processing expenses
$V_{\text{мониторинг}}$	0,1 млрд руб. billion RUB	В расчетах принята доля постоянных затрат на мониторинг в размере 10 %, что соответствует нижней границе интервала 10–25 % [4] In the calculations, the share of fixed monitoring costs is assumed to be 10 %, which corresponds to the lower boundary of the interval of 10–25 % [4]

Для термической технологии принят $k = 2$, так как ее эффективность снижается при высоких уровнях переработки: возрастает сложность доочистки, увеличиваются выбросы и энергозатраты, особенно при работе с остатками. Для плазмохимической технологии установлен $k = 1,8$, поскольку она более управляемая, обеспечивает глубокую

переработку и требует меньших затрат на завершающих этапах. Таким образом, более низкий k отражает экономическую и технологическую гибкость плазмохимии по сравнению с термической переработкой.

Расчет выполнен для долей переработки от 0 до 100 % для термической и плазмохимической переработки (табл. 2, рис. 1).

Таблица 2
Результаты расчета совокупных потерь при термической и плазмохимической переработке отходов на полигонах ТКО

Table 2
 Results of calculating total losses for thermal and plasma-chemical waste treatment at MSW landfills

Доля переработки отходов, x Share of waste recycling x , (%)	Термическая переработка Thermal treatment	Плазмохимическая переработка Plasma-chemical treatment	
		$P(x) = 0,2x$	$P(x) = 0,3x$
	Z, млрд руб. Z, billion RUB		
0	1,10	1,10	1,10
0,1	1,04	1,03	1,02
0,2	0,98	0,96	0,95
0,3	0,92	0,91	0,88
0,4	0,88	0,86	0,83
0,5	0,83	0,82	0,78
0,6	0,80	0,79	0,75
0,7	0,78	0,78	0,73
0,8	0,77	0,77	0,73
0,9	0,78	0,80	0,75
1,0	0,80	0,85	0,80

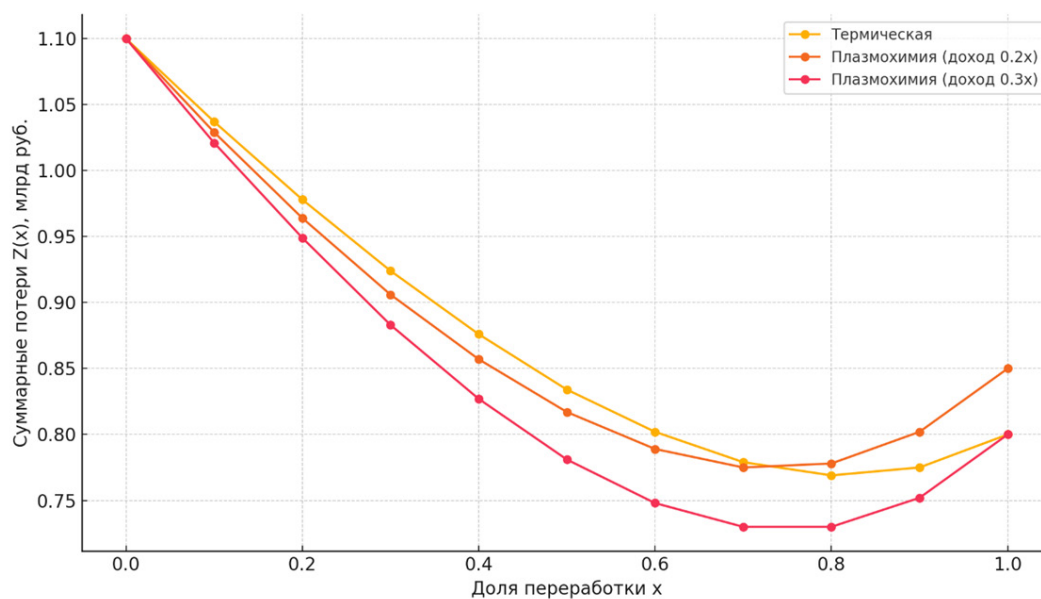


Рис. 1. Зависимость совокупных потерь от доли переработки отходов для двух стратегий (термической и плазмохимической)

Fig. 1. Dependence of total losses on the share of waste treatment for two strategies (thermal and plasma-chemical)

Из данных рис. 1 видно, что термическая переработка демонстрирует монотонное снижение совокупных потерь $Z(x)$ при увеличении доли утилизации примерно до 80 %, где достигается минимум затрат. Лишь при дальнейшем росте переработки начинается незначительное увеличение затрат без существенного снижения остаточного ущерба, что указывает на точку насыщения экономической целесообразности. Следовательно, переработка до 80 % является оптимальной для термической технологии. Плазмохимическая технология с доходом $0,2x$ оказывается экономически эффективнее термической при переработке в диапазоне до 70 % включительно, но уступает термической при переработке свыше 80 % из-за опережающего роста затрат. То есть, несмотря на доход, эффект компенсируется экспоненциальным удорожанием технологии. Плазмохимия с доходом $0,3x$ демонстрирует наименьшие совокупные потери при переработке свыше 70 %, уверенно опережая обе альтернативные стратегии. Минимум затрат по интегральной модели достигается при переработке примерно до 70 %, что указывает на оптимальную зону, где достигается баланс между снижением ущерба и возвратом части затрат через продукцию.

Таким образом, оптимальной зоной переработки является диапазон до 70 %, где достигается баланс между снижением ущерба и возвратом затрат; при этом наибольшая эффективность достигается при использовании плазмохимии с доходом $0,3x$.

Оптимизация стратегии переработки органической составляющей отходов металлургического предприятия

Металлургическое производство относится к числу наиболее ресурсозатратных

и экологически напряженных отраслей промышленности, характеризующихся значительным объемом образования отходов различной природы [8, 9]. Опасность данных отходов обусловлена не только их объемом, но и токсикологическими свойствами. Токсичность и химическая активность металлургических шлаков и шламов обуславливает необходимость их инженерного контроля на всех стадиях обращения. В связи с этим комплексный мониторинг отходов и их переработки представляет собой основной элемент в обеспечении экологической безопасности металлургических предприятий. К органическим отходам металлургического производства относятся, прежде всего, нефтесодержащие и масляные отходы, образующиеся при смазке и охлаждении оборудования, а также шламы сточных вод и осадки очистных сооружений, содержащие растворенные органические вещества и продукты биологического разложения и др.

Учитывая эти угрозы, для минимизации ущерба и предупреждения ЧС необходимо внедрение средств мониторинга и контроля, охватывающих всю цепочку обращения с отходами.

В табл. 3 приведены допущения для многопараметрической модели металлургических предприятий, после чего представлены результаты соответствующих расчетов (табл. 4, рис. 2). Следует отметить, что в данном разделе рассматривается только органическая составляющая отходов, поскольку в расчетах учитывается плазмохимический метод их переработки. Для обеспечения сопоставимости и определенности результатов в расчетах приняты фиксированные значения параметров: $k = 2$ и $r = 0,3$.

Таблица 3
Допущения для многопараметрической модели оптимизации стратегии обращения с отходами металлургических предприятий

Table 3
 Assumptions for the multiparametric model of optimizing the waste management strategy at metallurgical enterprises

Показатель Parameter	Принятое значение Assumed value	Обоснование Justification
$B_{\text{мактехн}}$	0,5 млрд руб. billion RUB	<p>Значение 0,5 млрд руб. принято исходя из обобщенного анализа масштабов и характера аварий на металлургических предприятиях. Для подобных объектов инциденты, как правило, локальны и контролируемы благодаря высоким стандартам промышленной безопасности и постоянному мониторингу, что обуславливает меньший уровень ущерба по сравнению с полигонами ТКО, где последствия имеют более масштабный и длительный характер</p> <p>The value of 0.5 billion RUB was adopted based on a generalized analysis of the scale and nature of accidents at metallurgical enterprises. In such facilities, incidents are typically local and controlled due to high standards of industrial safety and continuous monitoring, which results in a lower level of damage compared to municipal solid waste landfills, where the consequences are generally larger in scale and longer in duration</p>
$B_{\text{макотх}}$	0,5 млрд руб. billion RUB	<p>Полигоны отходов создают долговременные риски, при этом доля ущерба от технологических ЧС часто значительно выше, особенно на крупных металлургических комбинатах, где масштаб и интенсивность процессов приводят к серьезным авариям и значительным экономическим потерям. В модели максимальный ущерб при авариях на полигонах отходов принят равным 0,5 млрд рублей — так же, как и ущерб в технологическом процессе. Это упрощение сделано для определенности расчетов, учитывая, что реальный ущерб от аварий на полигонах может быть ниже, чем на ТКО, ввиду более высокого уровня контроля и локализованного характера инцидентов</p> <p>Waste disposal sites create long-term risks, while the share of damage from technological accidents is often significantly higher, especially at large metallurgical plants, where the scale and intensity of processes lead to serious accidents and substantial economic losses. In the model, the maximum damage from accidents at waste disposal sites is assumed to be 0.5 billion rubles — the same as for technological processes. This simplification was made for the sake of calculation clarity, taking into account that the actual damage from accidents at disposal sites may be lower than at MSW landfills due to a higher level of control and the localized nature of incidents</p>
$\alpha_{\text{техн}}$	0,5	<p>Значения параметров эффективности и охвата мониторингом заданы как калибруемые допущения, основанные на практике предприятий и инженерной оценке уровня управляемости рисков. Принятые параметры для технологического процесса отражают высокий потенциал предотвращения инцидентов при преимущественно непрерывном контроле критически важных узлов</p> <p>The values of monitoring efficiency and coverage parameters are defined as calibrated assumptions based on industrial practice and engineering assessment of the level of risk controllability. The adopted parameters for the technological process reflect a high potential for incident prevention under predominantly continuous control of critical units</p>
$M_{\text{техн}}$	0,7	

Окончание таблицы 3

Показатель Parameter	Принятое значение Assumed value	Обоснование Justification
$\alpha_{\text{техн}}$	0,3	Для полигона отходов принятые параметры отражают ограниченный уровень управляемости и фрагментарный характер контроля, при котором мониторинг охватывает лишь часть площади и технологических узлов, что снижает потенциал предотвращения инцидентов по сравнению с технологическим процессом For the waste landfill, the adopted parameters reflect a limited level of controllability and a fragmented nature of monitoring, where only part of the area and technological units are covered, resulting in a lower potential for incident prevention compared with the technological contour
$M_{\text{техн}}$	0,4	
$B_{\text{переработка}}$	0,6 млрд руб. billion RUB	Стоимость переработки органических отходов плазмохимическими методами оценивается в диапазоне 6 000–12 000 руб./т, что соответствует усредненным значениям, приведенным в открытых отраслевых источниках. Для типового перерабатывающего комбината с объемом до 100 000 т/год (органическая фракция отходов) совокупные затраты с учетом сложности технологического процесса, логистики, рекультивации и налоговых отчислений могут быть оценены как $B_{\text{переработка}} = 100\,000\ \text{т} \cdot 6\,000\ \text{руб./т} = 0,6\ \text{млрд руб.}$ The cost of processing organic waste using plasma-chemical methods is estimated to range from 6,000 to 12,000 RUB per ton, which corresponds to average values reported in open industry sources. For a typical processing plant with an annual capacity of up to 100,000 tons (organic waste fraction), the total expenditure — taking into account process complexity, logistics, land reclamation, and tax payments — can be estimated as $B_{\text{переработка}} = 100,000\ \text{t} \times 6,000\ \text{RUB/t} = 0.6\ \text{billion RUB}$

Умеренное снижение ущерба от технологического процесса достигается за счет эффективного мониторинга, что подчеркивает важность поддержания стабильных систем контроля в базовой производственной цепочке. Оптимальная доля переработки отходов находится в диапазоне 0,3–0,4, обеспечивая баланс между снижением ущерба и затратами, что является ключевым показателем для разработки эффективных стратегий обращения с отходами. Модель

подтверждает эффективность риск-ориентированного подхода, демонстрируя возможность почти двукратного снижения совокупных потерь при управлении переработкой и мониторингом по сравнению с отсутствием вмешательства. Полная переработка отходов снижает ущерб до минимальных значений, но приводит к росту суммарных потерь из-за высоких затрат, что подчеркивает необходимость поиска компромиссных решений и оптимизации процессов.

Таблица 4
Оценка ущерба, затрат на переработку и мониторинг при изменении доли переработки отходов

Table 4
Assessment of damage, recycling costs, and monitoring under varying shares of waste processings

x	$B_{\text{техн}}$, млрд руб. billion RUB	$B_{\text{отх}}$, млрд руб. billion RUB	$B_{\text{переработка}}$, млрд руб. billion RUB	$B_{\text{мониторинг}}$, млрд руб. billion RUB	Z , млрд руб. billion RUB
0	0,33	0,44	0,00	0,07	0,84
0,1	0,33	0,40	0,01	0,07	0,80
0,2	0,33	0,35	0,02	0,07	0,77

Окончание таблицы 4

x	$V_{\text{техн}}$, млрд руб. billion RUB	$V_{\text{отх}}$, млрд руб. billion RUB	$V_{\text{переработка}}$, млрд руб. billion RUB	$V_{\text{мониторинг}}$, млрд руб. billion RUB	Z , млрд руб. billion RUB
0,3	0,33	0,31	0,05	0,07	0,76
0,4	0,33	0,26	0,10	0,07	0,76
0,5	0,33	0,22	0,15	0,07	0,77
0,6	0,33	0,18	0,22	0,07	0,79
0,7	0,33	0,13	0,29	0,07	0,82
0,8	0,33	0,09	0,38	0,07	0,87
0,9	0,33	0,04	0,49	0,07	0,93
1,0	0,33	0,00	0,60	0,07	1,00

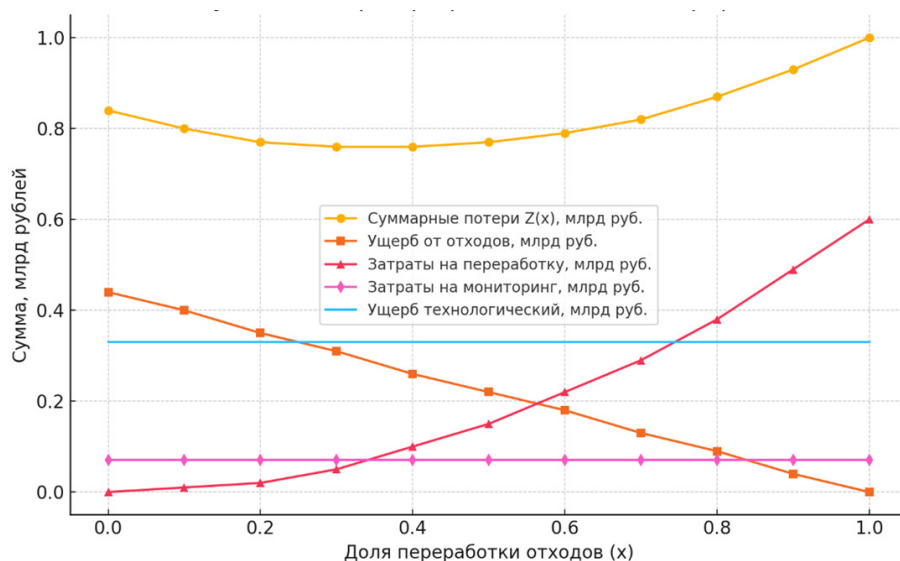


Рис. 2. Зависимость ущерба и затрат на переработку и мониторинг от доли переработки отходов
 Fig. 2. Dependence of damage, recycling costs, and monitoring costs on the share of waste processed

Для оценки эффективности различных стратегий обращения с отходами на металлургических предприятиях была проведена сравнительная оценка совокупных потерь с учетом уровня переработки отходов, а также степени охвата мониторингом технологических процессов и полигонов. В табл. 5 и на рис. 3 представлены показатели по ущербу, затратам на переработку и мониторинг для шести стратегий обращения с отходами металлургических предприятий. Анализ результатов позволяет выявить оптимальные параметры управления, минимизирующие совокупные потери и риски.

Максимальное снижение ущерба, связанного с технологическим процессом,

достигается при полном уровне мониторинга ($M_{\text{техн}} = 1$), что подчеркивает критическую роль интеллектуальных систем контроля для обеспечения устойчивости производственного цикла. Переработка отходов на уровне 50 % ($x = 0,5$) существенно снижает экологический ущерб, особенно в сочетании с эффективным мониторингом полигонов, что свидетельствует о синергетическом эффекте интегрированного управления отходами и мониторинга. Стратегия полной переработки ($x = 1$) сопровождается резким увеличением затрат, что ограничивает ее практическую применимость в условиях дефицита финансовых ресурсов и подчеркивает необходимость экономического анализа

при выборе оптимальных параметров обращения с отходами. Минимум совокупных потерь наблюдается при частичной переработке с высокой степенью мониторинга тех-

нологической цепочки ($x = 0,5$, $M_{\text{техн}} = 1$), что подтверждает важность сбалансированного подхода между экологическими и экономическими факторами.

Таблица 5
Показатели по ущербу, затратам на переработку и мониторинг для шести стратегий обращения с отходами металлургических предприятий

Table 5
Indicators of damage, recycling costs, and monitoring for six waste management strategies at metallurgical enterprises

Стратегия Strategy	x	$M_{\text{отх}}$	$M_{\text{техн}}$	$V_{\text{техн}}$, млрд руб. billion RUB	$V_{\text{отх}}$, млрд руб. billion RUB	$V_{\text{переработка}}$, млрд руб. billion RUB	$V_{\text{мониторинг}}$, млрд руб. billion RUB	Z , млрд руб. billion RUB
Без переработки и с базовым мониторингом технологических процессов Without recycling and with basic monitoring of technological processes	0	0	0,5	0,38	0,5	0	0,04	0,91
Частичная переработка с базовым мониторингом технологических процессов и полигонов Partial recycling with basic monitoring of technological processes and landfills	0,5	0,5	0,5	0,38	0,31	0,15	0,06	0,89
Полная переработка с базовым мониторингом технологических процессов и расширенным мониторингом полигонов Full recycling with basic monitoring of technological processes and extended monitoring of landfills	1,0	1,0	0,5	0,38	0	0,6	0,08	1,06
Без переработки и с расширенным мониторингом технологических процессов Without recycling and with extended monitoring of technological processes	0	0	1,0	0,25	0,5	0	0,05	0,80
Частичная переработка с расширенным мониторингом технологических процессов и базовым мониторингом полигонов Partial recycling with extended monitoring of technological processes and basic monitoring of landfills	0,5	0,5	1,0	0,25	0,31	0,15	0,08	0,78

Окончание таблицы 5

Стратегия Strategy	x	$M_{отх}$	$M_{техн}$	$B_{техн}'$ млрд руб. billion RUB	$B_{отх}'$ млрд руб. billion RUB	$B_{переработка}'$ млрд руб. billion RUB	$B_{мониторинг}'$ млрд руб. billion RUB	Z , млрд руб. billion RUB
Полная переработка с расширенным мониторингом технологических процессов и полигонов Full recycling with extended monitoring of technological processes and landfills	1,0	1,0	1,0	0,25	0	0,6	0,10	0,95

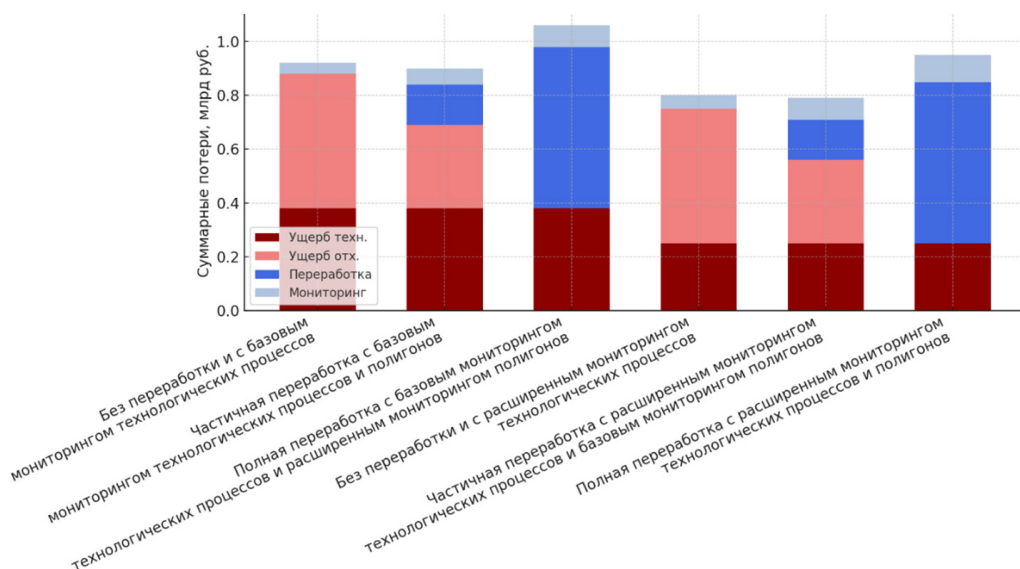


Рис. 3. Структура совокупных потерь при различных стратегиях переработки и мониторинга отходов

Fig. 3. Structure of total losses under different waste recycling and monitoring strategies

Разработанная модель демонстрирует эффективность риск-ориентированного управления, позволяющего на основе комплексного учета переработки, мониторинга и затрат минимизировать общий риск и потери на предприятиях металлургической отрасли.

В рамках работы стояла задача оптимального распределения выделенного бюджета B между тремя основными направлениями воздействия на снижение экологических и экономических рисков на металлургическом предприятии: мониторингом технологического процесса, мониторингом отходов и переработкой отходов. Основной целью было определить такие доли финан-

сирования каждого направления, которые при заданном общем лимите затрат обеспечат минимизацию совокупных потерь, включающих остаточный ущерб технологического процесса и отходов, а также расходы на мониторинг и переработку.

В связи с большой размерностью расчетных таблиц, содержащих 1331 комбинацию параметров, полное представление данных невозможно и затруднительно для восприятия. Полученные результаты проанализированы визуально с использованием трехмерных графиков (рис. 4, для примера $B = 0,1$ млрд руб.), отражающих влияние параметров на итоговые экономические показатели.

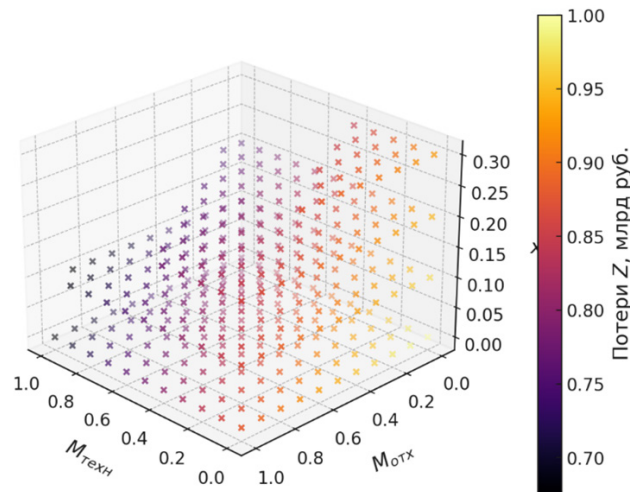


Рис. 4. Зависимость совокупных потерь Z от уровней мониторинга технологического процесса и отходов, а также доли переработки отходов при бюджете для примера $B = 0,1$ млрд руб.

Fig. 4. Dependence of total losses Z on the levels of technological process monitoring, waste monitoring, and the share of waste recycling with a budget example of $B = 0.1$ billion RUB

В табл. 6 приведены оптимальные значения уровней мониторинга технологического процесса и отходов, а также доли переработки отходов для различных уровней бюджета. Показаны соответствующие значения

остаточного ущерба, затрат на переработку и мониторинг, а также суммарные потери, что позволяет оценить эффективность различных стратегий управления в зависимости от выделяемых финансовых ресурсов.

Таблица 6
Оптимальные решения по распределению бюджета на мониторинг и переработку отходов металлургического предприятия

Table 6
Optimal solutions for budget allocation between monitoring and waste recycling at a metallurgical enterprise

B , млрд руб. billion RUB	$M_{техн}$	$M_{отх}$	χ	$B_{техн}'$, млрд руб. billion RUB	$B_{отх}'$, млрд руб. billion RUB	$B_{переработка}'$, млрд руб. billion RUB	$B_{мониторинг}'$, млрд руб. billion RUB	Z , млрд руб. billion RUB
0,01	0	0,3	0	0,5	0,46	0	0,01	0,96
0,025	0,2	0,5	0	0,45	0,43	0	0,03	0,9
0,05	0,4	1	0	0,4	0,35	0	0,05	0,8
0,075	1	0,8	0	0,25	0,38	0	0,07	0,7
0,1	1	0,9	0,1	0,25	0,33	0,02	0,08	0,68
0,125	1	0,7	0	0,25	0,4	0	0,07	0,72
0,15	1	0,6	0	0,25	0,41	0	0,07	0,73
0,25	1	0,5	0,3	0,25	0,32	0,07	0,06	0,69
0,5	1	0,5	0,3	0,25	0,32	0,07	0,06	0,69
0,75	1	1	1	0,25	0	0,6	0,08	0,93
1	1	1	1	0,25	0	0,6	0,08	0,93

Исследование показало, что размер выделяемого бюджета существенно влияет на оптимальное распределение ресурсов между мониторингом технологического процесса, мониторингом отходов и переработкой отходов. При ограниченных бюджетах акцент смещается в пользу мониторинга отходов с минимальной или отсутствующей переработкой, что связано с высокой стоимостью переработки и необходимостью сохранять контроль за экологической ситуацией. При увеличении бюджета появляется возможность активнее инвестировать в переработку отходов, что снижает остаточный ущерб от их захоронения. Однако экономическая эффективность требует нахождения компромисса между затратами на переработку и мониторинг, поскольку переработка, особенно при высоких долях, ведет к экспоненциальному росту затрат. Минимальный бюджет, необходимый для обеспечения полной переработки всех отходов при полном мониторинге технологического процесса и отходов, оценивается примерно в 0,75 млрд рублей. Этот порог определен суммой максимальных затрат на переработку и мониторинг и служит техническим ориентиром для планирования финансирования. Для бюджетов ниже порогового значения оптимальной стратегией является частичная переработка отходов (около 30 %) при высоком уровне мониторинга. Это обеспечивает минимизацию совокупных потерь, сочетая снижение экологического ущерба с контролем затрат. Мониторинг технологического процесса и отходов остается ключевым элементом стратегии управления даже при ограниченном бюджете. Он позволяет существенно снижать остаточный ущерб и предупреждать аварийные

ситуации, особенно в условиях дефицита средств на полную переработку.

Заключение

Разработана и апробирована многопараметрическая модель оптимизации стратегии переработки и мониторинга, которая интегрирует основные факторы управления техногенными рисками на промышленных объектах: долю переработки отходов, уровень охвата мониторингом технологических процессов и полигонов отходов, а также распределение ограниченного бюджета.

Модель учитывает остаточный ущерб как на технологических стадиях, так и на полигонах отходов, показывая, что его снижение возможно как за счет увеличения доли переработки, так и за счет расширения мониторинга. Эти меры действуют независимо, но в совокупности дают синергетический эффект, позволяющий более эффективно минимизировать совокупные потери.

Проведенные расчеты для твердых коммунальных и металлургических отходов подтвердили адекватность предложенной модели. Для ТКО оптимальная доля переработки зависит от применяемой технологии: при термической обработке минимум совокупных потерь достигается примерно при 80 %, при плазмохимической технологии с доходом 0,3х — при переработке свыше 70 %. Для металлургических предприятий (органическая составляющая отходов) минимальные совокупные потери наблюдаются при доле переработки 30–40 %, что связано с высокой стоимостью плазмохимических технологий и ограниченным эффектом

по снижению ущерба. Таким образом, модель позволяет количественно обосновывать диапазоны оптимальной переработки для различных типов отходов и стратегий, демонстрируя ее универсальность и прикладную ценность.

Оптимизация распределения бюджета показала, что приоритетное финансирование мониторинга технологических процессов в сочетании с частичной переработкой позволяет достичь наилучшего баланса между

снижением остаточного ущерба и экономической эффективностью.

Модель продемонстрировала высокую адаптивность и может применяться для обоснования решений по распределению ресурсов на промышленных объектах различного профиля. Она обеспечивает основу для разработки риск-ориентированных программ обращения с отходами, учитывающих как технологические особенности производства, так и ограничения бюджета.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шкодинский С. В., Рыкова И. Н., Юрьева А. А. Анализ существующей в России системы поддержки инвестиционных проектов в сфере обработки и утилизации отходов // Вестник Евразийской науки. 2021. № 5. URL: <https://clck.ru/3RkpwE> (дата обращения: 01.09.2025). DOI: 10.15862/02ECVN521
2. Крельберг А. Б. Алгоритм решения одной из задач экономики замкнутого цикла // Экономика промышленности (Экопром). 2024. Т. 17, № 2. С. 161–171. DOI: 10.17073/2072-1633-2024-2-161-171
3. Блоков И. П., Таргулян О. Ю., Усов Е. И. Накопленный вред окружающей среде: разрушения здоровья и бюджетов. М., 2020. 61 с.
4. Гарелина С. А. Многопараметрическая модель оптимизации стратегии переработки отходов и мониторинга на промышленных объектах // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 126–137.
5. Li H., Garelina S. A., Kazaryan M. A. Technological parameters of the discharger intended for the polymer recycling // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1145. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1145/1/012038> (accessed 01.09.2025).
6. Experimental study on microwave-assisted pyrolysis of oily sludge in a modified quartz tube reactor / S. Wang et al. // Journal of Composites Science. 2024. Vol. 5, No. 1. Art. 6. URL: <https://www.mdpi.com/2673-4141/5/1/6> (accessed 01.09.2025).
7. IEA Bioenergy. Energy from waste: summary and conclusions. UNFCCC Secretariat, 2013. URL: <https://clck.ru/3RkpgY> (accessed 01.09.2025).
8. Валуев Д. В., Гизатулин Р. А. Технологии переработки металлургических отходов : учебное пособие. Томск, 2012. 196 с.
9. Piatak N. M., Parsons M. B., Seal R. R. Characteristics and environmental aspects of slag: A review // Applied Geochemistry. 2015. Vol. 57. Pp. 236–266.

REFERENCES

1. Shkodinsky S. V., Rykova I. N., Yurieva A. A. Analysis of the existing system for supporting investment projects in the field of waste processing and utilization in Russia // Bulletin of Eurasian Science. 2021. No. 5. URL: <https://clck.ru/3Rkove> (accessed 01.09.2025). DOI: 10.15862/02ECVN521
2. Krelberg A. B. Algorithm for solving one of the problems of circular economy // Industrial Economics (Ecoprom). 2024. Vol. 17. No. 2. Pp. 161–171. DOI: 10.17073/2072-1633-2024-2-161-171
3. Blokov I. P., Targulyan O. Yu., Usov E. I. Accumulated environmental damage: destruction of health and budgets. Moscow, 2020. 61 p.
4. Garelina S. A. Multiparameter model for optimizing waste processing and monitoring strategy at industrial facilities // Technosphere Safety. 2025. No. 4 (49). Pp. 126–137.
5. Li H., Garelina S. A., Kazaryan M. A. Technological parameters of the discharger intended for the polymer recycling // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1145. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1145/1/012038> (accessed 01.09.2025).
6. Experimental study on microwave-assisted pyrolysis of oily sludge in a modified quartz tube reactor / S. Wang et al. // Journal of Composites Science. 2024. Vol. 5, No. 1. Art. 6. URL: <https://www.mdpi.com/2673-4141/5/1/6> (accessed 01.09.2025).
7. IEA Bioenergy. Energy from waste: summary and conclusions. UNFCCC Secretariat, 2013. URL: <https://clck.ru/3RkpgY> (accessed 01.09.2025).
8. Valuev D. V., Gizatulin R. A. Technologies for recycling metallurgical waste : Textbook. Tomsk, 2012. 196 p.
9. Piatak N. M., Parsons M. B., Seal R. R. Characteristics and environmental aspects of slag: A review // Applied Geochemistry. 2015. Vol. 57. Pp. 236–266.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гарелина Светлана Александровна, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры механики и инженерной графики Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код: 8591-0495; AuthorID: 163638; e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Svetlana A. Garelina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1A Sokolovskaya St., Khimki, md. Novogorsk, 141435, Russian Federation); SPIN-code: 8591-0495; AuthorID 163638; e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

УДК 614.8

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ MODIS

Глушков Алексей Петрович

Воронежский институт ФСИН России, г. Воронеж, Российская Федерация

Аннотация. В рамках исследования разработан алгоритм автоматизированного детектирования и анализа пожарной обстановки по данным дистанционного зондирования Земли со спутниковых сенсоров MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Предложенный подход обеспечивает непрерывный процесс идентификации термальных аномалий, характерных для очагов открытого горения, с последующей оценкой их ключевых параметров (координаты, площадь, динамика распространения). Генерируемая информация систематизируется для анализа пространственно-временных закономерностей развития пожаров. Результаты обработки предназначены для интеграции в системы поддержки принятия решений, обеспечивая органы управления актуальными и объективными данными для планирования мероприятий по предотвращению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, связанных с пожарами природного и техногенного характера. Таким образом, внедрение данного алгоритма способствует обеспечению безопасности в чрезвычайных ситуациях за счет оперативного предоставления критически важной аналитической информации.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, MODIS, активные очаги горения, яркостная температура, информационно-аналитическая система, спутниковый мониторинг, системный анализ, обработка информации

Для цитирования: Глушков А. П. Алгоритмизация поддержки принятия управленческих решений для обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера на основе данных MODIS // Техносферная безопасность. 2026. № 1 (50). С. 100–108.

ALGORITHMIZATION OF SUPPORT FOR MANAGEMENT DECISION MAKING TO ENSURING SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS OF NATURAL AND MAN-MADE NATURE BASED ON MODIS DATA

Alexey P. Glushkov

Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russian Federation

Abstract. As part of the research, an algorithm for automated detection and analysis of the fire situation has been developed based on remote sensing data from MODIS (Moderate Resolution

Imaging Spectroradiometer) satellite sensors. The proposed approach provides a continuous process of identification of thermal anomalies characteristic of open-gorenje fires, followed by an assessment of their key parameters (coordinates, area, dynamics of propagation). The generated information is systematized to analyze the spatial and temporal patterns of fire development. The processing results are intended for integration into decision support systems, providing management bodies with up-to-date and objective data for planning measures to prevent and eliminate the consequences of emergencies related to natural and man-made fires. Thus, the implementation of this algorithm contributes to ensuring safety in emergency situations by promptly providing critical analytical information.

Keywords: remote sensing of the Earth, MODIS, active fire outbreaks, brightness temperature, information and analytical system, satellite monitoring, system analysis, information processing

For citation: Glushkov A. P. Algorithmization of support for management decision making to ensuring safety in emergency situations of natural and man-made nature based on MODIS data // Technospheric safety. 2026. No. 1 (50). Pp. 100–108.

Введение

Современные задачи обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера требуют оперативного получения объективной информации о состоянии природных территорий. В условиях роста частоты и интенсивности природных пожаров особую актуальность приобретает создание автоматизированных систем дистанционного мониторинга на основе данных дистанционного зондирования Земли (далее — ДЗЗ). Исследования в этой области активно ведутся на протяжении последних лет научными коллективами многих стран [1–3].

Развитие приборов ДЗЗ позволило обеспечить регулярные глобальные наблюдения с высокой временной повторяемостью, что делает спутниковые данные практически безальтернативным источником информации при мониторинге на обширных территориях [4].

Данные ДЗЗ активно используют для обнаружения активных очагов горения, оценки площади и интенсивности пожаров, а также анализа их последствий. Важным преимуществом спутниковой съемки является ее оперативность, объективность и независимость от наземной инфраструктуры. До недавнего времени развитие практических систем сдерживалось ограниченной доступностью данных и недостаточной автоматизацией методов обработки. Однако появление современных спутниковых систем, таких как Terra/Aqua — MODIS, сделало данные ДЗЗ качественно более доступными и пригодными для решения прикладных задач.

Для решения задач пожарного мониторинга применяют данные среднего разрешения, сочетающие достаточную пространственную детальность и высокую частоту наблюдений. В качестве основного источника данных выбран прибор MODIS, установленный на борту спутников Terra и Aqua, обеспечивающий двукратную ежедневную съемку

поверхности Земли с пространственным разрешением 1 км в инфракрасных каналах, что позволяет оперативно выявлять термические аномалии, связанные с пожарами.

Эффективное использование данных MODIS требует разработки специализированных методов предварительной и тематической обработки, ориентированных на детектирование активных очагов горения.

Цель исследования — разработка алгоритма автоматизированной обработки данных MODIS для оперативного детектирования активных очагов горения, оценки их пространственно-временной динамики и формирования информационной основы для поддержки принятия управленческих решений в условиях чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Материалы и методы

В работе проведен анализ существующих спутниковых систем, способных идентифицировать пожары. Одни из главных критериев выбора — доступность информации, площадь идентификации и частота обновления выявленной термоточки.

В ходе анализа спутниковых систем для мониторинга пожаров был выбран метод MODIS как наиболее сбалансированный и эффективный для решения научно-прикладных задач. Ключевыми преимуществами стали: глобальное покрытие, высокая частота обновления данных (до четырех раз в сутки), открытый доступ к архиву с 2000 г. Технологическая возможность включает съемку в 36 спектральных каналов (диапазонов), охватывающих видимый, ближний, средний и дальний инфракрасный диапазоны, а также предоставление готовых специализированных продуктов (MOD14/MYD14) с уже

рассчитанными параметрами (координаты термоточки, мощность теплового излучения (FRP), уровень достоверности). Возможность использования API (Application Programming Interface) для получения данных в режиме, близком к реальному масштабу времени, является основой для развертывания интерактивной публичной карты пожаров. Эти характеристики делают MODIS оптимальным инструментом для оперативного отслеживания пожаров и долгосрочного анализа их динамики.

В работе использовали следующие данные MODIS — откалиброванные данные спектральной яркости и температуры (MOD021KM), геолокационные данные (широта, долгота, углы наблюдения — MOD03), стандартный продукт активных пожаров (для валидации MOD14) [5–7].

Анализ данных MODIS и алгоритм детектирования пожаров

Предварительная обработка данных включала следующие этапы.

1. Фильтрация по углу наблюдения для исключения пикселей с зенитным углом наблюдения более 60° для минимизации искажения, вызванного атмосферным рассеянием.
2. Геопривязка термоточек для предварительной обработки данных спутниковых измерений до формирования итоговых продуктов (MOD14) с информацией об активных очагах: исходные данные (радиометрические измерения в каналах 3,9 мкм и 11 мкм) синхронизируются с геолокационными метаданными из продукта MOD03, который предоставляет широту, долготу и углы наблюдения для каждого пикселя

с точностью ±500 м. Алгоритм детекции пожаров использует эти геопривязанные данные для расчета тепловых аномалий и координирования термоточек.

3. Расчет яркостной температуры заключался в измерении прибором спутника энергии, излучаемой от поверхности Земли в инфракрасном диапазоне. Чтобы определить, является ли этот сигнал признаком пожара, необходимо перевести его в физическую температуру. Поскольку MODIS не измеряет температуру напрямую, а фиксирует спектральную яркость, использовали обратную формулу закона Планка [8]. Необходимо

$$T_{b,3,9} > 310K. \tag{1}$$

Для снижения числа ложных срабатываний, вызванных горячими поверхностями без пламени, применяется разность

$$\Delta T = T_{b,3,9} - T_{b,11} > 10K. \tag{2}$$

Для обнаружения активного очага температуру центрального пикселя сравнивали с усредненной температурой его ближайшего окружения. Для этого в окне размером 3×3 пикселя (исключая анализируе-

$$T_{b,3,9} - T_{окр} > 15K. \tag{3}$$

5. Предусматривает результаты обработки по данным критериям в форме таблицы (MOD14), каждая запись которой содержит координаты, тепловые аномалии (bright_ti4, bright_ti5), мощность теплового излучения (FRP), метаданные

отметить, что данный этап обеспечивает физически обоснованную оценку температуры поверхности, необходимую для выявления термических аномалий.

4. Детектирование активных очагов горения. Данный алгоритм основан на модифицированной версии стандартного подхода, применяемого в продукте MOD14, и включает совокупность спектральных и пространственных критериев.

Пиксель рассматривали как возможный активный очаг, если яркостная температура в канале 3,9 мкм превышает установленное значение температуры.

температур между коротковолновым и длинноволновым инфракрасными каналами [9].

мый центр) вычисляли среднее значение. Пиксель считается активным очагом, если его температура превышает этот средний фон. При этом размер окна может быть адаптивный, а не фиксированный.

съемки (спутник, время, проч.) и атрибуты классификации (достоверность, тип очага).

Расчет мощности теплового излучения осуществляли по следующему выражению [10]:

$$FRP \approx \frac{A_{pix} \sigma}{\alpha \tau_4} (L_4 - \bar{L}_4), \tag{4}$$

где:

A_{pix} — площадь пикселя MODIS (варьируется как функция угла сканирования);
 σ — постоянная Стефана – Больцмана ($5,6704 \cdot 10^{-8} \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$);

α — эмпирическая постоянная, зависящая от прибора (для MODIS $\alpha = 3,0 \cdot 10^{-9} \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{ср}^{-1} \text{мкм}^{-1} \text{К}^{-4}$);

τ_4 — коэффициент прохождения 21 канала MODIS в атмосфере;

L_4 — энергетическая яркость термически активного пиксела (цели) в канале 21, радиометра MODIS $\lambda \approx 4 \text{ мкм}$;

L_4 — энергетическая яркость фона в том же спектральном диапазоне.

Для повышения надежности данных применяют отбор термоточек с уровнем уверенности (confidence). Для разных задач используют различные пороговые значения: 30 % — когда важна полнота охвата, 80 % — когда приоритетом является минимальное количество ложных тревог.

Ежегодные наборы фиксированных параметров хранятся в сводных табличных базах данных. Из-за большого объема информации (миллионы записей) такие массивы относят к категории Big Data. Обработка таких массивов требует применения современных языков программирования для автоматической маркировки и эффективной обработки.

Алгоритм получения и обработки информации MODIS для решения задач управления безопасностью в чрезвычайных ситуациях представлен на рисунке.

$$\begin{aligned} \text{lat_min} &\leq \text{latitude} \leq \text{lat_max} \\ \text{lon_min} &\leq \text{longitude} \leq \text{lon_max} \end{aligned}$$

Для индикации физических параметров термоточки используем значения brightness и FRP, где $\text{min_brightness} = 320 \text{ К}$ — это минимальная яркостная температура, $\text{min_frp} = 1 \text{ МВт}$ — это минимальная мощность излучения, $\text{max_brightness} = 600 \text{ К}$ — это максимальная яркостная температура.

В качестве критерия достоверности использовали параметр confidence при минимальном значении, равном 30 %.

На основе многолетнего анализа временных рядов температурных аномалий рекомендуется сформировать маску стационарных источников тепла (промышленные

Для функционирования представленного алгоритма в архитектуру данного программного комплекса включены следующие блоки: Graphical User Interface (GUI), модуль обработки данных для работы с CSV-форматом, картографический модуль и аналитический модуль для статистических вычислений [11].

В качестве исходных данных термоточек выступали следующие параметры: latitude, longitude, brightness, confidence, acq_date, acq_time, frp.

Для дальнейшей обработки такого вида данных применим алгоритм отбора термоточек (многоуровневая фильтрация постоянных источников тепла). В качестве координатного фильтра использовали параметры latitude и longitude, где диапазон этих значений имеет вид:

зоны, ТЭЦ и др.), которые исключаются из итогового списка термоточек.

Разработанная система реализована в виде модульной архитектуры и включает в себя следующие подсистемы:

подсистема автоматизированной загрузки данных, которая осуществляет регулярную выборку данных MODIS с официальных серверов (NASA LAADS DAAC, NOAA CLASS);

подсистема предварительной и тематической обработки, которая реализует описанные выше алгоритмы с использованием библиотек: GDAL, NumPy и SciPy;

подсистема визуализации, которая позволяет генерировать векторные слои активных очагов в формате GeoJSON и отображает их в веб-интерфейсе на базе MapLibre GL JS;

подсистема отчетности и оповещения — формирует ежедневные сводки по количеству термоточек по регионам, способна отправлять уведомления при превышении заданных пороговых значений.

Для независимой проверки точности алгоритма детектирования MODIS применены данные сенсора VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) со спутников Suomi NPP и NOAA-20, обеспечивающего пространственное разрешение 375 м в канале активного пожара, при этом точность детектирования сенсора MODIS составила 88,1% и уровень ложных срабатываний составил 7,9%.

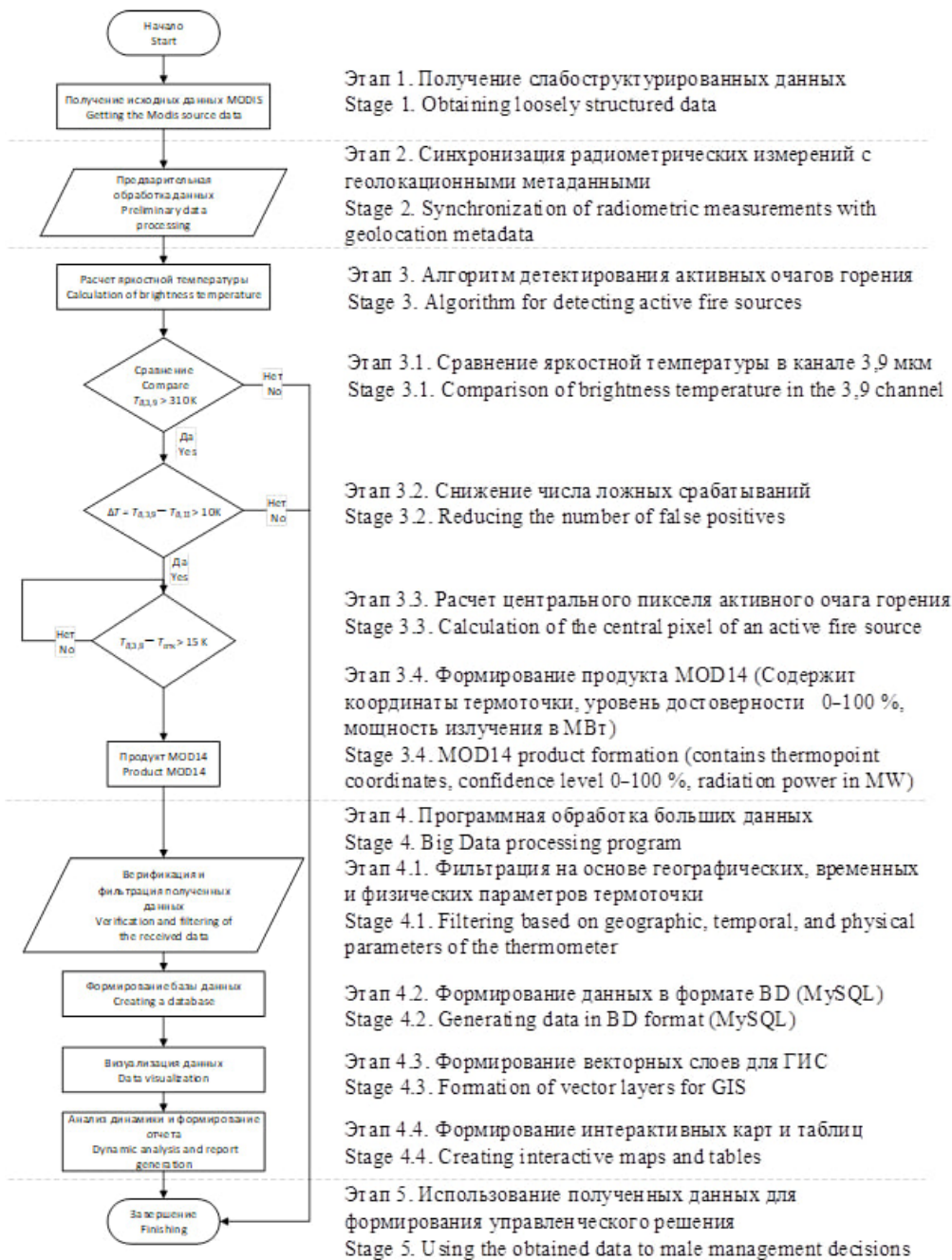


Рис. Алгоритм получения и обработки информации MODIS для решения задач управления безопасностью в чрезвычайных ситуациях

Fig. Modis information acquisition and processing algorithm for solving emergency safety management tasks

Заключение

Разработанный алгоритм автоматизированной обработки спутниковых данных MODIS направлен на решение задач оперативного детектирования активных очагов горения и анализа их пространственно-временной динамики. Реализующее его авторское программное обеспечение [11] позволяет осуществлять мониторинг активных очагов горения на территории субъектов РФ и других регионов, формировать базы

данных термоточек в административных границах региона и проводить количественную оценку числа термоточек, выполнять пространственный анализ плотности очагов для прогнозирования масштаба пожарной нагрузки.

Программа применима для планирования сил и средств, задействованных для ликвидации пожаров и осуществления интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений для обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sabitov O., Mukhamedgali A. Integrated satellite image processing for environmental monitoring and forest fire prediction in Abay region using Google Earth Engine // *Universum*. 2025. No. 5–9 (134). Pp. 20–23. DOI: 10.32743/UniTech.2025.134.5.20077
2. Roy P. S., Behera M. D., Srivastav S. K. Satellite Remote Sensing: Sensors, Applications and Techniques. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section // Physical Sciences*. 2017. Vol. 87 (4). Pp. 465–472. DOI: 10.1007/s40010-017-0428-8
3. Monitoring fire regimes and assessing their driving factors in Central Asia / H. Yin et al. // *Journal of Arid Land*. 2021. Vol. 13, No. 5. Pp. 500–515. DOI: 10.1007/s40333-021-0008-2
4. Арифуллин Е. З., Аврамов З. А., Калач А. В. Космический мониторинг пожароопасных и других видов чрезвычайных ситуаций // *Гражданская оборона и природно-технические системы : сборник статей по материалам XX Международной научно-практической конференции / Воронежский государственный технический университет. Воронеж, 2024. С. 62–65. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=75195198> (дата обращения: 23.12.2025).*
5. MODIS/Terra Calibrated Radiances 1km L1B Daily (MOD021KM). Collection 6.1. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) // NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2023. URL: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD021KM.061> (дата обращения: 03.01.2026).
6. MODIS/Terra Geolocation Fields 1km Daily (MOD03), Collection 6.1. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) // NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2023. URL: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD03.061> (дата обращения: 03.01.2026).
7. MODIS/Terra Thermal Anomalies & Fire Daily (MOD14), Collection 6. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) // NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2021. URL: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD14.006> (дата обращения: 03.01.2026).
8. Технологии дистанционного мониторинга засух : монография / А. Н. Романов [и др.]. Барнаул, 2024. 148 с.

9. The MODIS fire products / C. O. Justice et al. // Remote Sensing of Environment. 2002. Vol. 83. Pp. 244–262. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00076-7

10. Оценка повреждений российских лесов пожарами в 21 веке на основе анализа интенсивности горения по данным приборов MODIS / Д. В. Лозин [и др.] // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» / Институт космических исследований Российской академии наук. М., 2024. С. 188. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80451686> (дата обращения: 03.01.2026).

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025697074 Российская Федерация. Программа для определения пожарной опасности территории на основе ретроспективной информации : № 2025695771 : заявл. 08.12.2025 : опубл. (зарег.) 22.12.2025 / А. В. Калач [и др.] ; заявитель ВИ ФСИН России.

REFERENCES

1. Sabitov O., Mukhamedgali A. Integrated satellite image processing for environmental monitoring and forest fire prediction in Abay region using Google* Earth Engine // Universum. 2025. No. 5–9 (134). Pp. 20–23. DOI: 10.32743/UniTech.2025.134.5.20077

2. Roy P. S., Behera M. D., Srivastav S. K. Satellite Remote Sensing: Sensors, Applications and Techniques. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section // Physical Sciences. 2017. Vol. 87 (4). Pp. 465–472. DOI: 10.1007/s40010-017-0428-8

3. Monitoring fire regimes and assessing their driving factors in Central Asia / H. Yin et al. // Journal of Arid Land. 2021. Vol. 13, No. 5. Pp. 500–515. DOI: 10.1007/s40333-021-0008-2

4. Arifullin E. Z., Avramov Z. A., Kalach A. V. Space monitoring of fire hazards and other emergency situations // Civil Defense and Natural-Engineering Systems : Collection of articles based on the materials of the XX International Scientific and Practical Conference / Voronezh State Technical University. Voronezh, 2024. Pp. 62–65. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=75195198> (accessed 23.12.2025).

5. MODIS/Terra Calibrated Radiances 1km L1B Daily (MOD021KM). Collection 6.1. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) // NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2023. URL: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD021KM.061> (accessed 03.01.2026).

6. MODIS/Terra Geolocation Fields 1km Daily (MOD03), Collection 6.1. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) // NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2023. URL: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD03.061> (accessed 03.01.2026).

7. MODIS/Terra Thermal Anomalies & Fire Daily (MOD14), Collection 6. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) // NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2021. URL: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD14.006> (accessed 03.01.2026).

8. Remote drought monitoring technologies : monograph / A. N. Romanov et al. Barnaul, 2024. 148 p.

9. The MODIS fire products / C. O. Justice et al. // Remote Sensing of Environment. 2002. Vol. 83. Pp. 244–262. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00076-7

10. An assessment of fire damage to Russian forests in the 21st century based on an analysis of fire intensity using MODIS data / D. V. Lozin et al. // Proceedings of the 22nd International

Conference "Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space" / Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences. Moscow, 2024. P. 188. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80451686> (accessed 03.01.2026).

11. Certificate of state registration of a computer program No. 2025697074 Russian Federation. A program for determining the fire hazard of an area based on retrospective information : № 2025695771 : application dated 08.12.2025 : published on 22.12.2025 / A. V. Kalach et al. ; applicant VI of the Federal Penitentiary Service of Russia.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Глушков Алексей Петрович, старший преподаватель кафедры безопасности информации и защиты сведений, составляющих государственную тайну Воронежского института ФСИН России (394072, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Иркутская, д. 1а); РИНЦ ID: 3849-7674; ORCID: 0000-0002-8337-7446; e-mail: alexglushkov@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Alexey P. Glushkov, Senior lecturer of the department of information security and protection of information constituting a state secret, Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia (1a Irkutskaya St., Voronezh, 394072, Russian Federation); ID RISC: 3849-7674; ORCID: 0000-0002-8337-7446; e-mail: alexglushkov@bk.ru

УДК 614.8

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕРЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ

Пичугин Леонид Михайлович¹, Лавров Валерий Юрьевич, Шабанова Светлана Владимировна²,
Абрамов Александр Дмитриевич

¹ СИНЕРГИЯ, г. Москва, Российская Федерация

² РОСБИОТЕХ, г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. В условиях стремительного развития технологических процессов, роста производственной сложности и усиления требований к промышленной безопасности особую актуальность приобретает внедрение инновационных мер противодействия чрезвычайным ситуациям на предприятиях. Настоящая статья посвящена анализу современных подходов к обеспечению безопасности, сформировавшихся в период 2020–2025 гг. в рамках концепции «Безопасность 4.0». Рассмотрены ключевые направления инноваций, среди которых особое внимание уделено применению систем прогнозной аналитики на основе искусственного интеллекта и машинного обучения для раннего выявления предаварийных состояний, широкому использованию интернета вещей для непрерывного мониторинга критически важных параметров производственной среды, разработке и применению цифровых двойников технологических процессов для моделирования сценариев развития аварийных ситуаций и поддержки оперативного принятия решений. Подробно проанализированы возможности виртуальной и дополненной реальности в процессе подготовки персонала к действиям в условиях аварий и катастроф, а также описано использование носимых электронных устройств для контроля состояния работников и окружающей среды в режиме реального времени. Отдельное внимание уделено перспективам применения робототехнических комплексов и беспилотных летательных аппаратов для реагирования на аварийные ситуации в условиях, опасных для человека. Приведены примеры успешного внедрения указанных технологий в зарубежной и российской практике, что позволяет сделать вывод о глобальной тенденции перехода от реактивного к проактивному управлению промышленной безопасностью. Отмечены основные вызовы на пути интеграции инновационных решений, включая необходимость обеспечения кибербезопасности, совершенствования нормативной правовой базы, стандартизации данных и подготовки высококвалифицированного персонала нового типа (Оператор 4.0). Статья направлена на формирование целостного представления о современном состоянии и перспективах развития системы противодействия чрезвычайным ситуациям на предприятиях с использованием цифровых и интеллектуальных технологий, демонстрируя важность комплексного междисциплинарного подхода к решению задач обеспечения безопасности в условиях цифровизации промышленности.

Ключевые слова: интернет вещей, искусственный интеллект, носимые устройства, обучение в виртуальной реальности, прогнозирование аварий, промышленная безопасность, робототехнические системы, цифровизация безопасности, цифровой двойник, чрезвычайные ситуации

Для цитирования: Инновационные меры противодействия чрезвычайным ситуациям на предприятиях / Л. М. Пичугин [и др.] // Техносферная безопасность. 2026. № 1 (50). С. 109–120.

INNOVATIVE MEASURES TO COUNTERACT EMERGENCIES AT ENTERPRISES

Leonid M. Pichugin¹, Valery Yu. Lavrov, Svetlana V. Shabanova², Alexander D. Abramov

¹ Synergy, Moscow, Russian Federation

² ROSBIOTEC'H University, Moscow, Russian Federation

Abstract. In the context of the rapid development of technological processes, increasing production complexity, and tightening industrial safety requirements, the implementation of innovative measures to counteract emergencies at enterprises is becoming increasingly relevant. This article is devoted to the analysis of modern approaches to ensuring safety, developed between 2020 and 2025 within the framework of the "Safety 4.0" concept. The key areas of innovation are considered, with particular attention given to the application of predictive analytics systems based on artificial intelligence and machine learning for early detection of pre-emergency conditions, the widespread use of the Internet of Things for continuous monitoring of critical parameters of the production environment, and the development and implementation of digital twins of technological processes for simulating emergency development scenarios and supporting operational decision-making. The potential of virtual and augmented reality technologies in personnel training for actions in emergency conditions is thoroughly analyzed, as well as the use of wearable electronic devices for real-time monitoring of workers' conditions and environmental parameters. Special attention is paid to the prospects of using robotic systems and unmanned aerial vehicles for emergency response operations in hazardous environments. Examples of the successful implementation of these technologies in both foreign and Russian practices are provided, leading to the conclusion of a global trend toward the transition from reactive to proactive industrial safety management. Major challenges in integrating innovative solutions are noted, including the need to ensure cybersecurity, improve the regulatory framework, standardize data, and train highly qualified personnel of a new type (Operator 4.0). This article aims to provide a comprehensive understanding of the current state and development prospects of the emergency counteraction system at enterprises using digital and intelligent technologies, demonstrating the importance of a comprehensive interdisciplinary approach to solving safety challenges in the era of industrial digitalization.

Keywords: internet of things, wearable devices, training in virtual reality, accident-forecasting, industrial safety, robotic systems, digital safety transformation, artificial intelligence digital twin, emergency situations

Введение

Чрезвычайные ситуации (далее — ЧС) на промышленных предприятиях способны приводить к значительным человеческим жертвам, материальным убыткам и экологическому ущербу. Производственные аварии и несчастные случаи не только вызывают прямые потери, но и ведут к длительным остановкам производства, штрафным санкциям со стороны надзорных органов, утрате деловой репутации предприятия и другим косвенным издержкам. По оценкам современных исследований, травматизм и смертность на рабочих местах влекут за собой значимые финансовые потери и управленческие кризисы на предприятиях. В этой связи обеспечение промышленной безопасности и готовности к ЧС является одной из приоритетных задач современной индустрии.

Традиционные методы безопасности (регламентный контроль оборудования, обучение персонала по инструкциям, плановые проверки) сегодня дополняются инновационными мерами, основанными на достижениях науки и техники. С развитием концепции «Индустрия 4.0» сформировался и новый подход «Безопасность 4.0», предполагающий активное использование цифровых технологий для предотвращения аварий и смягчения последствий ЧС. Концепция «Безопасность 4.0» нацелена на предотвращение инцидентов за счет интеграции в систему управления безопасностью таких технологий, как искусственный интеллект, интернет вещей, киберфизические системы, большие данные и др.

Цифровые технологии прогнозирования и предотвращения аварий

Одним из важнейших направлений инноваций в сфере промышленной безопасности стало прогнозирование аварийных ситуаций с помощью цифровых технологий. Современные предприятия все чаще внедряют системы раннего обнаружения отклонений в технологических процессах, основанные на анализе больших данных и применении методов искусственного интеллекта. Такие системы мониторят параметры оборудования в реальном времени и способны распознавать предаварийные состояния еще до того, как произойдет отказ или авария. Это позволяет заблаговременно принять меры, например, скорректировать режим работы оборудования или вывести его в безопасное состояние, тем самым предотвратить развитие аварии.

Искусственный интеллект (далее — ИИ) и машинное обучение играют центральную роль в подобных решениях. Алгоритмы машинного обучения могут выявлять аномалии в поведении оборудования на основе потоков датчиков, предсказывая потенциальные неисправности. Согласно современным исследованиям, внедрение ИИ в систему промышленной безопасности позволяет перейти от реагирования на уже случившиеся инциденты к проактивному управлению рисками. Например, методы глубокого обучения успешно применяются для анализа изображений с камер и распознавания опасных ситуаций (утечки, возгорания, отсутствие защитной каски на работнике и т. д.) в режиме

реального времени. Такие интеллектуальные системы существенно снижают вероятность аварий за счет своевременного выявления опасных факторов.

Примером практического внедрения ИИ-технологий служит разработка отечественных ученых для нефтегазовой отрасли. А. Н. Дмитриевский с соавторами предложили автоматизированную систему предупреждения осложнений и аварий при бурении нефтяных скважин на основе методов машинного обучения и нейросетевого анализа данных бурения [1]. Эта система обрабатывает большой объем геолого-технологической информации в реальном времени и способна прогнозировать наступление аварийных осложнений (например, прихват бурильного инструмента, газовый выброс) с целью их предотвращения. По данным авторов, крупные нефтегазовые компании РФ уже переходят к использованию подобных цифровых технологий при бурении скважин, что выступает инновационным драйвером повышения безопасности и эффективности добычи нефти [1]. Таким образом, использование искусственного интеллекта для прогнозирования аварий — яркий пример инновационной меры, объединяющей зарубежные достижения (алгоритмы машинного обучения, развитые в 2020-х гг.) и отечественную практику (адаптация этих алгоритмов к задачам нефтегазового комплекса России).

Помимо ИИ, важным компонентом цифровой трансформации безопасности стали системы класса «интернет вещей» (далее — IoT) — сети датчиков, измеряющих критические параметры в цехах и на оборудовании. Снижение стоимости и размеров сенсоров позволило широко оснащать промышленное оборудование датчиками

вибрации, температуры, давления, газового состава и т. д. Эти датчики непрерывно передают данные в единые центры мониторинга. На основе их показаний интеллектуальные алгоритмы способны обнаружить ранние признаки развития нештатной ситуации, например, утечку опасного газа, перегрев узла или отклонение вибрации от нормы, и мгновенно оповестить службу безопасности предприятия. Таким образом достигается раннее предупреждение ЧС. Зарубежные промышленно развитые страны уже накопили большой опыт по внедрению подобных систем мониторинга на основе IoT, позволяющих в режиме реального времени отслеживать состояние производственных объектов и автоматически запускать протоколы реагирования при обнаружении отклонений [2].

Перспективной технологией, расширяющей возможности анализа данных от IoT, является концепция цифрового двойника. Цифровой двойник представляет собой виртуальную модель реального технического объекта или процесса, синхронизированную с ним по данным датчиков. В рамках безопасности такая модель применяется для оценки развития аварийной ситуации и отработки мер противодействия ей. Отмечается, что цифровые двойники уже используются для анализа рисков и поддержки принятия решений при ЧС, обеспечивая имитацию сценариев аварий в реальном времени [3]. Например, система цифрового двойника может на основе текущих параметров предсказывать поведение установки при развитии аварии (распространение пламени, рост давления и т. д.) и подсказывать операторам оптимальные действия по локализации инцидента. Кроме того, цифровой двойник позволяет заранее тестировать эффектив-

ность различных мер защиты в виртуальной среде, не подвергая риску само оборудование. По данным обзора E. Zio и L. Miqueles (2024 г.), применение технологии «цифровой двойник» для целей безопасности демонстрирует многообещающие результаты в самых разных отраслях — от энергетики до авиакосмической — однако требует решения ряда вопросов, включая обеспечение кибербезопасности и достоверности моделей [3].

В России концепция цифровых двойников также находит применение для повышения промышленной безопасности. Например, на крупных нефтехимических и металлургических предприятиях создаются комплексные виртуальные модели технологических линий, позволяющие моделировать аварийные ситуации (разгерметизацию, взрыв) и тренировать персонал действиям по их ликвидации без воздействия на реальное производство. Такие проекты находятся на стыке с системами тренажеров и будут рассмотрены ниже.

Отдельно следует упомянуть инновационные системы поддержки принятия решений (далее — СППР) для диспетчерских и оперативных служб предприятий. Они интегрируют упомянутые выше технологии: прогнозную аналитику, данные IoT и результаты моделирования, чтобы помочь человеку-оператору правильно оценить обстановку и выбрать оптимальные меры реагирования на зарождающуюся ЧС. К примеру, Д. В. Немчинов и др. разработали СППР для управления предаварийными ситуациями на установке каталитического риформинга нефтеперерабатывающего завода [1]. Система анализирует показатели технологического процесса и в случае отклонений рекомендует оператору конкретные шаги (сниже-

ние температуры реактора, переключение потоков и пр.) для предотвращения аварии. Подобные решения относятся к классу предупредительных мер — они не заменяют оператора, но значительно повышают оперативность и обоснованность его действий в стрессовых ситуациях.

Структурная интеграция новых систем в существующую инфраструктуру предприятия — важный практический аспект. Инновационные подсистемы (прогнозные модули, СППР) должны взаимодействовать с традиционными системами контроля (SCADA, системы противоаварийной защиты) и персоналом. Например, на рисунке представлена схема интеграции внешней системы предупреждения аварий (далее — СПАС) в общую систему управления технологическим процессом предприятия. Такая СПАС получает данные от первичных датчиков и SCADA, анализирует их с помощью ситуационной математической модели и передает оператору сигналы предупреждения или рекомендации по предотвращению аварии. При этом система работает параллельно с штатной автоматикой (сигнализацией, противоаварийной защитой), не нарушая ее функций [4].

На рисунке показано, что блок СПАС обменивается данными с существующей SCADA-системой и получает информацию от датчиков (первичных измерительных преобразователей), установленных на технологическом оборудовании. Аналитический модуль СПАС отслеживает тенденции изменения параметров и выявляет предаварийные ситуации. В случае обнаружения опасной тенденции СПАС может оповестить оператора (через рабочую станцию АСУТП) о необходимости вмешательства либо напрямую послать корректирующее воздействие

в систему управления. Оператор, в свою очередь, взаимодействует как с основной системой управления, так и с подсказками СПАС, получая двойной контур контроля над ситуацией. Практическая реализация подобной схемы была выполнена в Астраханском техническом университете (2022 г.) при создании опытного образца СПАС для опасных технологических объектов [4]. Испытания показали, что использование системы, способной прогнозировать развитие аварийного режима и предотвращать аварийную остановку оборудования, повышает безопасность и устойчивость функционирования опасных производственных объектов. Данный пример демонстрирует эффективность интеграции инновационной СППР в существующие контуры управления предприятием.

В заключение раздела следует отметить, что цифровые технологии прогнозирования аварий сегодня проходят этап активного внедрения. Зарубежные компании-пионеры (в сфере нефти и газа, химического производства, энергетики) уже отчитываются о снижении числа инцидентов после установки систем предиктивной аналитики и цифровых двойников. В России также реализуется ряд программ цифровизации промышленной безопасности на крупных предприятиях при поддержке государственных инициатив по переходу к «цифровой экономике». Обмен передовым опытом и адаптация лучших зарубежных практик (ИИ-аналитика, «цифровой двойник») к российским условиям играют важную роль в повышении уровня защищенности отечественных производств.

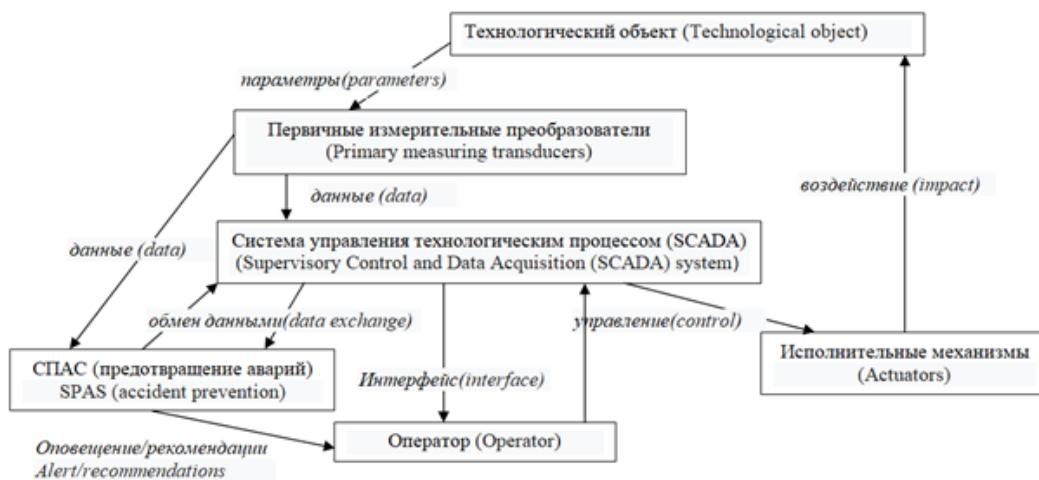


Рис. Структурная схема интеграции системы предупреждения аварий (СПАС) в автоматизированную систему управления технологическим процессом предприятия

Fig. Structural diagram of the integration of the accident prevention system (SPAS) into the automated process control system of the enterprise

Технологии подготовки персонала и реагирования на чрезвычайные ситуации

Также крупным направлением инноваций в области противодействия ЧС на предприятиях является внедрение технологий, повышающих готовность персонала к авариям и эффективность аварийно-спасательных

работ. Сюда относятся новые средства обучения и тренировки работников, а также современные технические решения для непосредственного реагирования в условиях ЧС.

Виртуальная и дополненная реальность (далее соответственно — VR и AR) все шире используются для обучения безопасным методам работы и действиям в аварийных

ситуациях. Традиционные учения и инструктажи постепенно дополняются иммерсивными тренажерами, которые позволяют персоналу отрабатывать навыки в симулированной опасной среде. Исследования показывают, что применение VR/AR-технологий делает обучение технике безопасности более наглядным и эффективным, повышает уровень усвоения знаний и готовности к реальным ЧС. Например, с помощью VR можно смоделировать пожар в цехе и дать работникам потренироваться в тушении огня огнетушителем или эвакуации, не подвергая их реальной опасности. AR-технологии позволяют накладывать подсказки и инструкции на реальное окружение через специальные очки или планшеты: так, инженер, проходящий по объекту, может видеть указатели к ближайшим аварийным выходам или расположение скрытых пожарных гидрантов. В работе G. Lampropoulos et al. (2024 г.) проведен обзор применения AR/VR для промышленного обучения и сделан вывод, что иммерсивные технологии зарекомендовали себя как эффективный инструмент повышения компетенций в области охраны труда и снижения травматизма [5]. Уже сейчас многие международные корпорации (например, в строительстве и нефтехимии) внедряют VR-тренинги по реагированию на разливы, взрывы и другие ЧС. В России подобные решения также находят применение: созданы VR-тренажеры для подготовки сотрудников МЧС и промышленных аварийно-спасательных формирований, некоторые крупные компании (например, в горнодобывающем секторе) начинают оснащать учебные центры системами виртуальной реальности для отработки сценариев аварий.

Носимые устройства — еще одна современная технология, повышающая безопас-

ность работников при ЧС. К носимым устройствам относятся умные каски, браслеты, датчики, закрепленные на спецодежде, экзоскелеты и пр. Они позволяют в реальном времени отслеживать положение человека, его физиологические показатели (пульс, дыхание), воздействие на него вредных факторов (газовая среда, температура) и т. д. Системы мониторинга на основе носимых устройств уже сейчас внедряются на предприятиях в разных странах для контроля самочувствия работников и условий окружающей среды. К примеру, в США и Европе распространены носимые газоанализаторы для работников химических производств: при утечке токсичного газа прибор на теле работника подает сигнал тревоги и передает координаты пострадавшего в центр управления, что ускоряет спасательные операции. Другие примеры — «умные» каски с датчиком удара и положением (полезны при падении рабочего — сразу сигнализируют об инциденте), носимые трекеры усталости водителей погрузчиков (следят за состоянием и предупреждают о засыпании) и т. п. По итогам обзора (E. Svertoka et al., 2021 г.), носимые устройства можно классифицировать на несколько типов по функциям: мониторинг (сбор данных о состоянии работника и окружения), поддержка (например, экзоскелеты снижают нагрузку и предотвращают травмы), обучение (AR-очки для подсказок в процессе работы) и отслеживание местоположения [6]. Потенциал этих технологий для повышения безопасности огромен: они позволяют работодателю в режиме реального времени видеть ситуацию «на земле», мгновенно реагировать на отклонения (падение человека, превышение предельно допустимых концентраций газа и т. д.) и тем самым предотвращать тяжелые

последствия. В России направление, связанное с применением промышленных носимых устройств, также развивается — особенно на предприятиях с высокими рисками (шахты, нефтегаз): там тестируются системы отслеживания местоположения шахтеров по bluetooth-маячкам, «умная» спецодежда с датчиками газа для работников нефтехимии и т. п. [6, 7]. Ожидается, что в ближайшие годы использование носимой электроники в охране труда станет повсеместной практикой.

Когда аварийная ситуация все же произошла, на первый план выходят технологии, повышающие эффективность аварийно-спасательных работ и снижающие риск для спасателей. Инновации здесь движутся в направлении роботизации и автоматизации реагирования. Уже созданы и применяются различные виды роботов, способных действовать в опасной зоне вместо человека: пожарные роботы для тушения пожаров в промышленном помещении, дистанционно управляемые гусеничные аппараты для разведки и ликвидации последствий аварий на химических объектах, роботизированные дроны для обследования труднодоступных или зараженных зон. Например, в ряде стран пожарные службы используют автономных наземных роботов, оснащенных тепловизорами и водяными пушками, которые могут заехать в горящий цех и подавлять пламя, не подвергая людей риску высоких температур. Также набирает популярность применение беспилотных летательных аппаратов (дронов) при промышленно-техногенных ЧС — дроны позволяют быстро осуществить воздушную разведку аварийного объекта, обнаружить очаги пожара или утечки, оценить масштабы разрушений и найти пострадавших. Это значительно ускоряет принятие решений в первые минуты после аварии. Кроме

того, дроны могут доставлять медикаменты или противопожарные средства в зоны, куда сразу не могут добраться люди.

В Российской Федерации подобные технологии также внедряются: МЧС России на вооружении имеет несколько модификаций пожарных роботов (например, робототехнические комплексы для тушения пожаров «Уран-14»), а на стратегически важных предприятиях создаются ведомственные аварийно-спасательные команды, оснащенные дронами для мониторинга территории. Например, на некоторых газоперерабатывающих заводах введены автоматические системы пожаротушения, где при срабатывании датчиков пламени специальные самоходные установки начинают локализацию огня еще до прибытия пожарных расчетов.

Важно подчеркнуть, что эффективность инновационных решений во многом зависит от их интеграции в общую систему управления авариями и от умения персонала правильно ими пользоваться. Зарубежный опыт показывает, что технология сама по себе не гарантирует успеха — требуются продуманные регламенты и обучение. Например, при внедрении носимых датчиков нужно разработать четкий план действий при сигнале тревоги от них; при применении роботов — учесть тактику совместной работы робота и человека. Организационные инновации, такие как концепция «Оператор 4.0» — подготовленный высококвалифицированный оператор, работающий в тесном взаимодействии с умными машинами — также являются частью общего тренда «Безопасность 4.0». В «Оператор 4.0» человеческий фактор не устраняется, а усиливается за счет технологий: работник оснащен инструментами (AR, носимые устройства, ИИ-помощники), которые расширяют его возможности без-

опасно и эффективно действовать в любых ситуациях.

Таким образом, современные инновационные меры охватывают весь цикл управления ЧС: предупреждение (прогнозные аналитические системы), подготовку

(VR/AR-тренинги, обучение «Оператор 4.0»), мониторинг (сети IoT, носимые датчики) и непосредственное реагирование (роботы, автоматизированные системы). В таблице суммированы ключевые технологии и примеры их применения в последние годы.

Таблица
Основные инновационные меры противодействия ЧС на предприятиях (2020–2025 гг.)

Table

Main innovative emergency response measures at enterprises (2020–2025)

Направление инноваций Innovation area	Примеры технологий и решений Examples of technologies and solutions	Практическая реализация (Россия и мир) Practical implementation (Russia and worldwide)
Прогнозирование и профилактика Forecasting and prevention	Анализ больших данных датчиков; алгоритмы машинного обучения для предсказания отказов; ситуационные модели процессов (Digital Twin) Analysis of big sensor data; machine learning algorithms for failure prediction; situational process models (Digital Twin)	Система предупреждения аварий СПАС на химическом предприятии (Россия). Предиктивная аналитика на нефтегазовых платформах (мир) SPAS accident prevention system at a chemical plant (Russia). Predictive analytics on oil and gas platforms (world)
Непрерывный мониторинг (IoT) Continuous monitoring (IoT)	Сети датчиков и контроллеров, интегрированные в оборудование; автоматизированные системы раннего оповещения о ЧС Networks of sensors and controllers integrated into equipment; automated early warning systems for emergencies	Система дистанционного мониторинга параметров на АЭС (Россия). «Умные» датчики утечек и пожара на производствах (мир) Remote monitoring system at nuclear power plants (Russia). Smart leak and fire detectors at industries (world)
Поддержка решений операторов Operator decision support	Интеллектуальные СППР, рекомендуемые оптимальные действия при отклонениях; цифровые двойники для сценарного прогнозирования Intelligent decision support systems recommending optimal actions during deviations; digital twins for scenario forecasting	Decision Support System на основе нейросети для буровой (Россия). Цифровой двойник нефтеперерабатывающего завода (мир) Neural network-based Decision Support System for drilling (Russia). Digital twin of an oil refinery (world)
Обучение и подготовка (VR/AR) Training and preparation (VR/AR)	Виртуальные тренажеры аварийных ситуаций; системы дополненной реальности для обучения и инструктажей Virtual emergency simulators; augmented reality systems for training and instruction	VR-тренинг по эвакуации и пожаротушению на заводах (Россия и мир); AR-очки для обучения технике безопасности на стройплощадках (мир) VR training for evacuation and firefighting at factories (Russia and world); AR glasses for safety training at construction sites (world)
Носимые устройства (wearables) Wearable devices	Смарт-датчики в касках и спецодежде; трекеры локации и состояния работника; индустриальные экзоскелеты Smart sensors in helmets and workwear; worker location and condition trackers; industrial exoskeletons	Система контроля газа и положения для шахтеров (Россия). Носимые датчики усталости и концентраций на фабриках (мир) Gas and positioning control system for miners (Russia). Wearable fatigue and pollutant exposure sensors at factories (world)

Окончание таблицы

Направление инноваций Innovation area	Примеры технологий и решений Examples of technologies and solutions	Практическая реализация (Россия и мир) Practical implementation (Russia and worldwide)
Робототехника и дроны Robotics and drones	Автономные пожарные роботы; беспилотные летательные аппараты наблюдения; дистанционно управляемые манипуляторы для аварийных работ Autonomous firefighting robots; unmanned aerial surveillance vehicles; remotely operated manipulators for emergency operations	Робототехнические комплексы МЧС для тушения пожаров (Россия). Роботы-разведчики и дроны на объектах химической промышленности (США, Япония) EMERCOM robotic firefighting complexes (Russia). Scout robots and drones at chemical industry sites (USA, Japan)

Заключение

Развитие технологий в период 2020–2025 гг. открывает новые возможности для противодействия чрезвычайным ситуациям на промышленных предприятиях.

Проведенный обзор показывает, что инновационные меры — от искусственного интеллекта и цифровых двойников до носимой электроники и робототехники — способны значительно повысить уровень промышленной безопасности. Зарубежный опыт (США, Европа, Азия) демонстрирует успешное снижение аварийности при внедрении систем концепции «Безопасность 4.0», сочетающих передовые технические решения и человеко-центричный подход к безопасности. Российские предприятия также активно перенимают эти практики: в исследованиях и пилотных проектах отечественных организаций реализованы системы прогнозирования аварий на основе ИИ [1, 4], цифровые модели технологических процессов для оценки рисков [4], тренажеры виртуальной реальности и другие новшества.

Важно подчеркнуть, что эффективная реализация инновационных мер требует комплексного подхода. Необходимо учитывать технические, организационные и человеческие аспекты: интеграция новых систем

должна сопровождаться обновлением нормативной базы, обучением персонала, развитием культуры безопасности на производстве. Как отмечают специалисты, вызовы «Безопасность 4.0» включают в себя вопросы кибербезопасности, стандартизации данных и преодоления сопротивления изменениям внутри организаций. Решение этих задач будет определять успех внедрения инноваций в долгосрочной перспективе.

Тем не менее тенденции последних лет однозначно указывают на то, что цифровые и инженерные инновации становятся неотъемлемой частью системы противодействия ЧС. Их применение позволяет переходить от реактивной стратегии — ликвидации последствий аварий — к проактивной стратегии упреждения аварийных ситуаций. Это ведет к сохранению жизней, снижению материального ущерба и повышению устойчивости критически важных объектов экономики. Можно ожидать, что в ближайшем будущем технологии прогнозирования, VR-обучения, роботизированного реагирования и другие обсужденные меры получат еще более широкое распространение. Их дальнейшее совершенствование — одна из ключевых задач науки о безопасности и инженерии катастроф на пути к нулевому травматизму и аварийности в промышленности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Автоматизированная система предотвращения аварий при строительстве скважин / А. Н. Дмитриевский и др. // Нефтяное хозяйство. 2021. Т. 1167, № 1. С. 72–76. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-1-72-76
2. Park J., Kang D. Artificial Intelligence and Smart Technologies in Safety Management: A Comprehensive Analysis Across Multiple Industries // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 24. P. 11934. DOI: 10.3390/app142411934
3. Zio E., Miqueles L. Digital Twins in Safety Analysis, Risk Assessment and Emergency Management // Reliability Engineering & System Safety. 2024. Vol. 246. P. 110040. DOI: 10.1016/j.ress.2024.110040
4. Антонов О. В., Райкова Е. Ф., Муратов Р. Э. Система предотвращения аварийных ситуаций производственных технологических объектов на основе ситуационной математической модели // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 2. С. 22–32. DOI: 10.24143/2072-9502-2022-2-22-32
5. Examining the Role of Augmented Reality and Virtual Reality in Safety Training / G. Lampropoulos et al. // Electronics. 2024. Vol. 13, No. 19. P. 3952. DOI: 10.3390/electronics13193952
6. Wearables for Industrial Work Safety: A Survey / E. Svertoka et al. // Sensors. 2021. Vol. 21, No. 11. P. 3844. DOI: 10.3390/s21113844
7. Немчинов Д. В., Селиверстова А. Н., Антонов О. В. Поддержка принятия решений по управлению предаварийными ситуациями на примере установки каталитического риформинга // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 2. С. 19–25.

REFERENCES

1. Automated system for preventing accidents during well construction / A. N. Dmitrievsky et al. // Oil Industry. 2021. Vol. 1167, No. 1. Pp. 72–76. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-1-72-76
2. Park J., Kang D. Artificial Intelligence and Smart Technologies in Safety Management: A Comprehensive Analysis Across Multiple Industries // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 24. P. 11934. DOI: 10.3390/app142411934
3. Zio E., Miqueles L. Digital Twins in Safety Analysis, Risk Assessment and Emergency Management // Reliability Engineering & System Safety. 2024. Vol. 246. P. 110040. DOI: 10.1016/j.ress.2024.110040
4. Antonov O. V., Raykova E. F., Muratov R. E. System for preventing emergency situations at production technological facilities based on a situational mathematical model // Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Informatics. 2022. No. 2. Pp. 22–32. DOI: 10.24143/2072-9502-2022-2-22-32
5. Examining the Role of Augmented Reality and Virtual Reality in Safety Training / G. Lampropoulos et al. // Electronics. 2024. Vol. 13, No. 19. P. 3952. DOI: 10.3390/electronics13193952
6. Wearables for Industrial Work Safety: A Survey / E. Svertoka et al. // Sensors. 2021. Vol. 21, No. 11. P. 3844. DOI: 10.3390/s21113844

7. Nemchinov D. V., Seliverstova A. N., Antonov O. V. Decision support in managing pre-emergency situations based on the example of a catalytic reforming unit // Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Informatics. 2020. No. 2. Pp. 19–25.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пичугин Леонид Михайлович, аспирант факультета экономики Университета «СИНЕРГИЯ» (125080, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский пр., 80); e-mail: narukun20001@gmail.com

Лавров Валерий Юрьевич, e-mail: 26092001@mail.ru

Шабанова Светлана Владимировна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Пищевая безопасность» Университета РОСБИОТЕХ (125080, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское ш., д. 11); e-mail: Shabanovasv@mgupp.ru

Абрамов Александр Дмитриевич, e-mail: jjabrabr@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Leonid M. Pichugin, graduate student, Synergy University, Faculty of Economics (80, Leningradsky Prospect, Moscow, 125080, Russian Federation); e-mail: narukun20001@gmail.com

Valery Yu. Lavrov, e-mail: 26092001@mail.ru

Svetlana V. Shabanova, Cand. Sci (Eng.), Associate Professor of the Department of Food Safety, ROSBIOTECH (11, Volokolamsk Highway, Moscow, 125080, Russian Federation); e-mail: Shabanovasv@mgupp.ru

Alexander D. Abramov, e-mail: jjabrabr@mail.ru